



Interreg
MARIITTIMO-IT FR-MARITIME



UNIONE EUROPEA

PROTERINA
ÉVOLUTION³

Fondo Europeo di Sviluppo Regionale

T2.4.6. Rapport sur le renforcement de la modélisation hydrologique et hydraulique

Fondazione CIMA

Janvier 2020



Autorità di Bacino Distrettuale dell'Appennino Settentrionale

La cooperazione al cuore del Mediterraneo
La coopération au coeur de la Méditerranée

Ce travail a été développé dans le cadre de l'activité A4 «Amélioration de la modélisation météorologique, hydrologique et hydraulique» du projet PROTERINA-3Évolution et a été développé par le personnel de la Fondation CIMA en collaboration avec les autres partenaires du projet. En particulier, les contributions reçues de la Ville de Nice, de le Département du VAR et de la région Sardaigne sont mises en avant.

Index

1. Introduction.....	5
2. Produits pour la surveillance, l'analyse en temps réel et l'observation des événements hydrologiques.....	6
2.1. Démonstrateur de la surveillance du risque d'inondation sur les ruisseaux à travers des caméras (Ville De Nice).....	6
2.1.1. Objectif de l'expérimentation à l'échelle du bassin hydrographique	6
2.1.2. Contexte et problématique en matière de risque inondation au plan local à Nice	6
2.1.3. Descriptif technique de la solution de supervision	15
2.1.4. Analyse fonctionnelle, suivi, premiers résultats et amélioration de la plateforme en cours d'expérimentation	25
2.1.5. Bilan final, conclusions et perspectives d'évolution du démonstrateur technologique de supervision du risque inondation	33
2.2. Système de surveillance basé sur des observations radar pluviométriques et une modélisation hydrologique mis à disposition via une interface appropriée (Departement du Var)	35
3. Produits préparatoires ou propédéutiques pour la surveillance des événements hydrologiques.....	36
3.1. Révision des zones d'alerte pour risque hydraulique (région Sardaigne)	36
3.1.1. Synthèse des activités pour la révision des zones de vigilance.....	36
3.1.2. Caractérisation pluviométrique des zones de vigilance	42
3.1.3. Définition de l'état d'humidité du sol	43
3.1.4. Définition des seuils pluviométriques inverses	43
3.1.5. Mise en route de la phase expérimentation.....	44
4. Outils et études d'analyse ou de caractérisation météo-hydrologique de support en temps différé	45
4.1 Réalisation des modèles hydrologiques pour la gestion des barrages et analyse des indicateurs d'altération hydrologique.	45
4.1.1 Avertissement.....	45
4.1.2 Bassin duTrebbia, encadrement général.	45
4.1.3 Le modèle hydrologique	46
4.1.4 Application au bassin du Trebbia.....	47

4.1.5	Setting Barrage du Brugneto.....	49
4.1.6	Résultats.....	51
5.	Conclusions	60
6.	Annexe	61
6.1.	Ville de Nice	61
6.1.1.	Retour d'expérience sur l'épisode du 01-02 décembre 2019	61
6.1.2.	Les modèles de données	86

1. Introduction

Comme on sait, les activités finalisées au renforcement de la modélisation hydrogéologique et hydraulique peuvent avoir un double objectif au niveau opérationnel: d'une part, développer tout le processus de gestion d'une crise en temps réel – en anticipant dans certains cas les phénomènes qui peuvent se produire dans un territoire – avec, pour conséquence, une augmentation de la capacité de réponse à un épisode de crue de la part des organismes impliqués, il suffit de penser aux prévisions en vue de l'alerte précoce ou de la surveillance; d'autre part, d'appuyer la gestion et la protection des ressources hydriques, ainsi que la gestion du risque en temps dit différé, qu'on pense aux activités de cartographie des zones inondables ou aux études sur le bilan hydrique.

Pour ce qui est de la gestion des risques et des événements en temps réel, la zone transfrontalière intéressée par le projet PROTERINA-3Évolution est caractérisée par un degré élevé d'homogénéité en ce qui concerne les phénomènes météorologiques, y compris ceux de majeure intensité. Des phénomènes intenses de cyclogenèse qui se manifestent sur les zones marines près du Golfe du Lion, de la Corse et de la Sardaigne ont un impact dévastant toujours plus fréquent sur les côtes de la zone transfrontalière qui sont historiquement exposées à un degré élevé du risque d'inondation et d'éboulement, surtout dans les centres urbains et dans les zones périurbaines qui se sont développées le long des cours d'eau. Pour affronter de tels événements, il est nécessaire, entre autres choses, que le territoire s'équipe d'instruments d'observation et de prévision météorologique et hydrologique avancés, et par conséquent de systèmes de modélisation numérique continuellement mis à jour, capables de faire le suivi et de prédire des événements atmosphériques et de crue suffisamment à l'avance et avec précision dans le temps et dans l'espace. De la même façon, il est nécessaire qu'un tel renforcement de la modélisation hydrologique et hydraulique en temps réel soit intégré dans un système plus vaste de vigilance et de procédures qui rendent ce système plus efficace. De plus, comme on vient de le dire, la modélisation hydrologique peut aussi servir de support à différentes autres activités liées au cycle des eaux sur le territoire, comme par exemple la gestion des barrages ou la gestion des ressources hydriques, dans un temps dit différé.

Dans ce but, dans le cadre du projet PROTERINA-3Évolution, différents produits, se rapportant à ces cas et décrits dans les chapitres suivants, ont été réalisés par le partenariat. Notamment, dans le Chapitre 2 sera décrit un produit destiné au suivi, à l'analyse en temps réel et à l'observation, réalisé par la Ville de Nice et un autre réalisé par le Département du Var; au Chapitre 3 sera décrite une activité propédeutique au suivi des événements hydrogéologiques et hydrauliques et qui se consacre en particulier à la révision des zones de vigilance pour le risque hydrogéologique de la Région Sardaigne; enfin au Chapitre 4 sera présentée une étude d'analyse et caractérisation météo-hydrologique de support en temps

différé, relative à la mise en œuvre de la modélisation hydrologique pour la gestion des barrages et l'analyse des indicateurs d'altération hydrologique.

2. Produits pour la surveillance, l'analyse en temps réel et l'observation des événements hydrologiques

2.1. Démonstrateur de la surveillance du risque d'inondation sur les ruisseaux à travers des caméras (Ville De Nice)

2.1.1. Objectif de l'expérimentation à l'échelle du bassin hydrographique

Les actions de recherche, développement et d'expérimentation portées par la Ville de Nice au sein du consortium Proterina 3-Evolution, se déclinent de janvier 2017 à février 2020, à l'échelle du bassin versant du fleuve Magnan suivant **deux axes, l'un technique et scientifique sur la prévention, la gestion et l'alerte précoce du risque d'inondation, l'autre communicationnel sur la Culture du risque inondation avec un parcours pédagogique.**

En particulier, l'axetechnique et scientifique prévoit la conception et le développement puis l'expérimentation d'une plateforme innovante de supervision du risque inondation (croisement des données topographiques, géologiques, hydrologiques, météorologiques (données Météo-France, données de lame d'eau radar local, historique des crues), la vidéosurveillance en temps réel via des caméras intelligentes, permettant : le développement d'une modélisation pluie / débit, la définition de seuils d'alerte de hauteur d'eau, la vitesse du flux et la détection d'objets flottants.

Objectif principal de l'expérimentation : pouvoir déclencher une alerte précoce de la lame d'eau au moins une heure avant impact. En fonction des résultats au terme de l'expérimentation, cette plateforme de supervision constituerait un modèle transposable sur les autres cours d'eau de la Ville de Nice et de la Métropole NCA.

2.1.2. Contexte et problématique en matière de risque inondation au plan local à Nice

2.1.2.1. Contexte naturel/humain : Présentation de la problématique risque/enjeux

La commune de Nice est exposée au risque inondation notamment du fait de la proximité de fleuves côtiers au régime hydrologique torrentiel comme le Var, le Paillon et le Magnan.



Figure 1 Bassins versants des fleuves traversant la commune de Nice - SIGNCA

Si la pluviométrie locale est relativement bien connue (grâce notamment aux données de pluviographes au sol et de radars météorologiques), le suivi hydrométrique (connaissance des débits) varie d'un cours d'eau à un autre. A l'heure actuelle, seuls le Var et le Paillon disposent d'un système d'alerte de crues (intégré au Plan Communal de Sauvegarde de la Ville de Nice).

Concernant le Magnan, il n'existe pas pour le moment de système d'alerte car la rapidité de réponse du bassin versant n'a pas permis de définir des seuils de débits pertinents pour déclencher des alertes. En revanche, il a été instrumenté début 2011: 2 stations pluviographiques et 2 stations liminigraphiques permettent de connaître en temps réel la pluviométrie locale et les niveaux d'eau dans le cours d'eau (stations opérationnelles depuis 2013). Néanmoins, ce dispositif ne permet pas une alerte précoce des populations en cas de crue soudaine. En effet, le bassin versant du Magnan qui a connu une urbanisation progressive croissante (+ de 5000 habitants) au cours des 40 dernières années, présente désormais de nombreux enjeux dans sa partie aval susceptibles d'être touchés de manière considérable par les épisodes pluvieux intenses. Ainsi, il apparaît à présent indispensable de mettre en œuvre un dispositif adapté pour anticiper et prévenir tout danger mettant en jeu la sécurité des personnes et les biens.

[2.1.2.2. Le cas du Magnan : description générale](#)

Le Magnan est un cours d'eau non domanial, situé à l'ouest de Nice, qui draine un bassin versant de 18,3 km². Il est caractérisé par de fortes pentes et un temps de réponse

relativement court (environ 20 minutes). Son débit est quasiment nul la majeure partie de l'année et il est touché par des crues rapides et violentes lors de fortes pluies. La partie amont du bassin est relativement naturelle tandis que la partie aval est fortement urbanisée et présente de nombreux enjeux.

Longé par le boulevard de la Madeleine en rive gauche, le cours d'eau est à ce niveau canalisé à ciel ouvert et enfin busé dans sa partie aval.

Il est à noter que le parcours du Magnan est traversé par:

- **Quatre grands axes de transports transversaux** donnant lieu à des ouvrages de franchissement :
 - Le viaduc de l'autoroute A8,
 - La voie ferrée (19ème siècle) Nice/Digne (train des Pignes),
 - La voie rapide Pierre Mathis juxtaposée à la voie ferrée Marseille/Vintimille,
 - Le boulevard de la Madeleine.
- **Deux zones environnementales classées :**
 - Le site Natura 2000 FR9301569 « Vallons obscurs de Nice et de Saint Blaise » (périmètre du bassin versant considéré, (arrêté préf. protection de biotope des Vallons obscurs du 15/01/2001).
 - La ZNIEFF 06100110 « Vallons de Magnan, de Vallières et de Saint Roman », classée zones terrestres de type 1 (car identité fonctionnelle peu anthroposée, peu artificialisée et de fort intérêt patrimonial). Ce territoire correspond aux vallons de Magnan et de Vallières et de leurs affluents, (exclusion faite des zones urbanisées).

[2.1.2.3. Le risque inondation](#)

Si l'écoulement dans le cours d'eau dépend en partie du contexte naturel, il est également considérablement influencé par des facteurs anthropiques :

- Il est parsemé de seuils (qui induisent un engravement progressif du lit) et de murets latéraux et passerelles (qui réduisent considérablement sa capacité).
- Il est couvert dans sa partie aval (risques d'embâcles et de débordements accrus).
- Des habitations sont implantées dans le lit majeur du cours d'eau, parfois séparées du boulevard d'accès, les exposant ainsi au danger tout en les privant d'échappatoire.
- Le manque d'entretien de la végétation aux abords du lit : embâcles potentiels au niveau des passerelles.

L'étude de la dynamique fluviale du vallon de Magnan conduite par HYDRATECH en 2012, a permis de définir, à partir de pluies de projet, les débits et hydrogrammes caractéristiques du Magnan pour des crues de périodes de retour sur 10 ans, 30ans, 50 ans et 100 ans. Ces

hydrogrammes, injectés dans un modèle hydraulique, ont permis notamment de caractériser la vulnérabilité du vallon du Magnan.

Au-delà de la crue décennale, des débordements apparaissent sur la partie à ciel ouvert, et pour la crue cinquantennale, le collecteur aval atteint sa limite de capacité. Le boulevard de la Madeleine ainsi que les zones urbanisées aval peuvent alors être inondées (Figure 2).



Figure 2 Représentation de l'aléa inondation du Magnan et les enjeux exposés- SIGNCA

Tableau 1 Crues recensées sur le vallon du Magnan (source : Métropole Nice Côte d'Azur)

01/10/1787	Destruction d'une oliveraie
1893	Inondation carrefour Madeleine
23/09/1909	2 morts
09/11/1917	Affaissements de murs
04/07/1925	Destruction kiosque terminus tramway
17/11/1940	La voie du Boulevard de la Madeleine emportée
26/09/1981	Passerelles emportées
01/10/1983	Inondations au carrefour du boulevard de la Madeleine
27/10/1989	5 cm d'eau sur le boulevard de la Madeleine
27/10/1999	Boulevard de la Madeleine inondé à l'amont
07/11/2000	Eboulement et affouillement de la chaussée.
12/2005	Boulevard de la Madeleine inondé à l'amont.
11/2014	Boulevard de la Madeleine inondé à l'amont (au n° 500), 2 x en 1 mois.

2.1.2.4. Les enjeux et vulnérabilités

Le Plan Communal de Sauvegarde (PCS) inondation de la Ville de Nice a permis de **diviser le vallon** en **3 secteurs bien distincts** (Figure 3) tant sur le plan de l'aléa auquel ils sont soumis que sur celui de leur vulnérabilité:

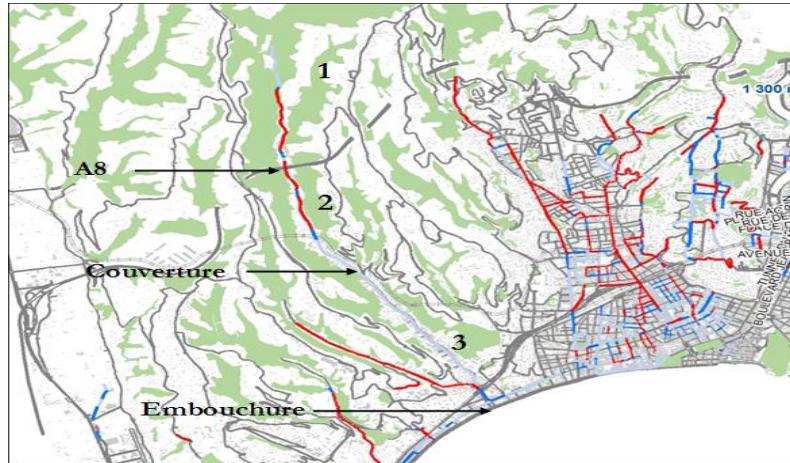


Figure 3 Représentation de la sectorisation (source : P. CEDRAS)

Le secteur 1 amont (Figure 4): de la source du cours d'eau (Aspremont) à une limite en aval symbolisée par le viaduc de l'A8.

Sur ce secteur, les débordements sont classés en aléa inondation très fort (hauteurs d'eau et vitesses d'écoulement importantes) mais **les enjeux sont faibles** (les champs d'expansion correspondant à des zones naturelles sans habitation ni Etablissement Recevant du Public (ERP)).

☞ La surveillance est indispensable au vu du risque des embâcles avec vague dommageable pour l'aval, au droit des différentes passerelles à faibles sections hydrauliques, susceptibles d'impacter ensuite les zones habitées en aval.

Enjeux environnementaux: deux installations classées pour l'environnement (ICPE), l'une réalisant des traitements de surfaces (zone d'aléa très fort) et une blanchisserie.

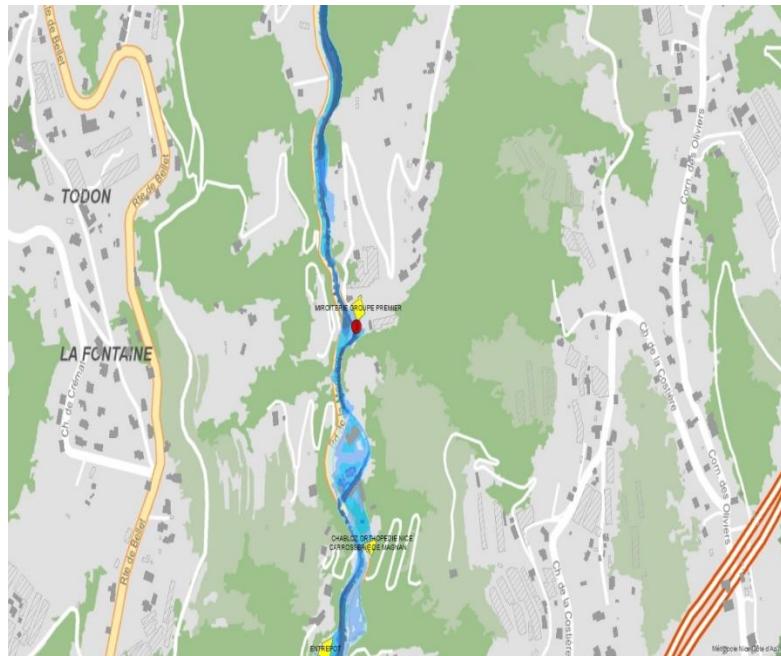


Figure 4 *cartographie de l'emprise de la crue centennale sur le secteur 1 amont*

Le secteur 2 aval intermédiaire (Figure 5): il se situe entre le viaduc de l'A8 et l'entrée de la couverture.

Il s'agit d'un secteur urbanisé dans lequel certaines habitations implantées dans le lit majeur du Magnan pourraient être menacées (notamment celles ne possédant pas d'étages). Le bar-restaurant « Le Bracco » y est très vulnérable (en pointe de crue. Jusqu'à 1m80 de haut). Cinq Etablissements Recevant du Public (ERP) sont situés dans le lit majeur du Magnan sur ce secteur (dont deux écoles).

En plus d'enjeux humains élevés, il existe des enjeux environnementaux : une ICPE soumise à déclaration et des canalisations fragiles (en rive droite) pourraient être emportées et causer des dommages écologiques et/ou des embâcles.



Figure 5 cartographie de l'emprise d'une crue centennale sur le secteur 2 aval intermédiaire

Le secteur 3 aval (Figure 6): toute la partie aval de la couverture canalisée jusqu'à l'embouchure

Les enjeux humains, socio-économiques et environnementaux sont très élevés:

- Le secteur est très urbanisé (présence de nombreux logements sociaux) et les habitations (du stade Nicolaï au square Jean Gabin) sont très vulnérables face au ruissellement pluvial et au débordement du Magnan. Il existe dix ERP, dont quatre catégories 2 et trois de catégorie 3 (respectivement : un collège, deux centres commerciaux, un restaurant puis deux écoles et un centre commercial).
- De nombreux commerces, entreprises et aménagements touristiques sont susceptibles d'être affectés par la crue (pollution et dégâts par charriage de matériaux...).
- **Enjeux environnementaux** : Il existe une dizaine d'ICPE : une blanchisserie (soumise à autorisation) et 11 autres ICPE (soumises à déclaration). L'enjeu écologique est presque nul (cours d'eau couvert) avant l'embouchure, mais il est très élevé pour les espèces marines massivement présentes en mer (l'embouchure) ↗ le drainage de la pollution du bassin versant aurait un grave impact.

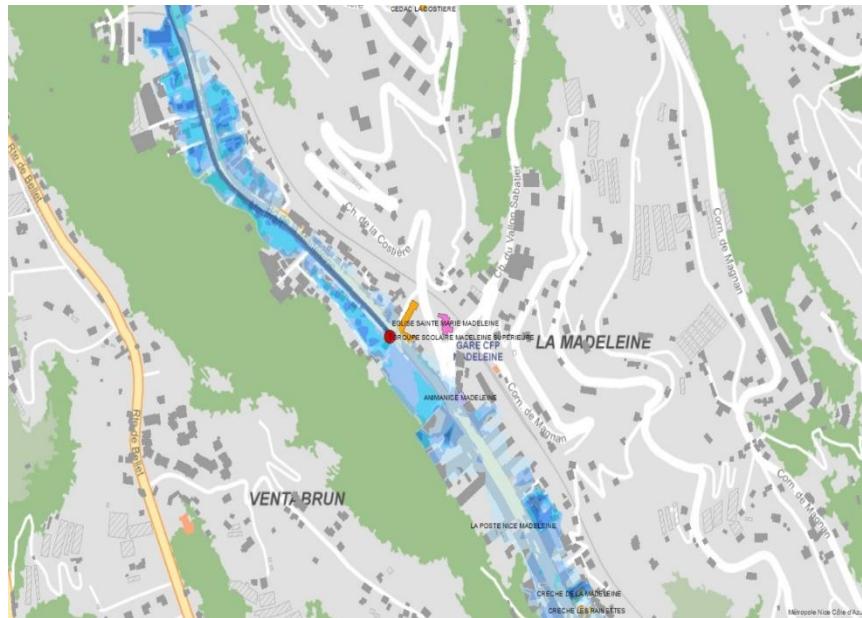


Figure 6 cartographie de l'emprise d'une crue centennale sur le secteur 3 aval

2.1.2.5. La surveillance hydrométrique du cours d'eau

En vue de mettre en place un dispositif de protection des biens et des personnes et déployer les moyens communaux pour faire face à un évènement de crise, les services de la Métropole Nice Côte d'Azur ont commencé à instrumenter le bassin versant du Magnan en 2011.



Figure 7 les 4 types de capteurs pré-existants.

La transmission des données des capteurs de mesure (2 pluviographes + 1 sonde à ultrasons + 1 radar) n'est opérationnelle que depuis 2013 sur le Magnan, la profondeur des données hydrométriques sur le bassin versant est ainsi très faible. Or, dans

l'optique d'adapter un modèle pluie-débit sur le Magnan afin d'anticiper les crues et d'être en capacité de déclencher une alerte au moins une heure avant impact afin de pouvoir évacuer à temps les populations concernées, une évolution de ces outils s'avère essentielle. Suivant cet objectif, il serait donc indispensable de pouvoir enregistrer un historique de données correspondant à des événements significatifs sur ce bassin versant, et de pouvoir croiser et analyser, un ensemble de données géographiques, topographiques, hydrologiques, météorologiques, hydrométriques, réelles et virtuelles (historique + observation + modélisation auto-corrective). Ceci afin de pouvoir développer une modélisation affinée et fiable (évoluant avec le changement climatique et permettant d'établir différents scénarii en fonction de l'importance de la pluviométrie anticipée, ajustée par les données en temps réel) et de disposer d'une vision à la fois globale et affinée, en situation de crise (aide à la décision/anticipation de l'alerte).

Dans le contexte particulier de ce bassin versant à cinétique rapide, très urbanisé et soumis régulièrement à des épisodes méditerranéens, la surveillance en continu du rapport pluie/débit et la détection des objets flottants représentent donc un levier essentiel pour l'amélioration de l'alerte précoce et de la gestion de crise.

2.1.2.6. Conclusion de l'analyse de la problématique et des enjeux

Le bassin versant du Magnan présente donc une certaine disparité dans la répartition des enjeux. Au vu du croisement d'un niveau de risque d'inondation rencontrant des enjeux élevés dans les périmètres des secteurs 2 et 3, très urbanisés aujourd'hui et susceptibles de se développer encore, les valeurs retenues dans l'historique pour l'établissement du modèle pluie-débit réalisé par le bureau d'étude hydraulique en 2013 demanderaient donc à être reconfirmées, étayées et étudiées avec profondeur et une mise en perspective.

En effet, en cas d'inondations, notamment à caractère torrentiel, la force hydraulique et les embâcles sont susceptibles d'occasionner des dégâts matériels importants dans ces secteurs et de façon plus préoccupante pour les ICPE comprenant des matières dangereuses et polluantes. Les enjeux situés à l'aval de ces installations sont particulièrement exposés, aussi la présence de ces entreprises en zone inondable augmente le niveau de vulnérabilité de secteurs directement en aval.

Bien que les services de la Métropole Nice Côte d'Azur aient instrumenté le bassin versant du fleuve Magnan en 2011, les 4 capteurs n'étant opérationnels que depuis 2013, la profondeur et le recul sur les données hygrométriques sont donc très faibles. Or, dans l'optique d'adapter un modèle pluie-débit du fleuve Magnan permettant d'anticiper les crues, il serait indispensable de pouvoir disposer d'un historique de données précises correspondant à des événements significatifs. Atteindre cet objectif nécessiterait donc la mise en place d'une surveillance en continu des débits et objets flottants au moyen de capteurs vidéo intelligents permettant de compléter la base de données, aujourd'hui

insuffisante et, de développer les outils opérationnels adéquats pour la mise en place de procédures de pré-alerte à partir de la modélisation établie de différents scénarios.

De tels éléments innovants, contribueraient à éléver le niveau global de résilience du territoire en améliorant tant le niveau d'alerte et de prévention du risque que celui de sa gestion, par la rapidité d'intervention qu'ils permettent ainsi que par le soutien en termes d'aide à la décision performante qu'ils constituent en temps de crise pour garantir la sécurité des personnes et des biens dans le contexte actuel d'urbanisation en aval du Magnan.

2.1.3. Descriptif technique de la solution de supervision

Le système de supervision des crues du Magnan permet à la DPGR de la Ville de Nice et aux services métropolitains de gérer les crues du Magnan avec une anticipation suffisante pour mettre en sécurité les biens et les personnes vulnérables situés dans le bassin versant, grâce aux prévisions du modèle hydrologique. Il sert également à les alerter en cas de crues imminentes (certaines étant peu prévisibles).

La solution retenue est déployée dans l'infrastructure informatique de la Métropole.

2.1.3.1. Analyse des besoins

Afin de garantir la réactivité des agents municipaux et métropolitains en cas de crise, il est nécessaire de pouvoir disposer d'une interface informatique simple d'utilisation et ergonomique, qui centralise l'ensemble des données (issues des capteurs terrain, du radar météo, des caméras, des prévisions du modèle hydrologique etc.) et les affiche de manière claire (localisation des stations de mesure et des caméras avec leurs informations en temps réel) en les mettant au regard des enjeux (affichage de couches cartographiques et de l'aléa inondation notamment).

La solution doit présenter les débits instantanés calculés et les débits prévus dans un hydrogramme se mettant à jour au cours de l'événement.

Il est également attendu un affichage en continu du niveau d'alerte en cours, et la transmission de SMS en cas de dépassement des seuils définis dans le cadre du projet, afin de permettre aux décideurs de déployer les moyens humains et matériels pour protéger du risque inondation.

2.1.3.2. Architecture technique

Le système de supervision des crues permet d'afficher selon le besoin différentes informations à l'écran:

- Le fond de plan cartographique de la Métropole ;
- La crue décennale du Magnan ;
- La crue trentennale du Magnan ;

- La crue cinquantennale du Magnan;
- La crue centennale du Magnan;
- La lame d'eau radar animée;
- Les enjeux (bâtiments particuliers);
- Les données d'observation météo;
- Le flux vidéo des caméras;
- Les données des stations limnimétriques;
- Les données limnimétriques instantanées calculées à partir de l'analyse des images des caméras;
- Les données limnimétriques estimées dans les prochaines heures à partir de l'analyse des images des caméras;
- Les alertes liées au risque d'inondation.

Le système de supervision mis en place fait intervenir différents équipements. Le schéma d'architecture générale représente les différents composants du système (Figure 8 et Figure 9):

- Les caméras du système de protection vidéo de la Ville de Nice;
- Le système géographique SIG de la Métropole;
- L'entrepôt de données de la Ville de Nice;
- Les stations limnimétriques du Système d'Alerte des Crues de la Métropole;
- Les données météorologiques d'observation et de prévision;
- Le système d'analyse de Tenevia;
- Le système de supervision des crues de Thales.

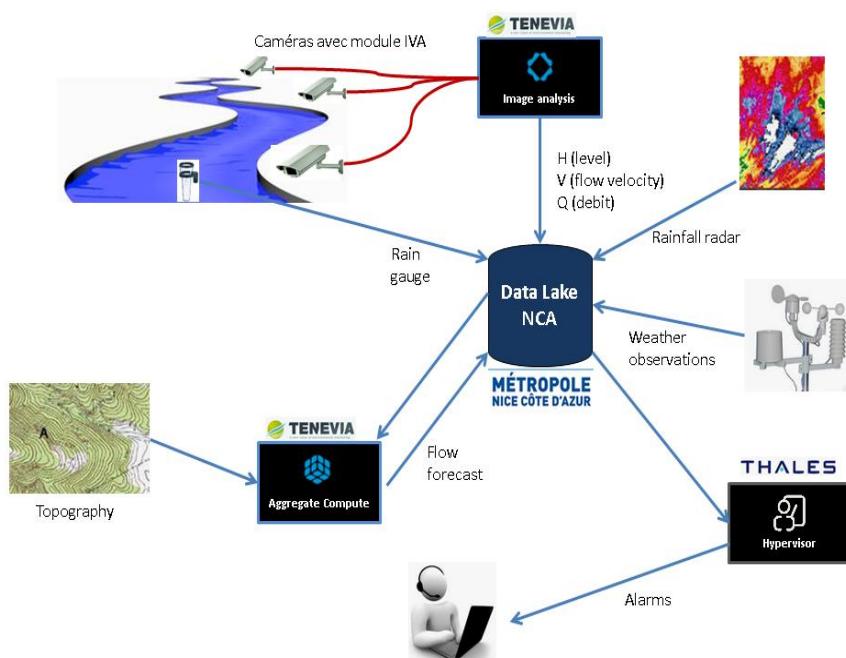


Figure 8 Schéma d'architecture générale

La cooperazione al cuore del Mediterraneo
La coopération au coeur de la Méditerranée

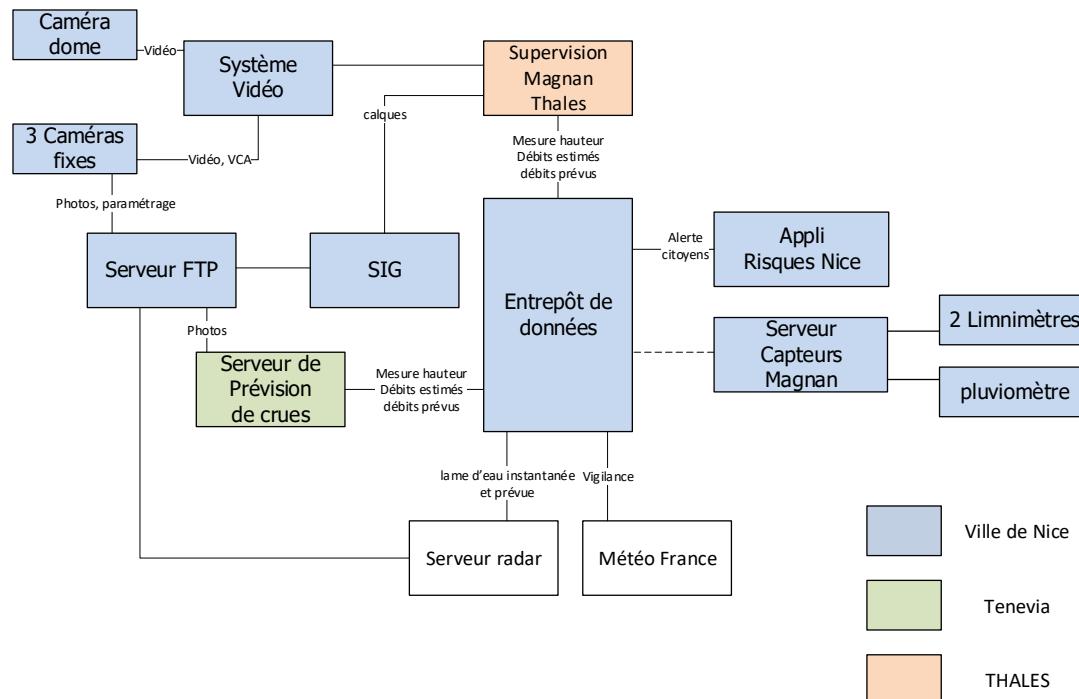


Figure 9: Interfaces entre les éléments du système

2.1.3.2.1. Les sources de données

De nombreuses sources de données sont utilisées par le système de supervision.

La cartographie

Le système d'information géographique de la Métropole dispose de données géographiques accessibles par API. Elles concernent:

- Le fond de carte;
- Les crues remarquables;
- Les bâtis sensibles.

Les images des caméras

Les 3 caméras synchronisent leur horloge interne avec les serveurs de temps de la métropole (Network Time Server Protocol). Les caméras déposent 5 images séparées de 100ms en pleine résolution toutes les 5 minutes sur un serveur FTP. Tenevia scrute le répertoire FTP dédié à la caméra pour récupérer les images. Les images sont purgées au bout de 24 heures.

Les flux vidéo des caméras

Le flux vidéo des caméras peut être visualisé à partir du superviseur afin de permettre une levée de doute. Les requêtes de flux vidéo sont réalisées avec un flux d'images avec une

résolution moins importante et un encodage standard (compression H264). Le protocole de streaming utilisé est Real Time Streaming Protocol.

Les observations Météo

La métropole dispose de données d'observation météorologiques de 3 stations météos. Ces données sont hébergées par la plateforme Smart City de la Métropole et sont accessibles par API. Elles concernent :

- La température ;
- Le point de rosée ;
- L'humidité ;
- La pression atmosphérique ;
- Les précipitations ;
- La direction du vent ;
- La vitesse du vent.

Les prévisions Météo

La métropole dispose de données de prévision météorologiques de 3 stations météos. Ces données sont hébergées par la plateforme Smart City de la Métropole et sont accessibles par API. Elles concernent :

- La température ;
- L'humidité ;
- Les précipitations ;
- La couverture nuageuse ;
- La direction du vent ;
- La vitesse du vent.

La lame d'eau radar

La métropole dispose de la lame d'eau radar sur la ville de Nice. Sa résolution est de 500m² et couvre un rectangle de 12.5 km par 19.5 km. Cette donnée est hébergée par la plateforme Smart City de la Métropole et est accessibles par API géographique.

Les mesures des stations hydrométéorologiques

Le cours d'eau du Magnan est équipé de 2 stations limnimétriques et 2 stations pluviométriques. Les données de ces stations sont hébergées par la plateforme Smart City de la Métropole et sont accessibles par API. Elles concernent :

- Le niveau d'eau ;
- Les précipitations.

Les données d'observation générées après analyse des images des caméras

A partir de l'analyse des images des caméras des données d'observation relatives au cours d'eau sont générées par le système Tenevia. Ces données sont hébergées par la plateforme Smart City de la Métropole et sont accessibles par API. Elles concernent :

- Le niveau d'eau ;
- Le débit d'eau ;
- Les objets flottants.

Les données de prévision générées après analyse des données radar

A partir de l'analyse des images radar météorologique des données de prévision relatives au cours d'eau sont générées par le système Tenevia. Ces données sont hébergées par la plateforme Smart City de la Métropole et sont accessibles par API. Elles concernent :

- Le débit d'eau.

Les alertes générées après analyse des images des caméras

A partir de l'analyse des images des caméras des alertes de débordement de cuvette sont générées par le système Tenevia. Ces données sont hébergées par la plateforme Smart City de la Métropole et sont accessibles par API. Elles concernent :

- Alerte de risque d'inondation.

2.1.3.2.2. L'entrepôt de données (Stéphane ROUX-DSI)

L'entrepôt de données de la Métropole est basé sur un modèle de plateforme distribuée avec des interfaces de programmation d'applications (API) communes compatibles avec les normes européennes. L'architecture informatique est ouverte et standardisée, elle permet :

- De regrouper les données au sein d'une seule plateforme ;
- Un accès unifié aux différentes données par une API standardisée ;
- De partager les données en s'appuyant sur des modèles de données harmonisés ;
- De construire une offre intégrée de services personnalisés pour les touristes en mobilité
- De mettre en œuvre des applications intelligentes tout en réduisant les coûts de développement et d'intégration.

L'entrepôt de données de la Métropole est basé sur le CEF Context Broker Orion.

Il fait partie des « Connecting Europe Facility building blocks » promu par l'Europe dont le lien est ec.europa.eu/cefdigital/wiki/display/CEFDIGITAL/Orion+Context+Broker).

Ce composant permet de gérer les informations de contexte de manière décentralisée et à grande échelle. Il met en œuvre l'API FIWARE NGSI v2. C'est une API simple et puissante, qui permet d'effectuer des requêtes de mise à jour et des requêtes de consultation.

Il met en œuvre une fonction essentielle permettant de répondre à la nécessité de gérer les informations de contexte, d'effectuer des mises à jour et d'apporter un accès au contexte.

La technologie FIWARE / CEF Context Broker a été adoptée par plusieurs organismes significatifs tels que GSMA, TM Forum ou des initiatives telles que OASC (Open and Agile Smart Cities). Il s'est imposé comme un de facto standard ouvert pour la gestion des informations de contexte, permettant un développement plus rapide et plus facile de solutions intelligentes ainsi que la matérialisation d'une architecture de « système de systèmes » dans de multiples domaines d'application, en particulier dans les domaines des villes intelligentes.

Le CEF Context Broker permet d'atteindre les objectifs suivants :

- Disposer d'un modèle d'informations contextuelles pouvant s'adapter à l'évolution de la connaissance du contexte ;
- Disposer d'un modèle d'informations contextuelles capable de modéliser des informations hétérogènes ;
- Avoir un modèle d'informations contextuelles qui collecte et fournit des informations au bon moment ;
- Disposer d'un modèle d'informations contextuelles ouvert auquel on peut accéder par programme de manière standard ;
- Disposer d'un modèle d'informations contextuelles indépendant du domaine d'application ou du secteur professionnel, permettant une interopérabilité entre différents secteurs et / ou différents services d'une même organisation.

Les exemples des différents modèles de données mis en œuvre dans le système de supervision sont présentés en annexe.

2.1.3.2.3. Réseau de mesures et surveillance par caméras

Afin de compléter le réseau de mesure et de surveillance du Système d'Annonce de Crue du bassin versant du Magnan, 3 caméras de vidéosurveillance ont été installées en amont de l'entrée du fleuve (i.e. aqueduc), dans la partie à ciel ouvert (T2.2.3. Rapport sur l'amélioration des équipements technologiques).

Les caméras sont donc utilisées afin de fournir en temps réel des mesures de hauteurs d'eau, de vitesses de surface et de débits. Les principaux bénéfices tirés du dispositif déployé peuvent être listés comme suit :

- Mesure de hauteur sans contact et vérifiable, levé de doute facilité et enrichi par images augmentées permettant de visualiser le niveau d'eau détecté, les seuils dont

le franchissement va déclencher des actions en gestion de crise et des éventuels repères de crues historiques

- Mesure de vitesses de surface et calculs de débits permettant d'améliorer rapidement et efficacement la connaissance des débits de crue dont la mesure est délicate ou impossible même pour les services opérationnels dotés d'hydromètres de terrain avec des systèmes d'astreinte.

2.I.3.2.4. Système auto-ajustable de simulation et prévision

Le bassin versant du fleuve Magnan est de faible taille (moins de 20km²) et les pentes sont relativement importantes. Le temps de réponse peut donc être très rapide en crue et rendre la gestion de crise très délicate. L'anticipation de l'ampleur et du délai d'arrivée des écoulements de crue est donc une problématique majeure.

Pour cela, un modèle hydrologique spatialisé basé sur la description des processus (Figure 10 et Figure 11) et fonctionnant en continu a été adapté sur le bassin. Après calage sur données historiques, il fournit des prévisions à 2h actualisées toutes les 5 minutes à partir de données sur les précipitations (Figure 13).

La mesure et prévision immédiate des précipitations est réalisée à partir des données d'un radar météorologique double polarisation et de la chaîne de traitement ZPHI de la société NOVIMET. L'assimilation en temps réel des mesures hydrométriques et pluviométriques (caméras et stations de mesure existantes du SAC Magnan) permet de corriger les éventuelles dérives et donc d'améliorer les prévisions (Figure 12).

La prévision de débits temps réel est fournie à 5 stations virtuelles reparties sur le bassin versant du Magnan. Elle permet de mieux anticiper l'arrivée et l'évolution des crues (e.g. Figure 14). En pratique de délai d'anticipation effectif dépend de la localisation des précipitations intenses et de la qualité de la prévision de précipitations par advection radar.

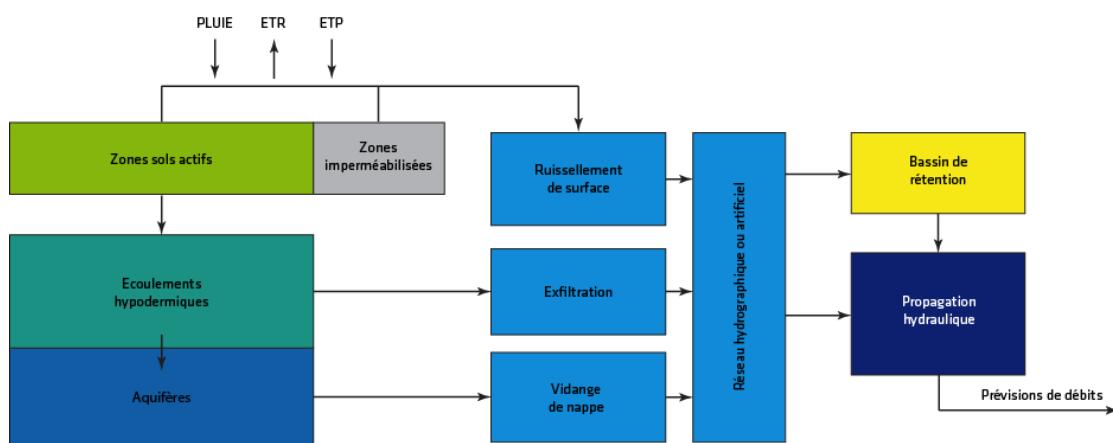


Figure 10: Description des principaux processus et composantes d'écoulements représentées par le modèle hydrologique HydroCore

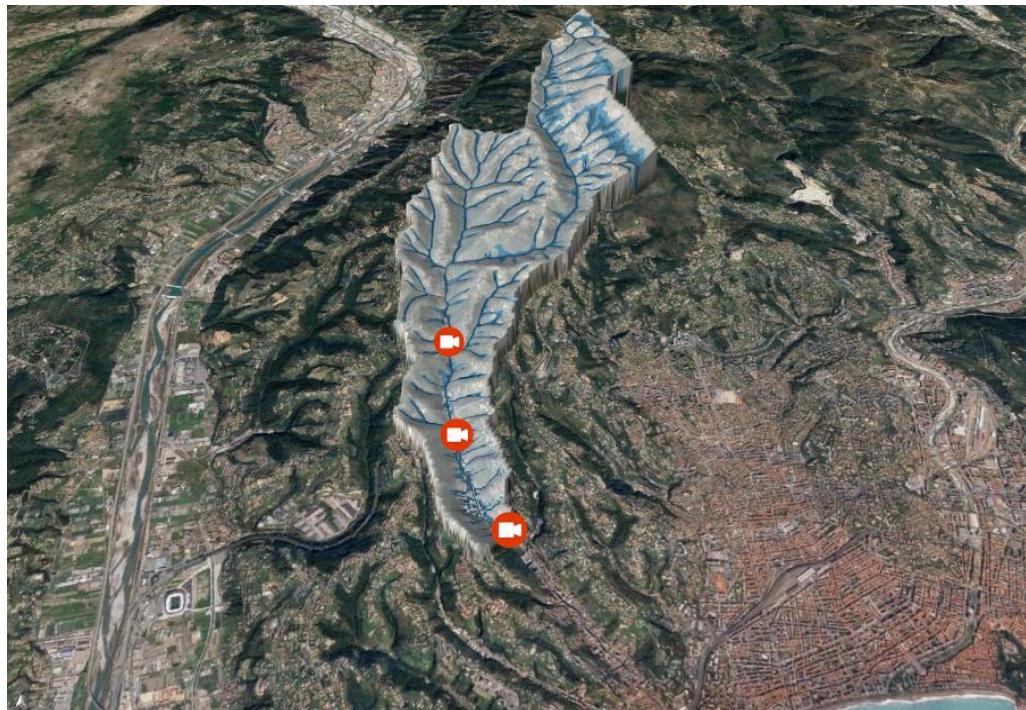


Figure 11: Exemple d'extension de zones saturées (en bleu sur la carte) au cours d'un épisode pluvieux ayant essentiellement touché la partie amont du bassin

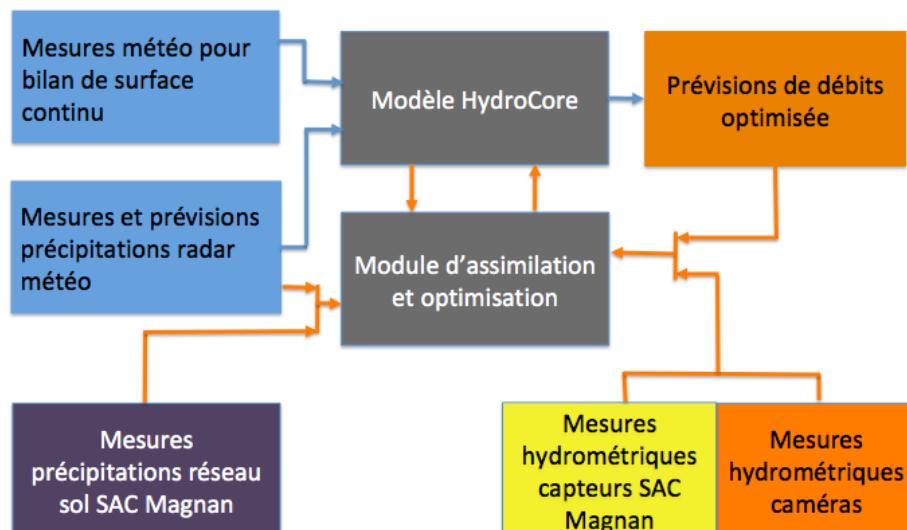


Figure 12: Synoptique de la chaîne de prévision hydrométéorologique fournissant des prévisions de débits avec des capacités d'ajustement des lames d'eau radar et du modèle hydrologique par assimilation de données météorologiques et hydrométriques

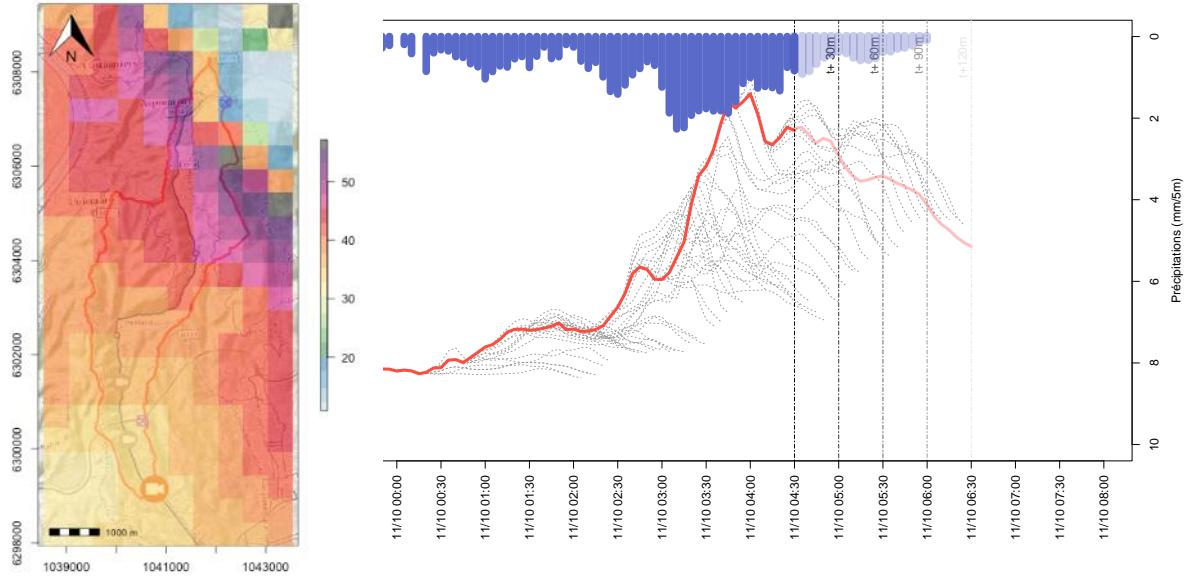


Figure 13: De la mesure et prévision des précipitations par radar météorologique à la prévision de débits rafraîchie toutes les 5 minutes

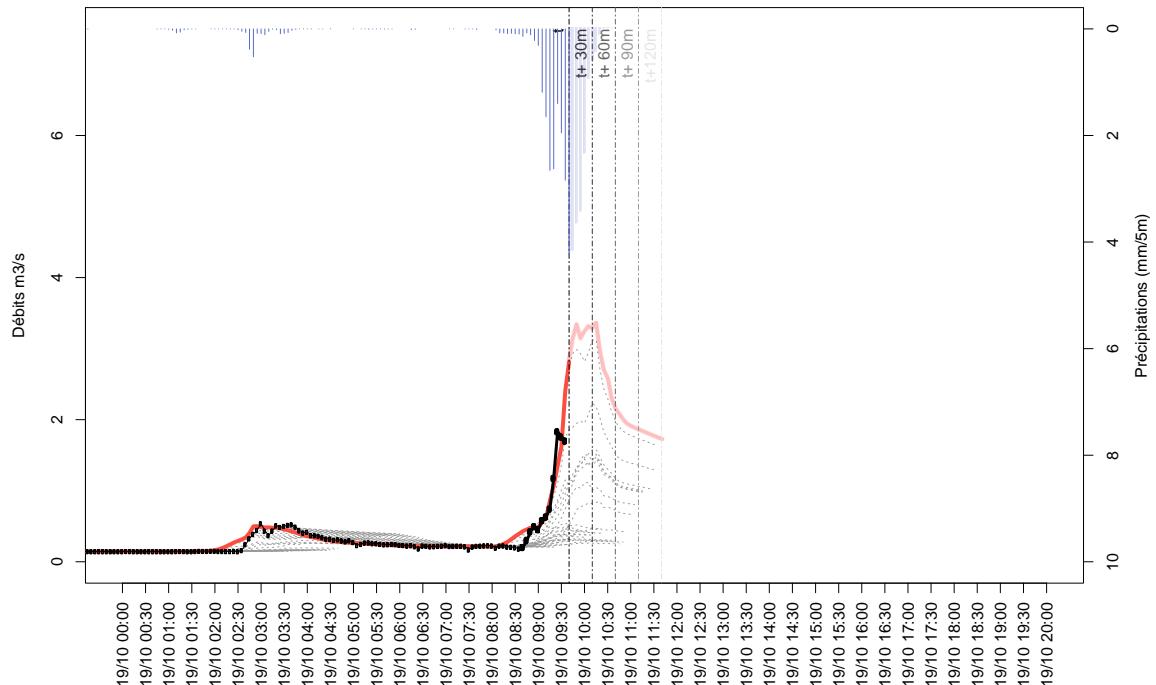


Figure 14 : Exemple d'anticipation d'un pic de crue par la prévision de débits (débits mesurés en noir, des débits prévus en rouge et en gris puis des précipitations mesurées et prévues en bleu)

2.1.3.2.5. Architecture système de supervision (THALES)

Le système de supervision permet l'affichage des différentes données en provenance de plusieurs sources afin de fournir aux opérationnels des informations complètes. Ces informations sont indispensables à la prise de décision en situation de crise.

Le système de supervision affiche les capteurs répartis le long du cours du fleuve Magnan. Les données associées à chaque capteur sont les mesures de débit et de hauteur d'eau, selon les capacités du capteur, et les prévisions de hauteur d'eau et de débit d'eau calculées par le système Tenevia.

Le système de supervision affiche les stations météo principales situées à proximité du bassin du Magnan.

Le système de supervision affiche les mesures de pluies du radar de la société Novimet.

Le système de supervision affiche les emprises des crues par période de retour définies lors d'une étude précédent le projet.

Le système de supervision affiche les bâtiments sensibles appelés aussi enjeux.

Les différentes données affichées sur le système de supervision sont affichées sur la Figure 15.

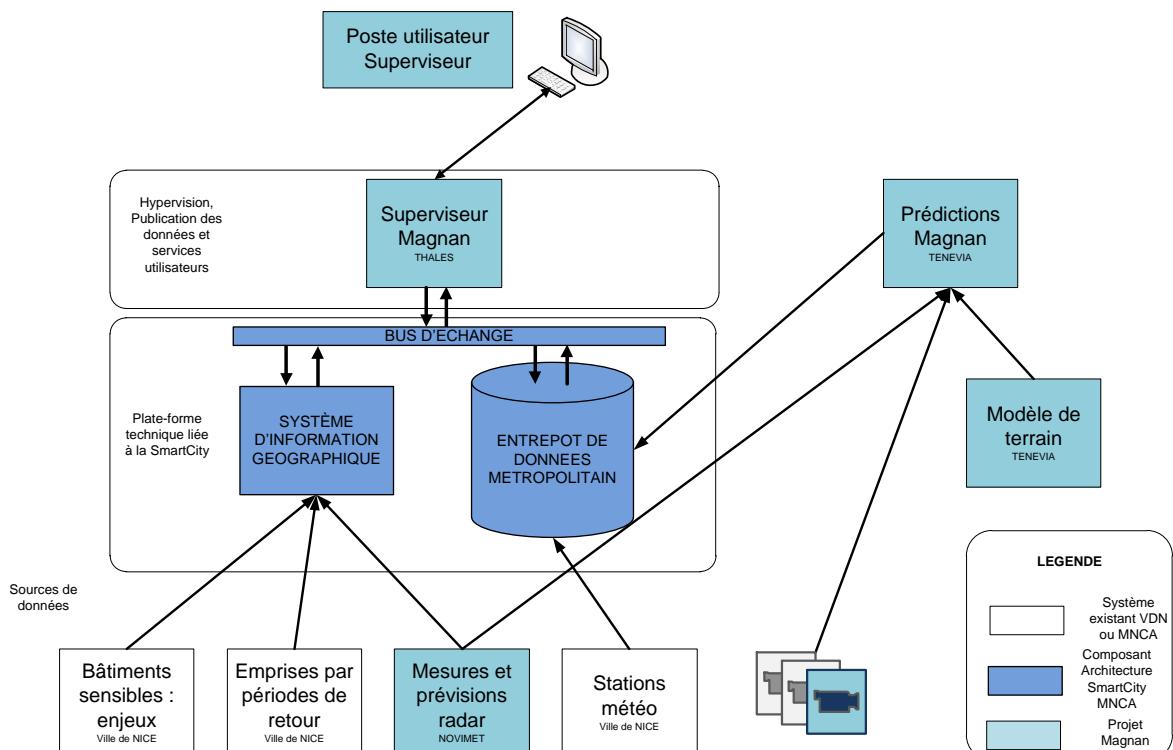


Figure 15 : Architecture système

Le système de supervision du Magnan s'appuie sur l'infrastructure du système d'information de la ville de Nice. En particulier, il s'appuie sur l'entrepôt de données métropolitain et le système d'information géographique. L'entrepôt de données joue un rôle central en stockant les données de mesures et de prévisions en provenance de l'application de prévisions Magnan de Tenevia. Ces données sont alors récupérées par le superviseur qui les affiche et effectue les traitements des alertes vers les opérateurs et les personnes d'astreinte.

Le système de supervision est une application full web. Ce choix permet aux agents de la ville de Nice de pouvoir se connecter au superviseur et de gérer une crue depuis n'importe quel poste de travail connecté sur l'intranet de la ville de Nice. En particulier les personnes d'astreinte peuvent s'y connecter avec un ordinateur portable depuis leur domicile.

2.1.4. Analyse fonctionnelle, suivi, premiers résultats et amélioration de la plateforme en cours d'expérimentation

Au cours de la période d'expérimentation, différents épisodes de crue ont permis d'appréhender le fonctionnement en temps réel des différents composants du système.

2.1.4.1. Analyse hydrométéorologique

L'analyse hydrométéorologique consiste à examiner après l'évènement l'ensemble des mesures et prévisions (météorologiques, hydrologiques et hydrométriques) émises afin d'appréhender les principales caractéristiques de l'épisode ainsi que performances du système d'alerte local.

En fichier attaché les figures pour des épisodes plus récents et plus importants (notamment celui du mois d'octobre étant donné la qualité des images de nuit). les figures mises à jour afin de rendre plus clair la détection automatique de sortie de cunette, ont également été intégrées.

2.1.4.1.1. Retex sur épisode pluvieux

Plusieurs épisodes pluvieux ont permis d'appréhender le fonctionnement du système d'alerte précoce depuis le début de la phase d'expérimentation. Ceux-ci ont permis d'apprécier les performances, limitations et perspectives d'amélioration des services de mesure, de surveillance et de prévisions déployés sur le bassin versant.

Afin d'approfondir cette analyse, des retours d'expérience (RETEX) ont été effectués pour les épisodes les plus importants et intéressants. Ils ont par exemple permis d'appréhender la très forte variabilité spatiale des précipitations et son caractère non systématique (Figure 17). Nous avons également pu constater qu'au delà d'une demi-heure on remarque souvent une diminution notable de la qualité des prévisions de précipitations par advection d'images radar (Figure 16).

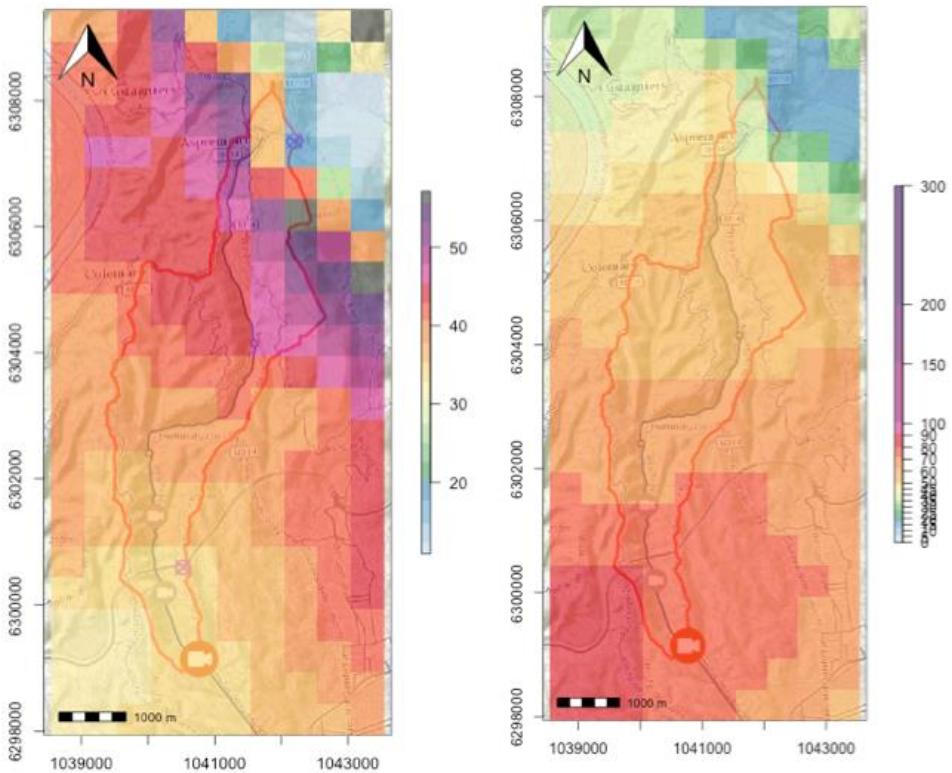


Figure 16 : Cartes des cumuls de précipitations observées sur deux événements (février et novembre 2019)

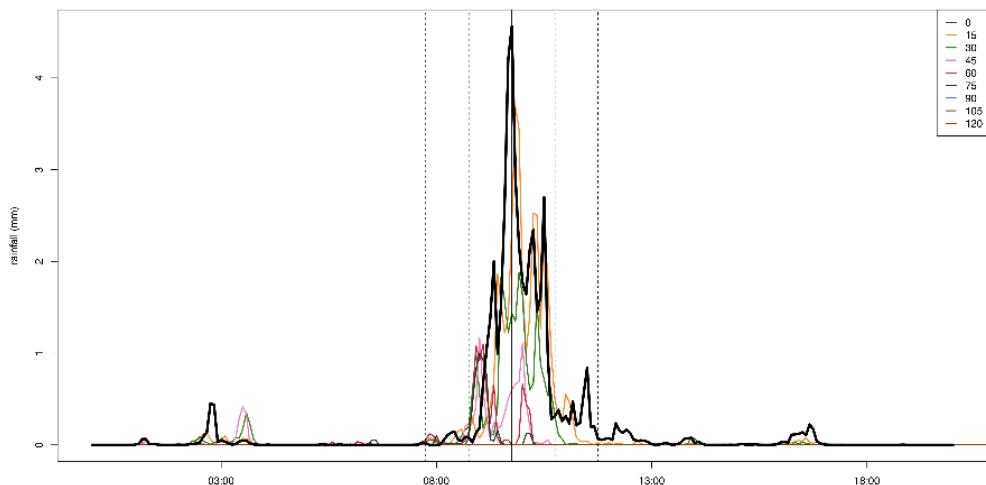


Figure 17 : Performances de la prévision de précipitations par advection d'images radar, la courbe noire correspond aux mesures et les courbes de couleur aux prévisions émises à différentes échéances.

L'analyse des variables hydrométriques mesurées en crue a permis de voir l'influence des facteurs de perturbation de la mesure (mouvements de la caméra, précipitations intenses, ombres et conditions d'éclairage délicates).

Malgré quelques fausses alertes de franchissement de seuils (parfois liées à des problèmes d'entretien de la végétation sur les sites), la robustesse et la précision sont globalement perfectibles mais satisfaisantes (voir Figure 18 pour un exemple de chroniques de mesures).

Alors que les courbes de tarage au droit des capteurs du SAC Magnan étaient jusqu'ici basées sur des estimations théoriques, l'analyse expertisée des mesures a permis l'élaborer des relations hauteur-débits (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**) sur les sites d'installation des caméras.

Pour permettre une évaluation du caractère opérationnel de la plateforme de supervision en situation de crise lors d'un aléa, un retour d'expériences (RETEX) complet et détaillé de l'épisode survenu le 1^{er} décembre 2019 est établi en annexe 2 de ce rapport final, pour étayer les conclusions sur la première phase de développement et d'expérimentation (2017-2020) du dispositif de supervision.

Les performances de la prévision de débit et de la procédure d'auto-ajustement par assimilation de données sont très variables d'un épisode à un autre. La chaîne de prévision hydrométéorologique permet de passer d'une anticipation quasi-nulle à un délai de 30 minutes à 1 heures en fonction des épisodes. Certains des paramètres de la procédure d'auto-ajustement devront vraisemblablement être optimisés afin de trouver un meilleur compromis entre stabilité et efficacité des corrections.

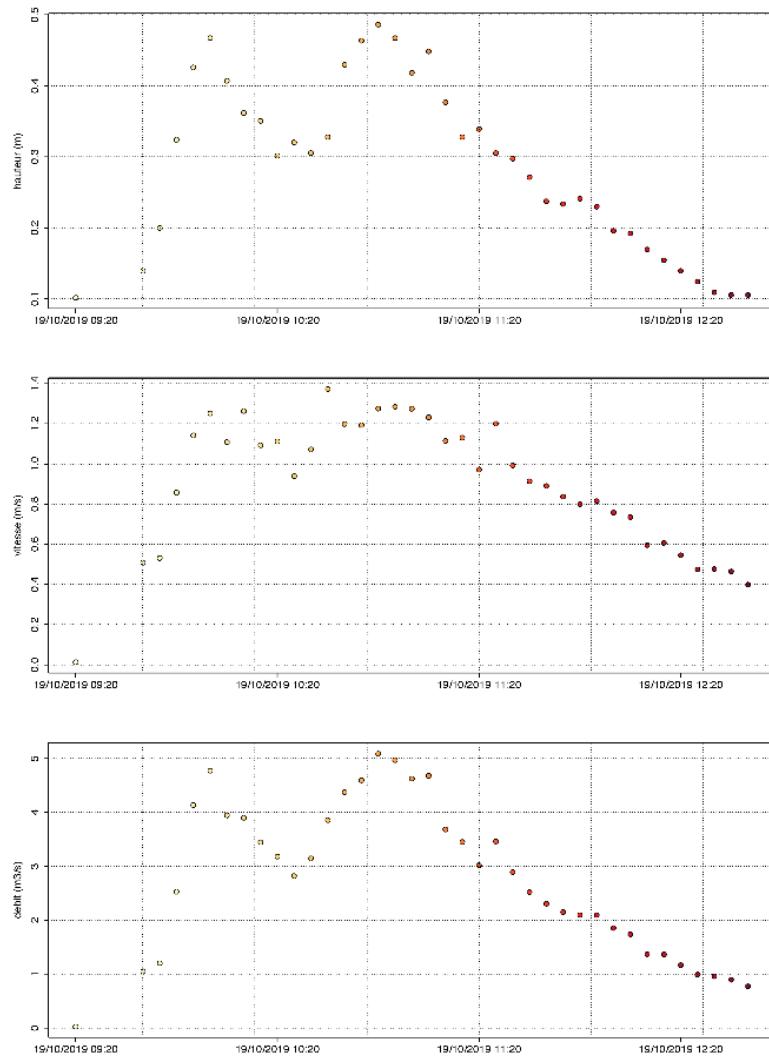


Figure 18: Exemple de chronique de hauteurs, vitesses de surface et débits mesurés au cours d'un épisode de crue sur le site médian

2.1.4.1.2. Améliorations apportées au système hydrométéorologique (détection surface en eau, vitesse, objets flottants)

Afin de compléter le dispositif de surveillance, des développements ont également initiés afin d'enrichir le panel d'informations qu'il est possible d'extraire à partir de l'analyse des images. Ils ont été consacrés à la détection automatique d'incidents importants pour la gestion de crise. La détection de seuils sur les surfaces en eau et la quantification d'objets flottants susceptibles de générer des embâcles ont dans un premiers temps été ciblés.

Des illustrations sont fournies par la Figure 19 et la Figure 20. En l'absence de présence importante de flottants, les développements ont été initiés à partir de banques d'images sur d'autres sites. Certains des épisodes de la fin de l'automne 2019 sur le Magnan viendront enrichir cette banque d'images.



Figure 19 : Détection automatique de seuils sur les surfaces en eau permettant notamment la diffusion d'alertes lorsque l'écoulement sort de la cunette sur le site aval, c'est à dire bien avant que le niveau atteigne le bas de l'échelle utilisée pour la mesure de hauteurs

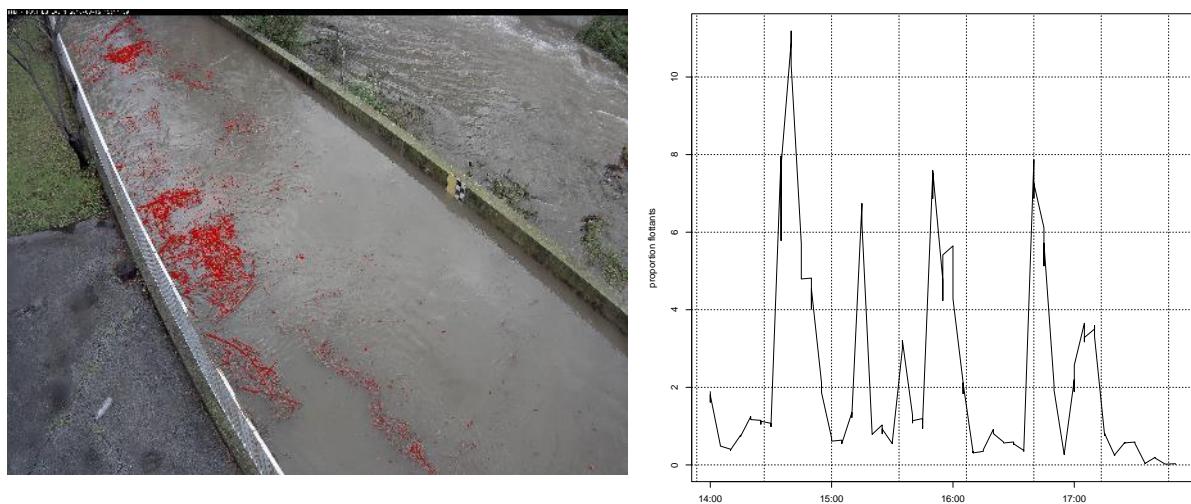


Figure 20: Quantification de la proportion de la surface occupée par des objets flottants susceptibles de générer des embâcles en aval.

2.1.4.2. Utilisation du superviseur

Le système de supervision a été conçu pour être le plus simple possible à utiliser. En effet, en cas de crue grave l'énergie des agents municipaux et métropolitains doit être mobilisée pour venir en aide les citoyens de la ville, sans perdre trop de temps devant une interface informatique.

Le système est conçu pour ne pas nécessiter qu'un opérateur soit en permanence devant l'écran. Une alerte SMS permet d'avertir des agents d'astreinte et de les avertir d'un danger potentiel. Ils ouvrent alors le superviseur afin d'avoir des informations complémentaires.

2.1.4.2.1. Simplicité d'utilisation

L'espace de travail présente les informations principales, le statut général en haut à droite et l'état d'alerte des différentes stations virtuelles sur la carte. Sur la Figure 21, le statut général est Normal, ce qui signifie qu'aucune station virtuelle n'est en alerte. Ceci est confirmé par l'état des stations virtuelles sur la carte.

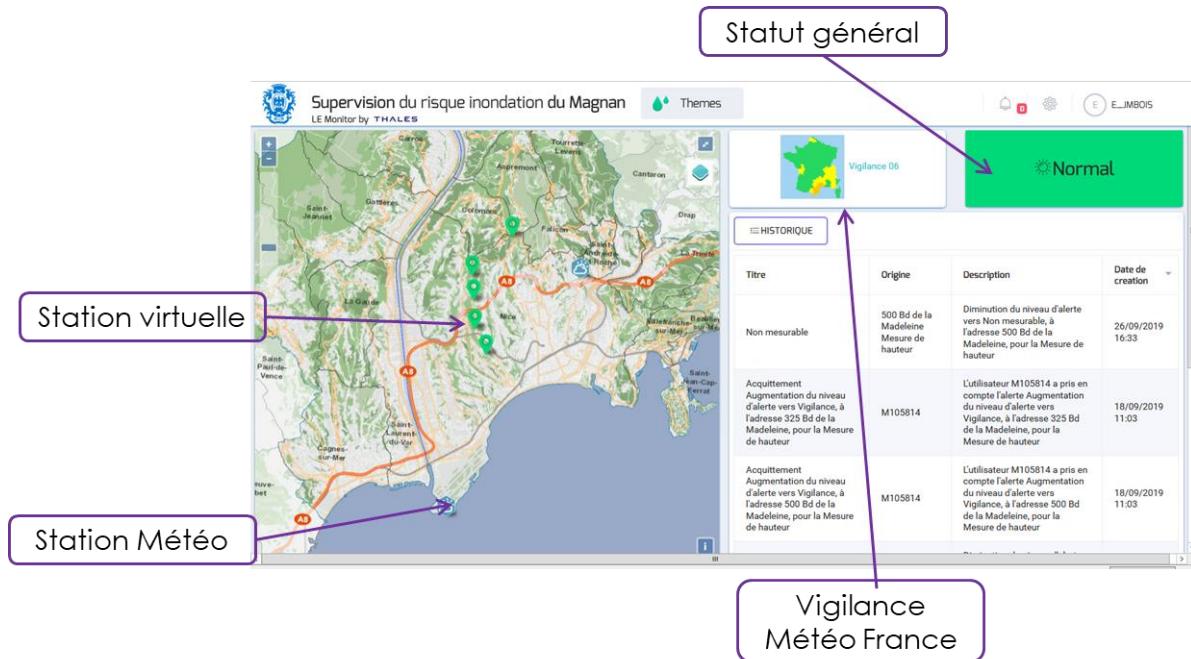


Figure 21 : copie d'écran de l'interface du démonstrateur technologique de supervision

Un clic sur une station virtuelle permet d'afficher ses informations instantanées comme sur la Figure 22 :



Figure 22 : station virtuelle

Les stations virtuelles gérées par le superviseur possèdent les informations suivantes :

Capteur ASPREMONT:

- Prévision de débit dans l'heure qui suit par pas de 5 minutes,

Capteur PONT DU GENIE:

- Prévision de débit entre -1 heure, + 2 heures par pas de 5 minutes,

Capteur FERIC:

- Mesure de hauteur d'eau instantanée,
- Prévision de débit entre -1 heure, + 2 heures par pas de 5 minutes,
- historique des hauteurs d'eau sur 1 heure.

Capteur MADELEINE:

- Mesure de hauteur d'eau instantanée,
- Prévision de débit entre -1 heure, + 2 heures par pas de 5 minutes,
- historique des hauteurs d'eau sur 1 heure.

Capteur AQUEDUC AMONT:

- Mesure de hauteur d'eau instantanée,
- Historique des mesures de débit d'eau entre sur 1 heure,
- Prévision de débit entre -1 heure, + 2 heures par pas de 5 minutes,
- historique des hauteurs d'eau sur 1 heure

Chaque station a trois seuils de déclenchement d'alerte, de normal à vigilance, de vigilance à pré-alerte et de pré-alerte à alerte pour la mesure de hauteur d'eau, la mesure de débit ainsi que pour la prédition de débit.

Chaque station est verte si les mesures et les prévisions restent en dessous de leurs seuils de vigilance.

Si une des mesures ou une des prévisions de débit sur les deux prochaines heures dépasse le seuil de vigilance, alors l'état de la station passe à Vigilance.

De la même manière que pour les stations, un clic sur l'icône d'une station météo permet d'afficher ses données comme sur la Figure 23

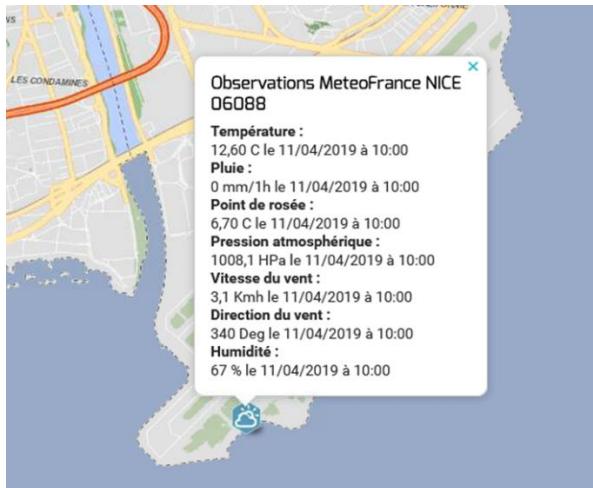


Figure 23 : illustration des informations accessibles, via l'interface, pour la station météo de l'aéroport.

Quand une mesure ou une prévision dépasse un seuil, une alarme est affichée sur le superviseur. Si une alerte SMS a été programmée sur ce seuil, un SMS est envoyé à la liste de diffusion associée.

L'alarme est affichée en bas à droite de l'espace de travail, comme sur la Figure 24. Le statut général est au niveau d'alerte le plus important des capteurs.

Niveau d'alerte maximum des stations

Pré-alerte

Historique

Titre	Type	Auteur	Description	Date de création
Pré-Alerte	Mesure Crue	Aspremont	Pré-Alerte Aspremont	11/02/2019 17:48:19
Acquittement Vigilance Aspremont	Acquittement	David GODARD	L'utilisateur David GODARD a pris en compte l'alerte : Vigilance Aspremont	11/02/2019 17:48:17
Vigilance	Mesure Crue	Aspremont	Vigilance Aspremont	11/02/2019 17:48:05
Vigilance	Prévision Crue	Magnan	Duis bibendum. Morbi non quam nec dui luctus rutrum.	06/03/2018 13:00:27
Vigilance	Mesure Crue	Saint Pierre de Ferri	Sed sagittis. Nam congue, risus semper porta volutpat, quam pede lobortis ligula, sit amet eleifend pede libero quis orci. Nullam molestie nibh in lectus.	03/03/2018 16:56:27
Vigilance	Prévision Crue	Point du Genie	Morbi odio odio, elementum eu, interdum eu, tincidunt in, leo.	13/02/2018 16:20:18

Pré-Alerte pré-Alerte Aspremont

Alarme

Figure 24 : Illustration de l'affichage des alertes départementales de Météo France, sur la plateforme numérique du démonstrateur technologique de supervision du risque inondation

La cartographie et ses différentes fonctions/couches d'affichage, permet, selon la sélection choisie, d'afficher des informations qui aident les agents de la ville dans le choix des interventions comme les emprises par période de retour, cf. Figure 25.



Figure 25 : Affichage de l'emprise de la crue centennale

2.1.4.2.2. Ajout de l'alerte SMS

Afin de rendre le système plus à même de permettre une réaction rapide en cas de crue flash, un mécanisme d'alerte par SMS à une liste de personnes d'astreinte a été mis en œuvre.

Cette alerte SMS est transmise en cas de dépassement de seuil de prévision de hauteur d'eau ou de débit et de dépassement de seuil de mesure de hauteur d'eau ou de débit.

Un utilisateur peut choisir les seuils qui déclencheront une alerte SMS.

Il peut préparer plusieurs listes de numéros de téléphones différentes qui recevront des alertes à des niveaux de dépassement de seuil différents.

2.1.5. Bilan final, conclusions et perspectives d'évolution du démonstrateur technologique de supervision du risque inondation

Le développement de 2017 à 2019, suivi de la première phase d'expérimentation de janvier 2019 à janvier 2020 du démonstrateur technologique de supervision du risque inondation, ont permis de tester l'ébauche d'un superviseur dont la portée opérationnelle immédiate a pu être vérifiée et qui pourrait encore être élargie pour une plus grande anticipation des aléas et un renforcement de l'aide à la décision. Cette première phase expérimentale a en effet permis de répondre à plusieurs besoins opérationnels en période de gestion de crise. De plus, l'expérimentation a également permis de faire évoluer le démonstrateur au fur et à mesure des besoins identifiés, par l'apport de nouvelles sources de données et le développement de nouvelles fonctionnalités (détection d'objets flottants, détection de la vitesse et de la surface en eau). Par ailleurs, les derniers tests effectués lors de la gestion des

intempéries d'octobre à décembre 2019, ont fait émerger l'intérêt de développer d'autres fonctionnalités utiles et indispensables pour supervision complète plus dynamique des différents aléas d'inondation et des mesures d'anticipation et de gestion à mettre en œuvre pour chaque scénario.

Conclusions techniques de la première phase expérimentale

- La mesure de hauteur sans contact et le levé de doute à distance par consultation des images des caméras intelligentes permet de compléter le réseau de surveillance au sol utilisé pour la gestion de crise.
- Les mesures de vitesses de surface et les calculs de débit fournis par les caméras intelligentes permettent de grandement améliorer la connaissance des débits de crue. La mesure des débits avec les moyens traditionnels (jaugeages perche ou ADCP) est une pratique souvent dangereuse voir impossible au cours des crues significatives. De plus la métropole ne dispose pas de service hydrométrique d'atteinte mobilisable sur le terrain en 24/7 afin de tenter d'effectuer des mesures en crue. La connaissance des débits de crue sur le Magnan était jusqu'ici « théorique » (calculée par modélisation hydraulique). Elle est cependant fondamentale afin de dimensionner des ouvrages de protection et caler des modèles capables d'anticiper ou de reproduire les aléas.
- Le traitement embarqué sur caméra afin de réduire la bande passante utilisée et augmenter la fréquence des mesures pourra être envisagé. Il sera également pour cela nécessaire d'adapter les modalités d'insertion des mesures dans l'entrepôt de données.
- Le développement d'algorithmes de détection automatique d'incidents permettant d'appréhender un débordement de la cunette et la présence de flottants susceptible de générer des embâcles a été initié. La fiabilité et robustesse de ceux-ci devra être améliorée à partir de la banque d'images comportant de plus de plus d'évènements significatifs sur le bassin du Magnan
- L'entretien de la végétation au droit des sections de mesures sera une composante essentielle de la maintenance et de l'exploitation des mesures fournies par les caméras intelligentes. Les modifications morphologiques du lit étant fréquentes et significatives, des procédures de mise à jour de la calibration initiale devront être élaborées et le contenu informatif des images afin de caractériser le transport sédimentaire étudié.
- Un modèle hydrologique spatialisé fonctionnant de manière continue et en temps réel a été mis en place. Son fonctionnement continu (i.e. même en dehors de période de crue) permet de s'affranchir de problèmes d'initialisation de l'état hydrique des sols en début d'évènement.
- Le modèle exploite la meilleure source d'information pluviométrique disponible en temps réel sur le bassin : la lame d'eau mesurée et prévue à brève échéance par radar double

polarisation installé au Mont Vial. Il valorise également l'ensemble des mesures fournies en temps réel par le réseau du SAC Magnan (capteurs hydrométriques et pluviométriques traditionnels et caméras intelligentes) afin d'ajuster en temps réel les prévisions à partir de la fusion de ces différentes sources d'information

- Le délai d'anticipation des crues était très faible étant donné le temps de réponse du bassin versant et les projections sur la transformation des pluies en débit très empiriques et incertaines. La mise en place de prévisions hydrologiques actualisées toutes les 5 minutes avec un horizon de prévision de 2h permet d'appuyer la gestion de crise. Au cours des épisodes rencontrés au cours de phase d'expérimentation, le délai d'anticipation effectif exploitable varie entre 30 minutes et 1h15 en fonction de la variabilité spatiale des précipitations et de la qualité des prévisions de précipitations immédiates.
- Le dispositif pourra être complété par l'utilisation des prévisions de précipitations par modélisation météorologique afin de décliner à l'échelle du bassin la vigilance départementale avec une caractérisation des incertitudes (prévision d'ensemble AROME-PE). Les « produits météo » issus des dernières avancées sur la prévision immédiate de précipitations (e.g. prévision immédiate et prévision immédiate agrégée fusionnée - AROME-PI & PIAF) pourront également être intégrées à la chaîne de prévision météorologique
- Les développements informatiques effectués permettent l'intégration en temps réel des mesures et les prévisions à l'entrepôt de données de la métropole. La mise à disposition d'images augmentées (intégration des seuils, une échelle limnimétrique graduée visible en toutes circonstances et du niveau détecté sur les images) bientôt effective pour les services de mesure et surveillance hydrométrique pourra être étendue à la détection automatique d'incidents
- L'ensemble du système pourra ainsi être amélioré de façon continue et éventuellement être mis en place sur d'autres bassins versants du territoire de la métropole

2.2. Système de surveillance basé sur des observations radar pluviométriques et une modélisation hydrologique mis à disposition via une interface appropriée (Département du Var)

Toujours dans l'esprit de perfectionner son système d'annonce de crue, la CAVEM a fait réaliser une modélisation hydraulique des bassins versants de la Garonne, du Pédégal et du Valescure. L'objectif est ici de :

- modéliser le fonctionnement hydraulique des cours d'eau et de caractériser les tronçons homogènes,
- proposer des seuils de vigilance au droit des stations de mesures adaptés aux tronçons et aux points de premiers débordement.

Ce travail a permis à la CAVEM de fixer plus précisément des seuils de préalerte et d'alerte dans ses stations de mesures. Chaque seuil correspond à une hauteur d'eau qui une fois atteinte génère une alarme et est suivi d'une action opérationnelle de la part de la CAVEM (soit sur son ouvrage soit en termes de communication de l'information à la commune).

L'étude a également permis de définir des secteurs où de nouvelles stations de mesures devraient être installées afin d'améliorer l'anticipation de débordements.

3. Produits préparatoires ou propédéutiques pour la surveillance des événements hydrologiques

3.1. Révision des zones d'alerte pour risque hydraulique (région Sardaigne)

3.1.1. Synthèse des activités pour la révision des zones de vigilance

Les activités visant à la "Révision des zones de vigilance et des seuils pluviométriques correspondants sur tout le territoire de la Région Sardaigne" ont été menées dans le cadre d'un accord de collaboration (prot. n.1300 rep.n°45 du 30 novembre 2017) stipulé, en vertu de l'art. 15 loi du 7 août 1990, n.241, entre la Direction Générale de la Protection Civile de la Région Autonome de la Sardaigne – Service prévision des risques et des systèmes informatiques, infrastructures et réseaux et le Département d'ingénierie Civile, Environnementale et Architecture (DICAAR) de l'Université de Cagliari.

La subdivision actuelle du territoire régional en sept zones homogènes de vigilance, entrée en vigueur avec la délibération du Conseil régional n.53/25 du 29/12/2014, a mis en évidence plusieurs éléments de risque problématiques, qui se sont concrétisés par de fausses alertes ou des alertes manquées au cours du temps.

Une problématique de risque dans les zones de vigilance actuelles est étroitement liée à leurs dimensions parfois excessives qui rendent très difficile d'effectuer des prévisions adéquates tant pour les aspects météorologiques que pour les effets qui s'en suivent au sol. En effet, à cause de leur grande extension spatiale, les zones de vigilance actuelles sont souvent caractérisées par une homogénéité morphologique, météoclimatique, hydraulique et hydrologique. Notamment, en ce qui concerne le risque hydraulique et hydrologique, où l'élément fondamental d'homogénéité est le bassin hydrographique, il a été relevé que dans les zones de vigilance actuelles un décalage marqué entre les limites du bassin et celles des zones de vigilance actuelles est présent, comme on peut observer sur la Figure 1.

zones de vigilance actuelles est présent, comme on peut observer sur la Figure 1 **Figure 1**.

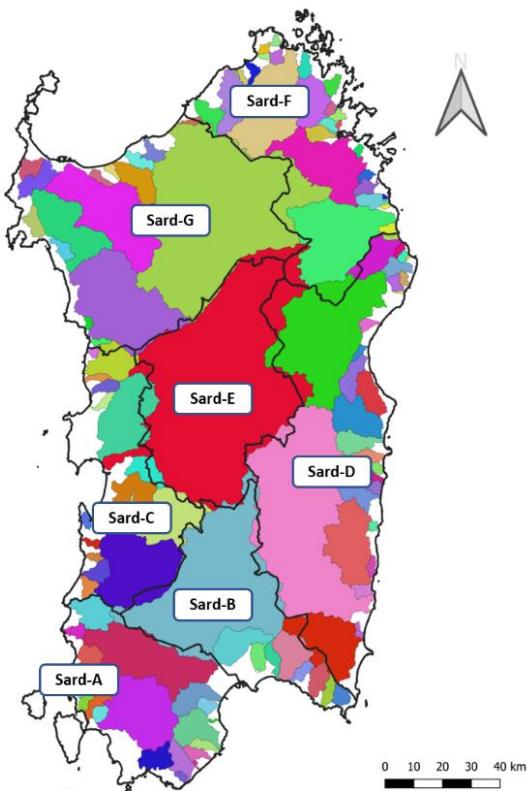


Figure 1: Bassins fermés aux embouchures (colorés) et zones de vigilance actuelles (trait noir).

Il apparaît à partir de cette image que certains bassins sont découpés de manière à faire coïncider la limite communale avec celle de la zone de vigilance, comme dans le cas du bassin du Tirso ou comme pour une partie du Cedrino. Il est possible en outre de remarquer une agrégation problématique de bassins ayant des caractéristiques météoclimatiques différentes, comme dans le cas des bassins de la zone de Capoterra agrégés au bassin de rio Palmas ou du bassin de Posada agrégé aux bassins de la Gallura.

Le cas de la zone A actuelle est particulièrement éclatant parce qu'elle comprend des bassins sujets à des régimes pluviométriques fortement différents et qui d'un point de vue hydraulique répondent de manière différente aux précipitations. Dans les dernières années, la zone de Capoterra a été sujette à de nombreux épisodes de crue, lesquels par contre n'ont pas intéressé la Sulcis, ce qui peut conduire en phase de vigilance à des situations possibles de fausse alerte pour certaines zones ou, situation encore plus grave, à des alertes manquées pour d'autres zones.

Certains de ces problèmes se sont manifestés aux phases opérationnelles du CFD qui a estimé nécessaire une révision des zones de vigilance selon des critères qui seraient davantage représentatifs des phénomènes physiques, de manière à assurer une protection du territoire majeure et plus efficace.

Le travail effectué par le DICAAR et par le Service de Prévision des risques et des systèmes informatiques, infrastructures et réseaux a conduit à la formulation d'une première proposition préliminaire, remise avec le rapport conclusif sur les activités liées aux objectifs a) et b) de la convention (Décembre 2018) qui prévoit la subdivision du territoire régional en 21 zones de vigilance.

Aux fins du périmétrage des nouvelles zones de vigilance, on a tenu compte notamment des critères établis par le CINID pour la zone pilote du Flumendosa et illustrés dans le rapport intitulé: Rapport final: Résultats des travaux effectués et ligne directrice avec critères méthodologiques pour la délimitation des zones de vigilance et la détermination des seuils pluviométriques pour la Région Sardaigne.

Les critères proposés sont énumérés comme suit:

- Limites hydrographiques des bassins
- Morphologie du territoire
- Régime pluviométrique
- Présence de réservoirs ou d'ouvrages hydrauliques importants
- Limites des zones de vigilance météorologique
- Limites administratives
- Localisation des zones les plus exposées au danger hydraulique et au risque hydrogéologique
- Nombre et typologie des épisodes intenses survenus dans le passé et effets relatifs

Dans l'étude, 21 zones de vigilance possibles ont été envisagées et chacune d'elles est caractérisée pluviométriquement avec référence à des pluies tant ponctuelles qu'aréales, en considérant l'extension de chaque zone.

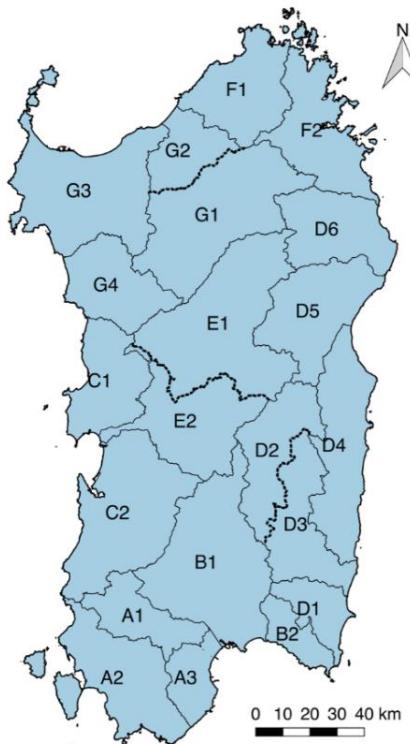


Figure 2: Première proposition préliminaire (objectifs a et b) de périmétration dans 21 zones de vigilance

En ce qui concerne la caractérisation morphométrique, on a procédé à la construction d'une base de données géographique des bassins, des sous-bassins et des troncs principaux des cours d'eau de la région, tous adéquatement codifiés. On a calculé les paramètres géomorphologiques des bassins totaux et des sous-bassins et calculé la valeur du CN moyen pour caractériser la capacité d'infiltration des bassins.

Les activités successives finalisées à la poursuite des objectifs c) et d) de l'accord de collaboration ont été caractérisées par une interaction constante entre les fonctionnaires du CFD, du secteur météorologique de l'ARPAS et le personnel du DICAR, en pouvant mettre ainsi en lumière différentes critiques qu'on ne retrouve pas directement en analysant le problème seulement du point de vue hydrologique.

En particulier, les fonctionnaires du CFD ont mis en évidence des problématiques quant à l'émission et à la gestion des alertes pour un nombre élevé de zones de vigilance, tandis que l'ARPAS a suggéré de réviser certaines frontières météoclimatiques et, simultanément, a revu la configuration et le nombre des zones de vigilance météorologique.

Suite à de nombreux débats et après un long processus itératif auquel ont pris part les différentes parties intéressées, on est parvenu à une nouvelle proposition qui subdivise le

territoire en 11 zones d'alerte et 8 zones de vigilance météorologiques. Dans cette nouvelle configuration chaque zone de vigilance météorologique coincide parfaitement avec une ou plusieurs zones d'alerte. Ceci permet de pouvoir utiliser les prévisions quantitatives de pluie directement sur les zones de vigilance et donc de pouvoir gérer les émissions avec une rapidité opérationnelle et réduire au minimum les incertitudes.

Les zones identifiées à cette première phase de nouvelle périmétration sont montrées en Figure3, Figure 3, où il est possible d'observer comment les zones de vigilance (ligne bleue) ont des périmètres coïncidant avec les périmètres des bassins hydrographiques (éléments colorés), en considérant aussi les digues comme points terminaux de ces derniers. Ceci se produit dans la mesure où les limites des bassins hydrographiques, outre les indications du secteur météorologique, ont été les critères fondamentaux qui ont guidé la première phase de regroupement et de redéfinition des zones de vigilance.

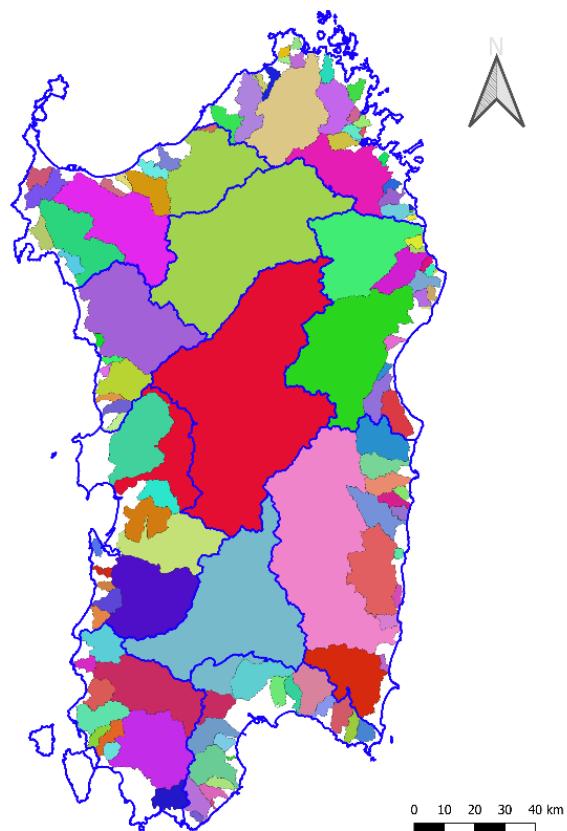


Figure 3 Redéfinition des 11 zones de vigilance sur la base des limites hydrographiques: zones d'alerte (lignes bleues) et bassins hydrographiques (polygones colorés).

Dans une deuxième phase de détail, on a cherché, lorsque cela était possible, d'adapter les limites des zones de vigilance aux limites administratives communales, de manière à éviter que les communes aient de petites portions de territoires se trouvant dans plusieurs zones de vigilance. Ainsi, dans ces cas, la limite des zones de vigilance n'est plus donnée par la limite hydrographique mais par la limite communale.

Toutefois, cette opération n'a pas toujours été possible. En effet dans beaucoup de cas la limite hydrographique coupait le territoire communal en le divisant en parties d'une extension comparable entre elles ou passait carrément par le centre habité. Dans ces cas, on a choisi de ne pas adapter les limites de la zone de vigilance aux frontières communales, en privilégiant par conséquent l'aspect hydrologique et hydraulique pour la définition des zones de vigilance.

Les nouvelles zones de vigilance sont identifiées par un code alphanumérique proposé ci-après:

- Zone A: Sulcis
- Zone B1: Cagliari
- Zone B2: Campidano
- Zone C: Oristano
- Zone D1: Ogliastro
- Zone D2: Cedrino-Posada
- Zone E: Tirso
- Zone F: Gallura
- Zone G1: Bosa
- Zone G2: Logudoro
- Zone G3: Sassari

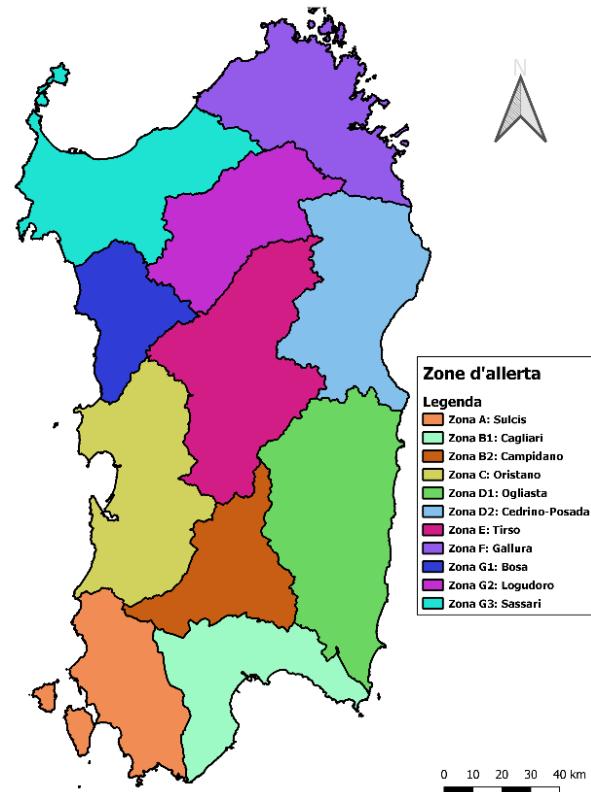


Figure 4: Résultat de la deuxième phase de périmétration. Version finale des zones de vigilance.

3.1.2. Caractérisation pluviométrique des zones de vigilance

Après avoir complété la périmétration définitive des 11 zones de vigilance, on a procédé à la définition des seuils pluviométriques correspondants.

Étant donné la variabilité spatiale, deux types de seuils ont été calculés: ponctuels et aréals. Les premiers trouvent leur utilité dans le cas de phénomènes météoriques localisés, les deuxièmes dans le cas de phénomènes intéressant toute la zone de vigilance ou une grande partie de celle-ci.

La détermination des valeurs de seuil requiert la description probabilistique des précipitations. Dans ce cas on se réfère à des courbes de possibilités pluviométriques obtenues dans le cadre du projet Élaboration de la banque de données pluviométrique de la Direction Générale de l'Agence Régionale du District Hydrographique de la Sardaigne, finalisé à leur mise à jour pour tout le territoire régional (Deidda 2016).

Cette étude a permis de déterminer, pour des durées différentes et pour des temps de retour différents, les valeurs de seuil ponctuel et aréal. En particulier, on s'est référé pour le calcul à des temps de retour égaux à 2, 5, et 10 ans, tandis que pour les durées on a envisagé des durées égales à 1, 3, 6, 9, 12, 18, et 24 heures, en suivant ainsi les lignes directrices établies dans le rapport conclusif de l'accord Protection Civile-CINID.

3.1.3. Définition de l'état d'humidité du sol

Comme indicateur du degré de saturation du sol, l'étude prévoit d'utiliser, dans la ligne de ce qui est proposé par le Soil Conservation Service, deux différentes valeurs comme indicateurs du degré d'imbibition du sol: l'une pour la saison de repos (automne/hiver) et l'autre pour la saison de croissance (printemps/été). Pour la saison de repos, qui va d'octobre à mars, il a été proposé d'utiliser 30 mm évalués dans les 5 jours précédents, alors que pour la saison de croissance, qui va d'avril à septembre, il a été proposé d'utiliser 50 mm évalués dans les 5 jours précédents.

Tableau 1 Définition des classes d'humidité du sol en fonction de la pluie précédente.

Classe AMC	Précipitation totale dans les 5 jours précédents	
	Saison de repos	Saison de croissance
I	< 12,7	< 35,5
II	12,7 ÷ 28	35,5 ÷ 53,5
III	> 28	> 53,5

3.1.4. Définition des seuils pluviométriques inverses

Le système actuel de vigilance régionale est basé sur l'émanation d'alertes qui ont pour origine des valeurs de précipitation (prévues au moyen du QPF) dont les effets à terre n'ont pas été estimés directement mais sont corrélés au temps de retour de la précipitation même. Une telle méthodologie présente des limites liées à l'absence de considération pour les caractéristiques hydrauliques du réseau hydrographique et sur la zone en question. Par exemple, il peut arriver que des épisodes météorologiques peu significatifs en termes absolus (valeur basse du QPF et du temps de retour relatif), puissent créer des situations critiques dans des tronçons fluviaux particuliers ayant des insuffisances hydrauliques.

La méthode des seuils pluviométriques inverses recherche la précipitation capable de déclencher des phénomènes de débordement dans un ou plusieurs tronçons fluviaux du bassin examiné. Aux fins de la définition des seuils pour le risque hydraulique, cette méthode est nettement préférable à la méthode traditionnelle basée sur l'analyse des quantiles de précipitation dans la mesure où elle permet d'accoupler le risque hydraulique et la situation hydrogéologique du champ de pluie. En revanche, pour les seuils pluviométriques directs, elle requiert la connaissance ponctuelle de la géométrie et de la rugosité du lit et des risques présents dans tout le réseau hydrographique.

La procédure de détermination des seuils pluviométriques inverses, en accord avec le Service de prévision des risques et des systèmes d'information, infrastructures et réseaux, a été appliquée à deux tronçons : l'un localisé dans le bassin de Fluminimannu et l'autre dans le bassin du Temo. Une telle application a permis de déterminer les précipitations qui donnent origine au débit critique $2390 \text{ m}^3/\text{s}$ dans le tronçon considéré du Fluminimannu et au débit critique de $971 \text{ m}^3/\text{s}$ dans le tronçon considéré du Temo.

À titre d'exemple, on reporte le résultat graphique obtenu (Figure 5) pour le tronçon critique du Fluminimannu indiqué comme ID2. Pour rendre plus simple la lecture du graphique on a inséré le débit critique, lequel dans le plan hauteurs de pluie-débits est décrit par une ligne droite horizontale (ligne droite horizontale noire).

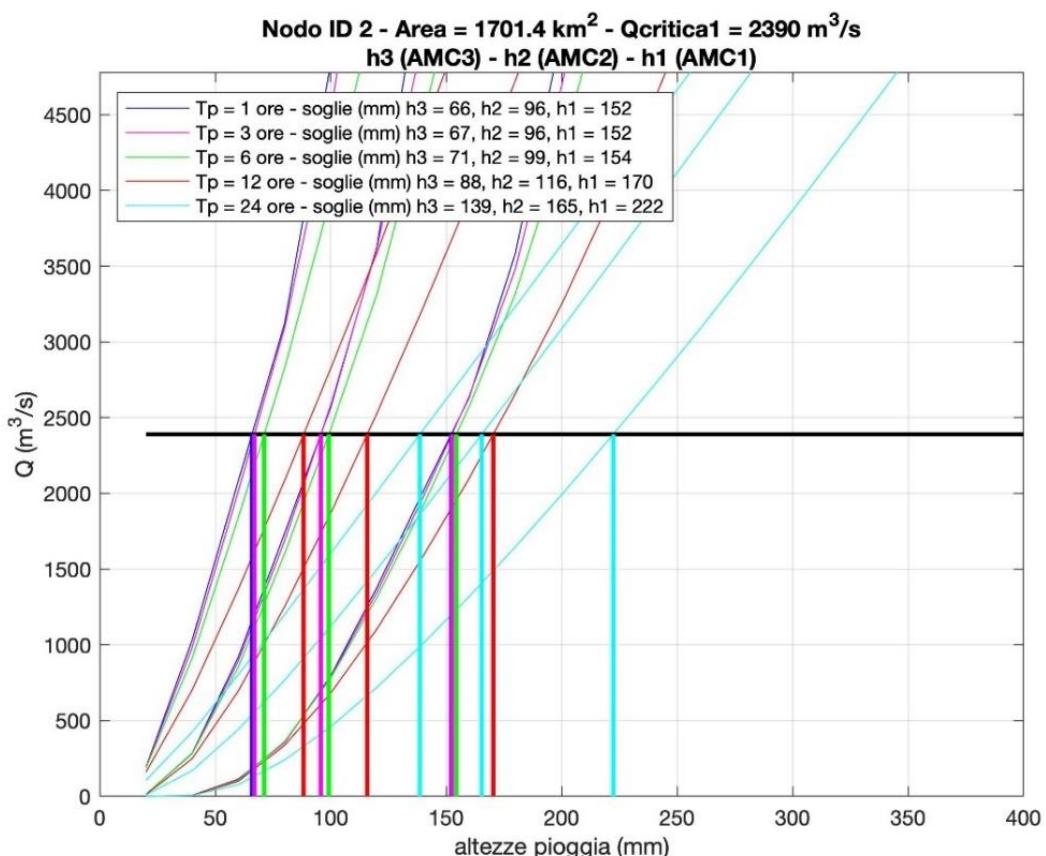


Figure 5 Courbes hauteurs de pluie-débit . Détermination seuils pluviométriques inverses s

3.1.5. Mise en route de la phase expérimentation

La phase d'expérimentation des nouvelles zones de vigilance liées à la définition contemporaine des nouvelles zones de vigilance météorologique établies par le Département météo-climatique de l'Arpas au cours de l'élaboration du projet est actuellement en cours.

4. Outils et études d'analyse ou de caractérisation météohydrologique de support en temps différé

4.1 Réalisation des modèles hydrologiques pour la gestion des barrages et analyse des indicateurs d'altération hydrologique.

4.1.1 Avertissement

L'activité s'applique à utiliser la modélisation hydrologique distribuée comme outil de support aux différentes activités liées au cycle des eaux sur le territoire. L'impossibilité d'installer et d'avoir à disposition un réseau de d'outils de mesure des niveaux hydrométriques qui puisse couvrir chaque sous-bassin et chaque unité hydrologique est évidente. D'habitude les outils de mesure sont installés à des points stratégiques en cherchant à trouver un compromis entre l'identification d'une section utile et le choix d'une section adaptée à l'installation d'un dispositif de mensuration n'est pas toujours simple à obtenir, car les points où pouvoir installer un hydromètre doivent avoir des caractéristiques données qui ne sont pas faciles à obtenir, quant à l'accessibilité du lieu, la typologie de la section hydraulique, tronçon de la rivière en amont et en aval de l'instrument.

L'utilisation de modèles hydrogéologiques introduit certainement des éléments d'incertitude mais permet de suppléer au manque d'instruments et permet de faire des évaluations de type capillaire, réparties sur beaucoup de points du bassin.

Dans le travail présent on a procédé à l'utilisation d'une modélisation continue et distribuée, en ayant soin d'être synergiques et cohérents avec d'autres projets d'activité menés par la Région Ligurie et l'ARPAL. Notamment, on a fait en sorte que le type de modélisation utilisé soit similaire ou compatible avec ce qui est déjà en usage, afin de pouvoir rendre les résultats utilisables autant que possible pour différents buts.

4.1.2 Bassin du Trebbia, encadrement général.

La zone échantillon considérée est le bassin du Trebbia qui se clôt à la frontière entre les Régions Ligurie et Émilie Romagne.

Le Trebbia prend sa source au mont S. Lazzaro dans l'Apennin Ligure et confluence dans le Po, un peu à l'ouest de Piacenza, après un parcours d'environ 116 km. Le long de la ligne de partage des eaux au sud on a les monts Penna (1.735 m s.m.) et Maggiorasca (1.799 m s.m.), à l'est le mont Cavalmurone (1.670 m s.m.) et à l'ouest le mont Crociglia (1.578 m s.m.). Il reçoit de nombreux affluents dont le plus important est le torrent Aveto sur le territoire émilien, d'une longueur d'environ 30 km, avec une contribution hydrique élevée à cause de la grande pluviosité sur son bassin, d'une superficie d'environ 257 km². Le Trebbia a une superficie d'environ 170 km² à la frontière régionale.

Le tronçon ligure est constamment encaissé, profondément entaillé dans le substrat rocheux, avec une morphologie caractérisée par des méandres dans la roche très irréguliers, généralement avec des courbures très élevées, en lente évolution.

Le régime pluvial est caractérisé par une pluviosité élevée seulement dans les zones proches de la ligne de faîte, due à l'intensité particulière des fronts, lesquels pour des raisons orographiques et à cause de la proximité de la mer de Ligurie tendent à amplifier leur action; dans la partie collinaire et dans la plaine la pluviosité est par contre modeste. Des épisodes météoriques intenses sont possibles dans toutes les saisons même si la période comprise entre septembre et novembre présente la plus grande incidence d'épisodes importuns.

Les caractéristiques morphologiques et lithologiques du bassin, la forme, l'escarpement moyen des versants, impliquent des temps réduits d'afflouage, avec formation rapide de crues et valeurs élevées des débits au pic de la crue. Dans le bassin hydrographique les précipitations moyennes varient entre 800 mm/an et plus de 2.000 mm/an.

4.1.3 Le modèle hydrologique

Le modèle hydrologique Continuum est un modèle complet, continu et distribué: c'est à dire qu'il décrit toutes les composantes du cycle hydrologique du bassin de manière continue dans le temps sur une grille spatiale. Il se propose comme un compromis entre des modèles distinctement physiques et complexes et des modèles trop simplifiés qui ne réussissent pas à décrire adéquatement les processus, il se prête bien à l'usage opérationnel par la Protection Civile et a la possibilité d'être calibré en utilisant les observations satellitaires en alternative aux observations traditionnelles des débits au cas où celles-ci ne seraient pas disponibles. Il est capable de représenter les échanges de masse et énergie entre atmosphère et sol en fournissant l'évolution spatio-temporelle du débit, de l'humidité du sol, de la température superficielle du sol, de l'évaporation-transpiration et de la nappe aquifère. Tout cela permet d'avoir un vaste spectre de possibilités d'utilisation de l'instrument. Continuum peut être employé non seulement pour la prévision des crues, mais aussi pour simuler les débits des différents régimes, pour modéliser les dynamiques de l'humidité du sol et l'évolution de la nappe, bien que de manière simplifiée. La description et application du modèle est publiée dans une revue scientifique de notoriété internationale spécialisée en hydrologie et sciences de la terre(Silvestro et al., 2013; Silvestro et al., 2015);

Continuum est issu de l'évolution du modèle à échelle d'épisode semi-distribué DriFt (Giannoni et al., 2000, Giannoni et al., 2003, Gabellani et al., 2008) , créé dans des buts opérationnels de protection civile, dont on a maintenu les procédures nécessaires à la détermination des directions de drainage et du réseau hydrographique, en améliorant la méthodologie de simulation du ruissellement superficiel et en introduisant des processus physiques qui n'étaient pas modélisés.

Il a fait l'objet de différents travaux scientifiques et d'applications, par exemple: Laiolo et al. (2014) l'ont utilisé pour évaluer l'assimilation des données satellitaires d'humidité du sol, Silvestro et. Al (2016) ont utilisé le modèle pour étudier l'inondation catastrophique de 2014 du Bisagno, Silvestro et al. (2018) ont en revanche produit une re-analyse hydrologique de 30 ans sur la Région Ligurie en utilisant un downscaling dynamique des re-analyses météorologiques ERA-Interim comme entrée.

Le modèle Continuum a besoin comme entrée de certaines données territoriales (statiques) et des champs obtenus par l'interpolation des variables météorologiques, Les données territoriales de départ sont:

- le modèle numérique du terrain (DEM);
- La carte de la valeur du Curve Number (CN) (Risse et al., 1995) du territoire. Elle est utilisée comme proxy pour l'estimation de certains paramètres du modèle.

On en tire les couches d'information qui décrivent le territoire et dont les caractéristiques sont ensuite utilisées directement par le modèle. La résolution spatiale de ces couches d'information définit en outre la résolution spatiale avec laquelle le bassin hydrographique est décrit par le modèle.

Ayant à disposition d'autres couches d'information territoriales comme la texture du sol et la lithologie des strates profondes du sol, il est possible d'introduire de nouvelles limites à la paramétrisation en réduisant les degrés de liberté de cette dernière.

Les input météorologiques temps-variantes nécessaires sont: précipitation, température de l'air, humidité relative de l'air, vitesse du vent, rayonnement solaire incident à ondes courtes.

4.1.4 Application au bassin du Trebbia

Le modèle Continuum a été appliqué à un domaine hydrologiquement significatif qui comprend le bassin du Trebbia, ce domaine a été concordé avec les techniciens de l'ARPAL de manière à pouvoir être compatible avec les instruments hydrologiques utilisés au Centre Fonctionnel Hydrométéorologique de la Région Ligurie (CF). Une telle approche de compatibilité a été aussi adoptée pour les données statiques et la paramétrisation.

N'ayant pas à disposition les données de débit, on n'a pas exécuté de calibrage du modèle, toutefois beaucoup de paramètres de calibrage peuvent être mis en rapport avec des couches d'information territoriales, il est par conséquent possible de procéder à une paramétrisation raisonnable dans une première tentative. De plus, vu que le modèle a été réalisé sur d'autres zones du territoire ligure, on a décidé de procéder par analogie sur certains paramètres.

A partir des informations d'usage du sol et de couverture forestière, une carte de Curve Number (CN) qui couvre tout le territoire régional et les zones limitrophes a été construite.

Elle a été obtenue en intégrant les informations fournies par la Région Ligurie avec les informations externes repérées sur internet de couches à échelle nationale et internationale. On doit remarquer que la carte de CN en question est utilisée pour paramétriser un modèle de gestion de l'infiltration et des flux dans l'appareil radical qui n'est pas la méthode du Soil Conservation Service (SCS).

Les couches (layer) de texture du sol sont issues de la banque de données internationale, (<http://soilgrids.org/>), il s'agit de rasters qui fournissent les pourcentages d'argile, limon, sable, à une échelle spatiale égale à 1 km. Cette information est utilisée pour paramétriser de manière distribuée 2 paramètres appelés c_t et c_f qui sont liés à la capacité de champ et à l'infiltration à saturation du sol dans la root-zone (où se développe l'appareil radical).

La strate de la lithologie a été utilisée pour construire le raster qui représente la capacité de la strate sol profond (ou nappe) du modèle d'alimenter directement le ruissellement superficiel. Ceci permet de manière simplifiée de simuler les zones où sont présentes des sources distribuées ou ponctuelles.

En particulier, une certaine capacité de produire un tel phénomène a été assignée aux zones avec des roches de type calcaire et dolomitique. Le raster généré est de toute façon introduit dans la procédure de calibrage.

Le modèle numérique du terrrain (DEM) utilisé a une résolution native de 20 mètres. Il a été dégradé à la résolution de 0.00018 deg (égale à environ 171 m) pour des raisons computationnelles. La résolution temporelle adoptée est égale à une heure.

Les données météorologiques disponibles ont permis d'effectuer une simulation d'une longueur égale à 13 ans de 2005 à 2018, avant cette année les données de température et de pluie sont disponibles mais pas les autres variables nécessaires.

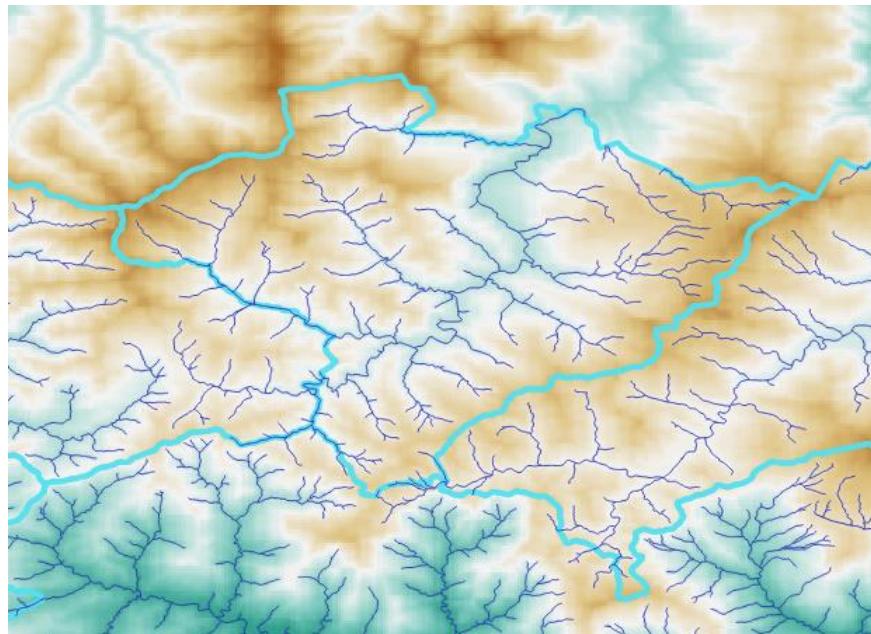


Figura 6: Modèle numérique du terrain du bassin du Trebbia, En turquoise les lignes de démarcation des domaines hydrologiques du CF, en bleu le réticule de référence régional.

4.1.5 Setting Barrage du Brugneto

La présence des barrages est schématisée dans le modèle au moyen de l'insertion de déconnexions hydrauliques le long du réseau hydrographique. On identifie le point du réseau où est positionné le plan d'eau en amont des barrages et, dans cette position l'écoulement superficiel est inhibé. Le plan d'eau est considéré comme ponctuel et est modélisé comme un réservoir positionné dans le pixel défini précédemment, il est alimenté par les portions de bassin qui y drainent.

En aval du pixel où est positionné le barrage les points de déversement des centrales sont identifiés. Le débit déversé dépend des règles de gestion des installations de production de l'énergie électrique

La schématisation prévoit aussi la présence de déversoirs qui entrent en action en cas de remplissage excessif des réservoirs de retenue, par exemple en présence d'épisodes de crue

En Figure 7 **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** on trouve le schéma de réservoir qui représente le réservoir de retenue du barrage avec deux modalités possibles de vidange de ce dernier.

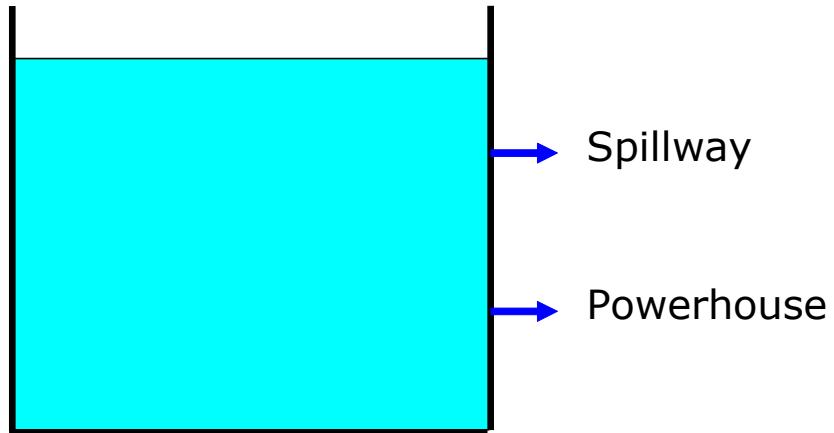


Figura 7. Schéma du réservoir représentant le volume du plan d'eau du barrage et les deux modalités possibles de vidange: installation de la centrale (powerhouse) et déversoirs (Spillway)

Le fonctionnement pratique prévoit deux modalités principales, selon que les débits sortants du barrage sont ou ne sont pas connus.

Dans le cas où les séries temporelles de débit sortant du barrage (en général vers les centrales électriques, ou bien pour autres usages) sont disponibles, le barrage est vidé avec ces données et par conséquent le volume présent dans le bassin collecteur des eaux est mis à jour.

Dans le cas où les séries temporelles de débit du barrage ne sont pas connues, on cherche à estimer un débit moyen sur la base :

- des informations disponibles
- de la dimension du barrage
- de la zone drainée du bassin sous-tendu par le barrage

Celui-ci est ensuite modulé en fonction du degré de remplissage du barrage exprimé comme volume présent divisé par le volume maximal possible du bassin de retenue.

En tout cas, si le volume maximum possible du bassin de retenue est dépassé, à cause de la contribution du bassin en amont, les déversoirs superficiels entrent en fonction. Ces derniers sont modélisés par un seuil du déversoir, dans le cas où les dimensions de cet ouvrage hydraulique ne sont aucunement disponibles, elles sont estimées sur la base de la dimension du barrage du bassin sous-tendu en amont.

Dans le cas du barrage du Brugneto quelques informations sur les caractéristiques du barrage et de ses installations hydrauliques sont connues, mais pas les séries temporelles relatives aux turbines des installations d'utilisation de l'eau stockée dans le réservoir.

Au tableau suivant, sont représentées les données utilisées dans la modélisation.

Caractéristique	Unité de mesure	Valeur	Source
-----------------	-----------------	--------	--------

La cooperazione al cuore del Mediterraneo
La coopération au coeur de la Méditerranée

Hauteur du barrage	m	82	Layer national grands barrages
Volume maximum du barrage	Millions de m ³	25	Layer national grands barrages
Débit maximum des déversements	m ³ s ⁻¹	600	Layer national grands barrages
Débit moyen des installations qui utilisent l'eau	m ³ s ⁻¹	1.21	Layer concessions Région Ligurie

4.1.6 Résultats

4.1.6.1 Analyse de la ressource hydrique

Une première analyse porte sur l'évaluation des ressources hydriques du bassin du Trebbia. Le régime est de type torrentiel avec des crues assez soudaines et des périodes de faible débit qui peuvent durer même plusieurs semaines surtout dans les mois d'été. Les principaux apports hydriques mensuels sont au cours des mois d'automne et d'hiver pendant lesquels les épisodes de crue suivis de périodes de récession, contribuent à produire des débits mensuels moyens plus élevés que dans les mois de printemps et d'été. Les résultats pour certaines section de référence dont la position sur le tronçon du Trebbia est donnée en Figure 8 sont représentés ici.

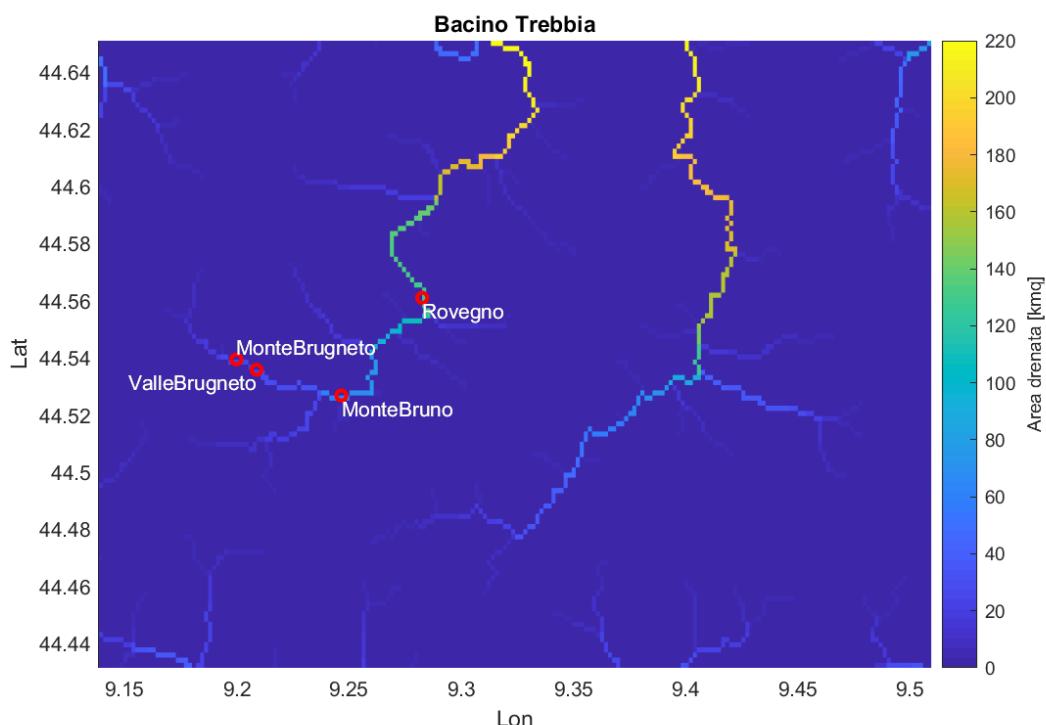


Figure 8: Position des sections analysées du bassin du Trebbia

Pour ces sections, Trebbia à Monte Bruno (Aire=66 km²), Trebbia à Rovegno (Aire=122 km²), Trebbia en amont et en aval du barrage de Brugneto (aire drainée respectivement de 25 et 27 km²), les débits moyens mensuels (Figure 9 et Figure 10) (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata. e Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**) et les valeurs moyennes, minimales et maximales des débits horaires enregistrés dans la période d'analyse (2005-2018) sont donnés.

	Trebbia Monte Bruno	Trebbia amont Barrage Brugneto	Trebbia aval Barrage Brugneto	Trebbia Rovegno
Débit moyen [m ³ s ⁻¹]	1.66	0.86	0.07	4.00
Débit minimal [m ³ s ⁻¹]	0.20	0.12	0.01	0.45
Débit maximal [m ³ s ⁻¹]	318.4	189.4	83.2	709.9

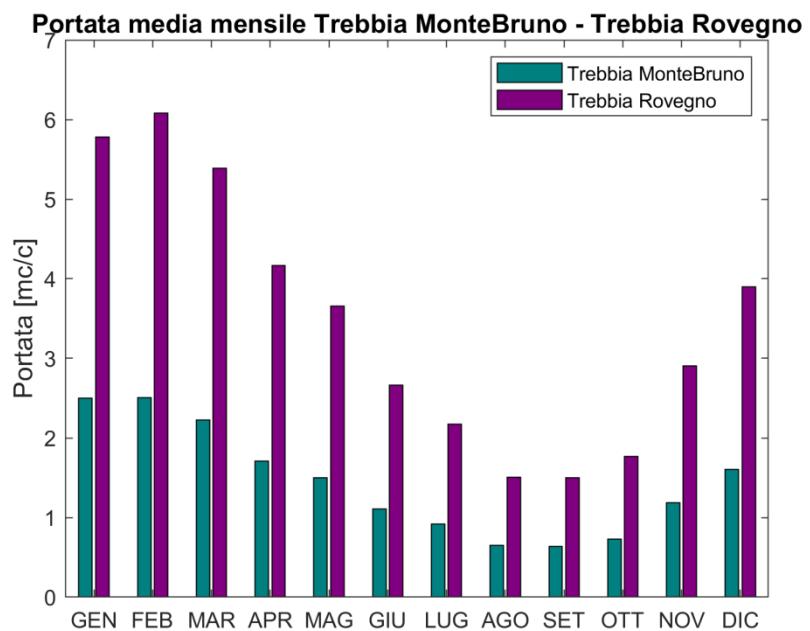


Figure 9: Évolution du débit moyen mensuel pour les sections Monte Bruno e Rovegno.

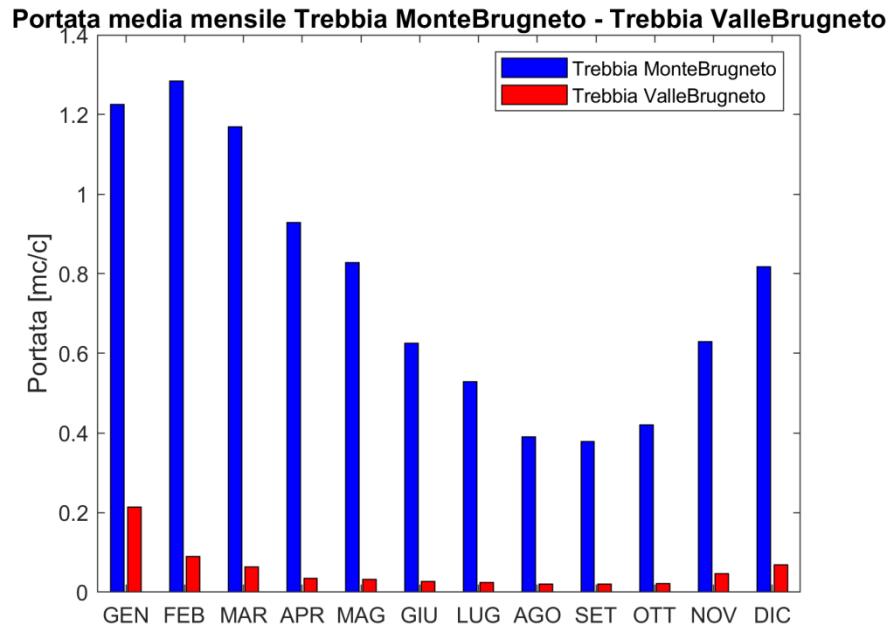


Figure 10: Évolution du débit moyen mensuel pour les sections de Monte Bruno e Rovegno.

Les Figures 11 et 12 montrent la courbe de durée, on en déduit que pour les deux sections des débits autour de $10-20 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ sont dépassés en moyenne pendant peu de journées par an.

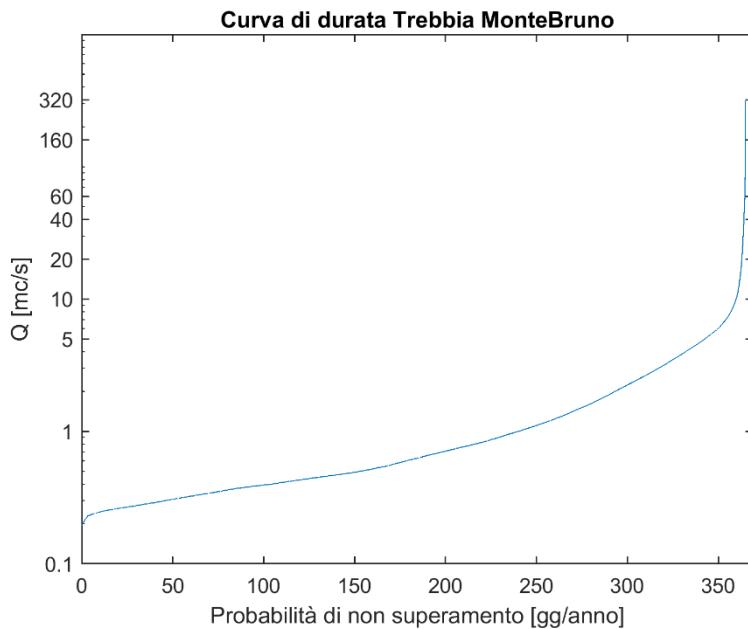


Figure 11: Courbe de durée pour les débits de 2005 à 2018 pour la section de Monte Bruno.

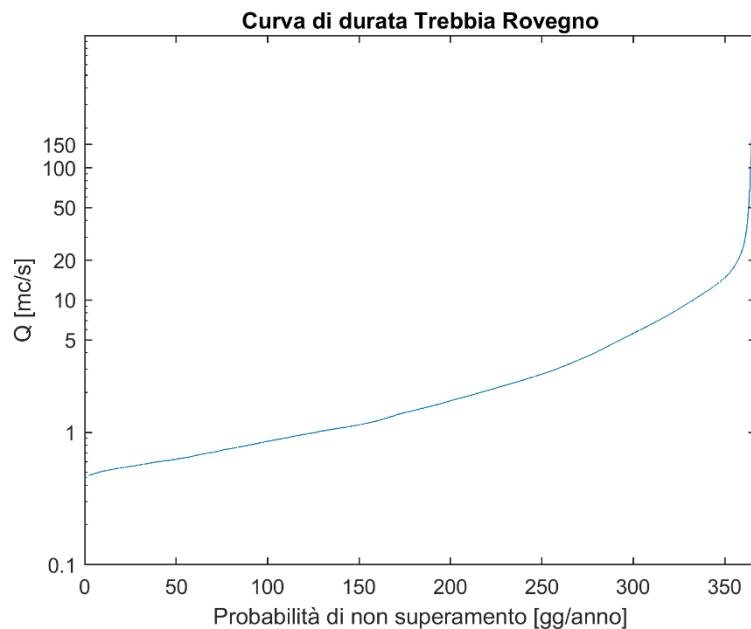


Figure 12: Courbe de Durée pour les débits de 2005 à 2018 pour la section de Rovegno.

4.1.6.2 Maxima annuels de débit

La simulation a une longueur égale à 13 ans, il n'est pas possible de faire une analyse représentative de la statistique des maxima annuels de débit; on a jugé opportun de donner quelque résultat dans ce sens afin d'avoir une idée de l'ordre de grandeur des débits maximaux et de leur variabilité.

On donne les cartes de probabilité et l'ajustement (fitting) avec la fonction de distribution de probabilité General Extreme Value (GEV) pour certaines sections de référence: Trebbia à Monte Bruno (Aire=66 km²), Trebbia à Rovegno (Aire=122 km²).

Les cartes de probabilité des maxima annuels mettent en évidence le régime de type torrentiel avec des maxima annuels qui peuvent varier d'environ un ordre de grandeur de $o(10^1)$ à $o(10^2)$ dans la période de simulation, on a en outre la mémoire d'épisodes historiques avec des pics de plus de 1000 m³s⁻¹ à Rovegno.

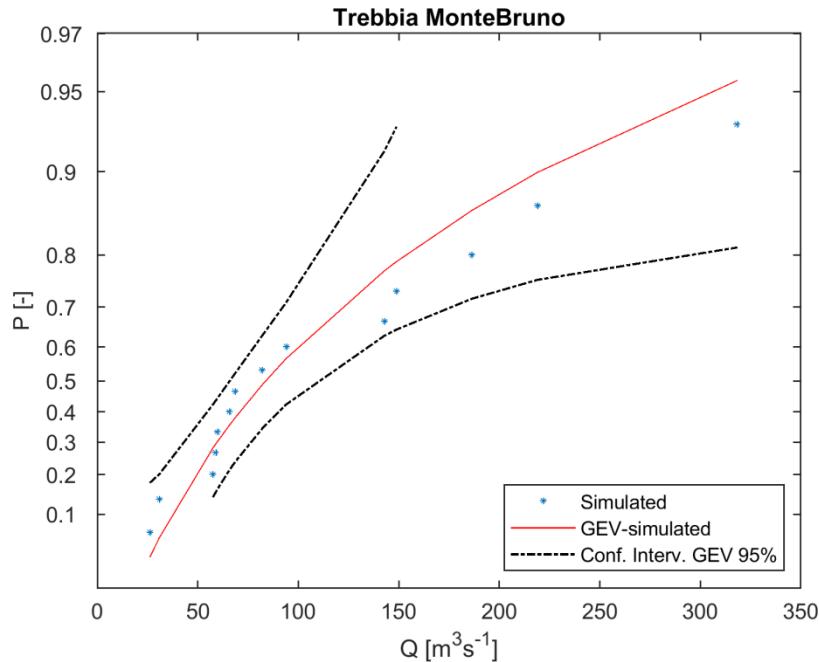


Figure 13: Carte de Probabilité des maxima annuels pour les débits simulés dans la section de Monte Bruno.

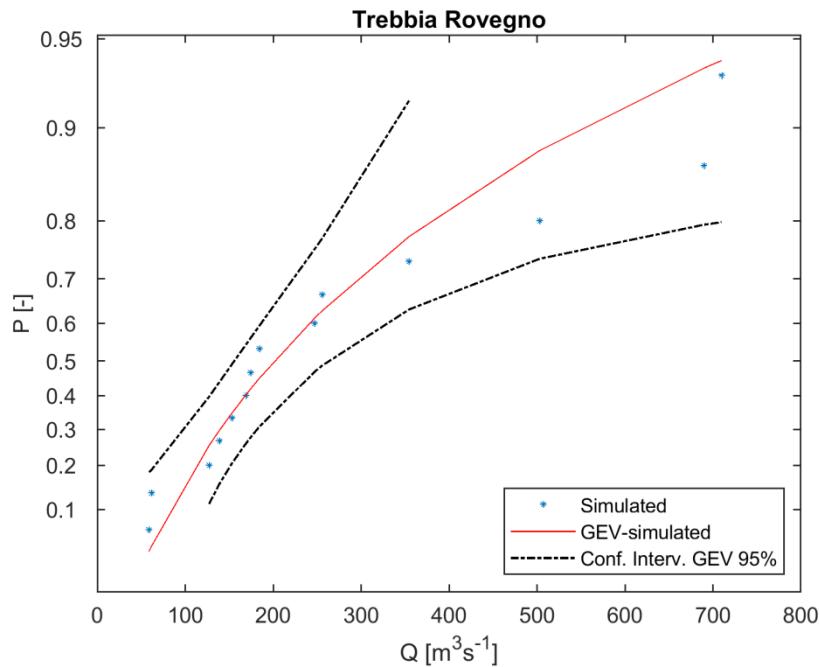


Figure 14: Carte des Probabilités des maxima annuels pour les débits simulés dans la section de Rovegno.

4.1.6.3 Effet de laminage du barrage du Brugneto

Une autre analyse intéressante concerne l'effet de laminage du barrage du Brugneto. Il s'agit d'une analyse qualitative dans la mesure où on ne dispose pas de données relatives au

volume effectif du plan d'eau avant les épisodes de crue et les manœuvres de déversement exécutées.

Toutefois, la modélisation devrait reproduire raisonnablement le comportement moyen du barrage en termes de variation de niveau du volume du bassin de retenue, il est donc intéressant d'étudier l'effet présumé sur certains épisodes du passé.

Le barrage du Brugneto est situé sur un tributaire latéral du Trebbia qui draine une aire d'environ 25 km^2 , il n'a donc pas une haute capacité de laminage par rapport au tronc principal. Pourtant, elle n'est pas à considérer comme nulle, car vu la dimension du barrage par rapport au bassin en amont, la contribution de ce dernier est fortement laminée.

Il est clair que le laminage se produit seulement dans le cas où les précipitations frappent le bassin hydrographique en amont du barrage; dans ces cas comme il est possible de voir sur les graphiques suivants l'abattement de la pointe de crue dans le tronçon en aval du barrage peut arriver jusqu'à 100 % de la pointe de crue en amont, comme cela est arrivé dans trois épisodes sur les quatre rapportés sur la figure ci-dessous (Figure 15) . Cela signifie que la contribution du tributaire au Trebbia peut dans certains cas s'avérer insignifiante.

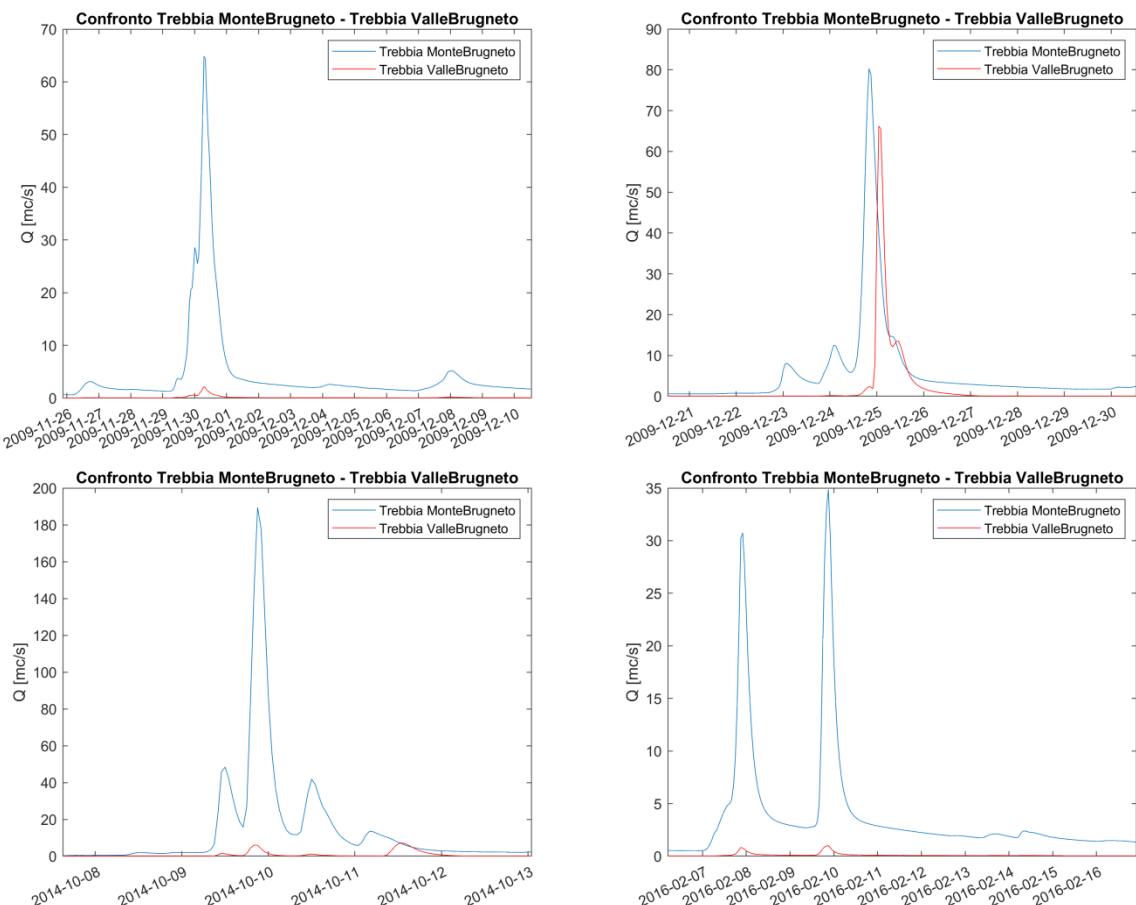


Figure 15: Comparaison entre séries débit amont et aval barrage Brugneto dans différents épisodes sélectionnés dans la période d'analyse(de 2005 à 2018)

Le comportement observé lors de l'épisode qui a eu lieu fin décembre 2009 est intéressant: dans ce cas, à la suite d'une période où le laminage du barrage a déjà servi à mitiger l'épisode de fin novembre – début décembre, on observe en aval une diminution du débit bien inférieure au pic de débit par rapport aux autres épisodes de crue.

4.1.6.4 Humidité du sol

Nous montrons ci-après quelques exemples de cartes d'humidité relative de la couche du sol où se développe l'appareil radical estimée par le modèle. Cette information présente certainement un grand intérêt pour comprendre quelle pourrait être la réponse du bassin à un épisode de pluie prévu, il est en outre possible à l'aide de techniques adéquates d'utiliser directement l'information pour initialiser d'autres modèles hydrologiques. La Figure 16 montre la carte d'humidité du 21/07/2017 et montre des valeurs basses de saturation du sol, conformes à la période estivale, alors qu'en Figure 17 la carte relative au 21/10/2017 montre une saturation des sols plus élevée, due à la période pluvieuse précédente.

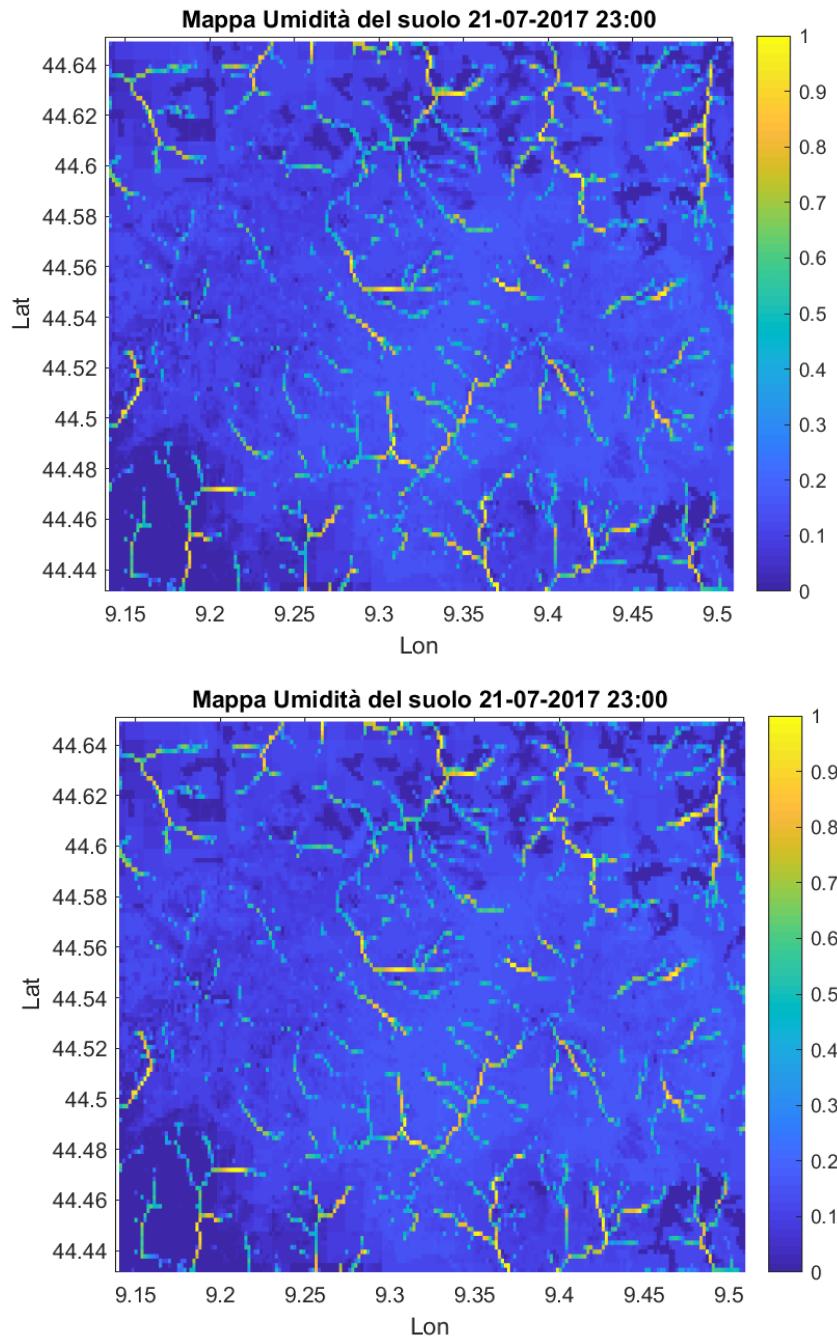


Figure 17: Carte de saturation du sol modélisée

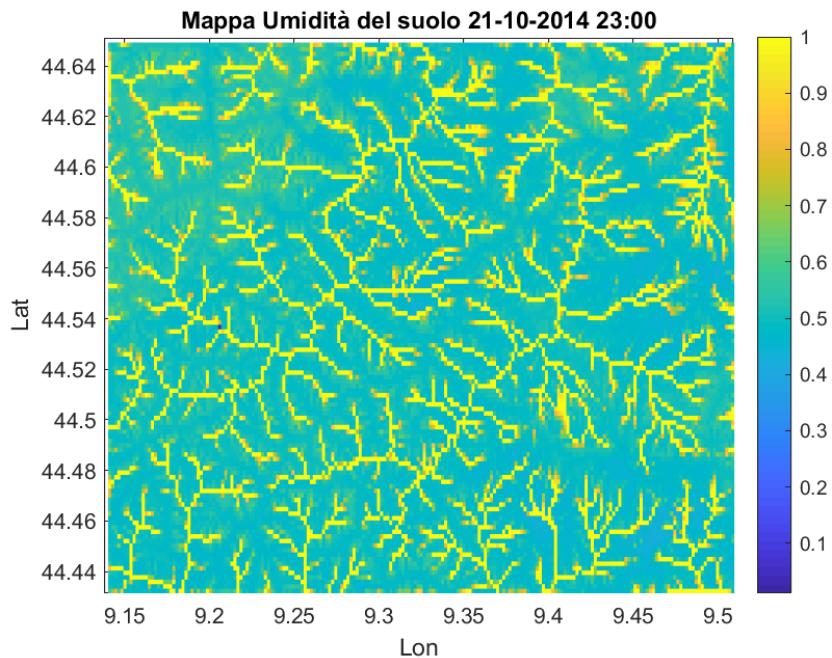


Figure 16: Carte de saturation du sol modélisée

5. Conclusions

Les activités réalisées par la Ville de Nice, la Région Sardaigne et la Fondation CIMA ont renforcé la modélisation hydrologique et hydraulique, tant aux fins de la vigilance ou de sa préparation, que en termes de diverses activités liées au cycle des eaux sur le territoire.

En particulier, la Ville de Nice a investi dans la conception, le développement et l'expérimentation d'une plateforme innovante de supervision des risques inondation pour le bassin du Magnan – en intégrant des données de type topographique, géologique, hydrologique et météorologique, ainsi que la vidéosurveillance en temps réel via des caméras intelligentes – et en permettant la mise au point d'une modélisation hydrologique, la définition de seuils d'alerte précoce en fonction de la hauteur d'eau, la vitesse du flux et de la détection d'objets flottants. Une telle activité de renforcement de la modélisation hydrogéologique et hydraulique a amélioré la capacité de supervision et d'alerte précoce de la Ville de Nice.

Le Département du Var a investi dans le renforcement du système d'alerte précoce des crues pour la CAVEM, avec l'objectif de modéliser le fonctionnement hydraulique des cours d'eau, de caractériser les sections homogènes et de proposer des seuils de vigilance pour les stations de mesure adéquates aux sections et aux premiers points de déversement. Ce travail a permis à la CAVEM de régler avec davantage de précision les seuils d'alerte précoce et d'alerte dans ses stations de mesure, en améliorant la capacité de vigilance.

En ce qui concerne la Région Sardaigne, l'activité présentée portait sur la révision des zones de vigilance et les seuils pluviométriques sur tout le territoire de la Région Sardaigne, avec l'objectif de résoudre différents problèmes (fausses alertes ou alertes manquées) posés par la subdivision actuelle du territoire en sept zones de vigilance homogènes. La nouvelle définition des zones de vigilance, qui prévoit une phase expérimentale, contribue effectivement à l'amélioration de la vigilance au niveau régional.

Enfin, les travaux de la Fondation CIMA visaient à utiliser la modélisation hydrologique distribuée comme outil de soutien pour diverses activités liées au cycle de l'eau dans la zone. En particulier, l'utilisation de modèles hydrologiques, tout en introduisant des éléments d'incertitude, a permis de pallier le manque d'outils, permettant des évaluations généralisées et généralisées en de nombreux points du bassin de Trebbia.

6. Annexe

6.1. Ville de Nice

6.1.1. Retour d'expérience sur l'épisode du 01-02 décembre 2019

Le retour d'expérience porte sur l'évènement survenu le dimanche 1^{er} décembre 2019. Le rapport retrace d'abord l'anticipation de l'évènement en appui sur les prévisions hydrométéo à plusieurs jours. Les caractéristiques de l'évènement sont ensuite analysées, appréhendées de manière traditionnelle par la mesure in situ de pluie et de hauteur d'eau et approfondies de manière innovante par l'hydrométrie par vidéo dont les apports seront évalués. Les prévisions établies à 1H30 lors de l'évènement sont retracées et analysées, ainsi que leur intégration dans le superviseur Magnan, à des fins d'émission d'alerte précoce. L'ensemble de ces éléments permet de dégager des améliorations à apporter au dispositif.

Anticipation par le dispositif de Vigilance hydrométéo national

Le positionnement du département en vigilance ROUGE

Entre le 15 octobre et le 20 décembre 2019, le département des Alpes-Maritimes a été confronté à une série d'épisodes méditerranéens. Pour la première fois depuis que le dispositif de Vigilance Météo a été mis en place, il a été placé en VIGILANCE Orange puis Rouge le week-end du 23 au 24 novembre 2019, puis une semaine plus tard le dimanche 1^{er} décembre 2019. Lorsque l'épisode du 1^{er} décembre intervient, il est déjà tombé entre 600 et 800 mm d'eau sur la Métropole de Nice en l'espace de 6 semaines, soit le cumul moyen annuel. Un nouvel épisode méditerranéen est annoncé dans le courant de la semaine pour le week-end. Les prévisions de Météo France à 4 jours donnent initialement des prévisions de quelques dizaines de mm, et sont renforcées à l'approche de l'évènement.



Figure 26 : Département des Alpes-Maritimes placé en vigilance rouge le 1^{er} décembre 2019

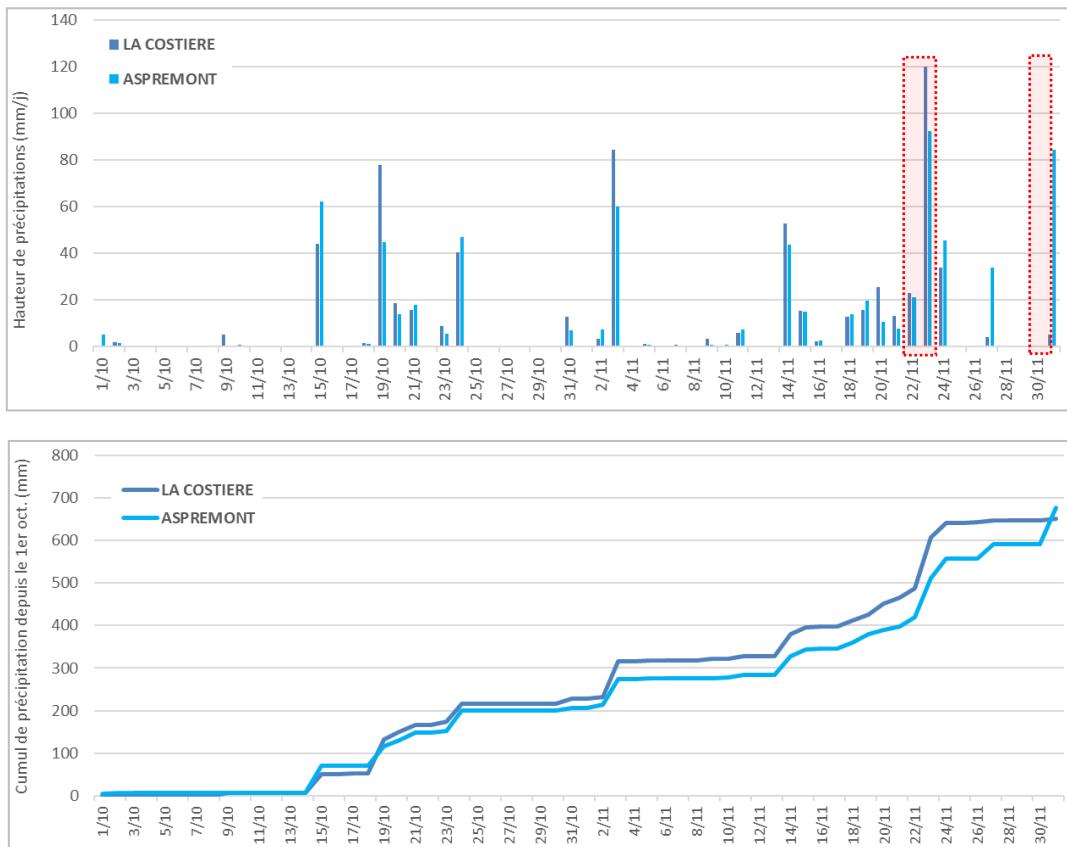


Figure 27 : Évolutions des précipitations sur le bassin versant du Magnan, mesurée par la Métropole NCA

Les cumuls de pluie annoncés finalement pour ce nouvel épisode par Météo France sont de l'ordre de 70 à 130mm sur la durée de l'évènement sur la Métropole de Nice, les 1^{er} et 2 décembre, susceptibles d'atteindre localement 150 à 200mm dans l'ouest du département des Alpes-Maritimes. 100 mm sont prévus sur la ville de Nice. Les sols sont alors saturés par les pluies tombées depuis mi-octobre.

L'activation du PCC

A l'annonce de la vigilance ORANGE, le Maire de Nice a décidé d'activer le Poste de Commandement Communal (PCC) à 9H00 le 1^{er} décembre, avec la DPGR, la police municipale et un ingénieur d'astreinte hydrométéo. Sont alors à disposition, de manière complémentaire :

- **l'interface métropolitaine de supervision des cours d'eau**, sur laquelle sont remontées les mesures pluviométriques et limnimétriques, ainsi que les images des caméras déployées dans le cadre du projet de R&D,
- **l'interface de supervision Magnan**, développée dans le cadre du projet de R&D,
- **l'interface interne TENEVIA** pour le suivi complémentaire des prévisions de débit du Magnan, ainsi que l'application Riverboard.

Le passage du département en vigilance ROUGE à 14H00 jusqu'à au moins 6H00 le lendemain, a été annoncé à 10H00. Cela a entraîné l'activation du plan ORSEC par le Préfet de département.

Caractérisation de l'évènement et des apports de l'hydrométrie par vidéo

Données pluviométriques mesurées au sol du SAC Magnan

Les postes pluviométriques du SAC montrent une installation progressive de l'évènement dans la journée du dimanche 01 Décembre, à partir de 6H00, puis un renforcement notable en fin d'après-midi et début de soirée, surtout sur la partie amont du bassin. La Figure 29 met en évidence des cumuls mesurés nettement supérieurs à Aspremont (84 mm en 17 heures) par rapport à La Costière. L'intensité maximale a été de :

- 16 mm en 1 heure, entre 19H30 & 20H30
- 10 mm en 30 mn, entre 20H00 et 20H15.

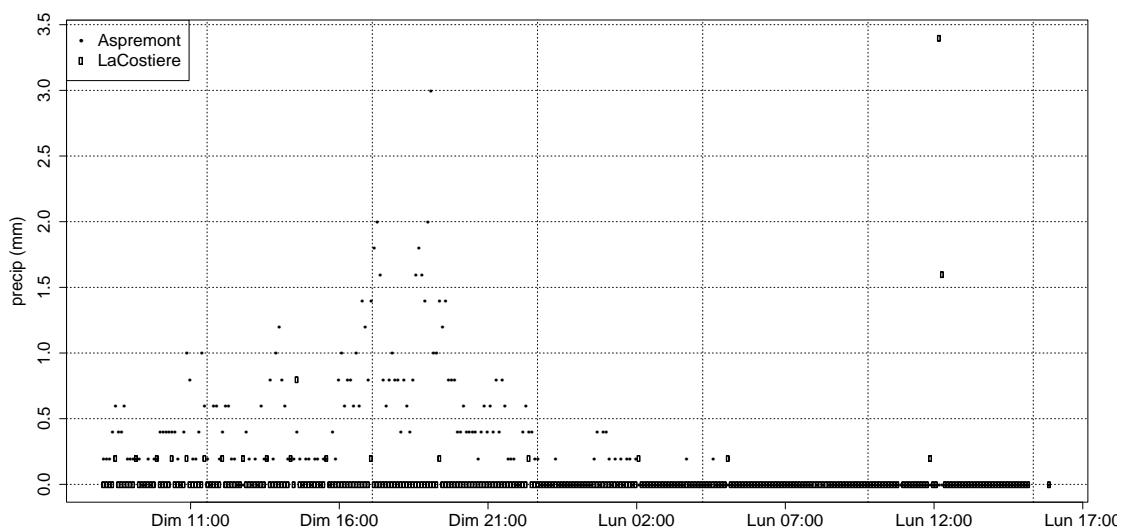


Figure 28 : Précipitations mesurées par les pluviomètres du SAC Magnan

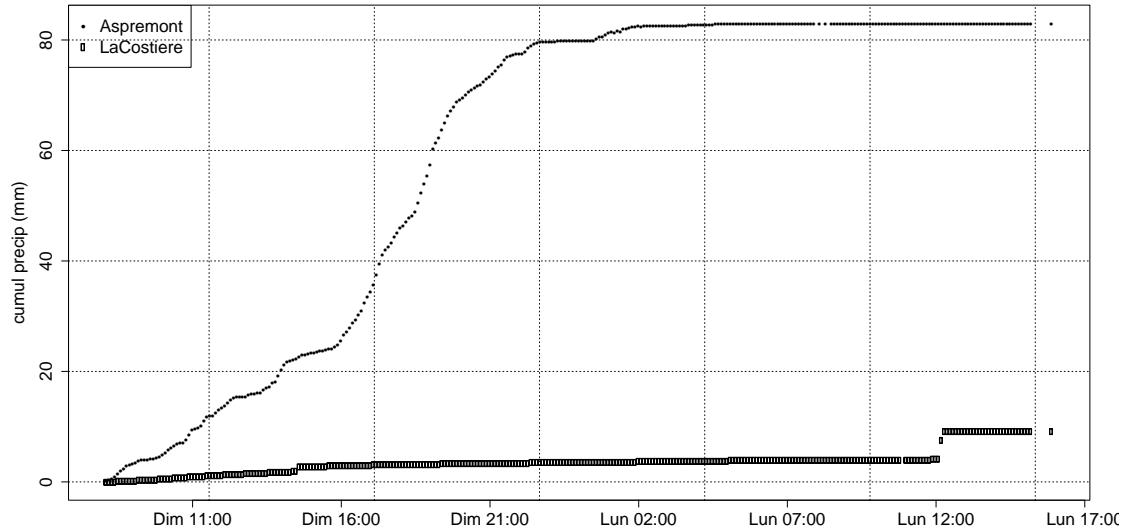


Figure 29 : Cumuls de précipitations mesurées par les pluviomètres du SAC Magnan

Face à cette différence de mesures entre les deux pluviomètres, un dysfonctionnement du pluviomètre de la Costière a été soupçonné dans la journée de dimanche et a conduit à diligenter un contrôle pendant l'évènement, par le technicien d'astreinte. Le contrôle en temps réel n'a détecté aucun dysfonctionnement, ni le contrôle post évènement.

A partir des statistiques pluviométriques de la station de Météo France à Nice, l'évènement survenu le 1^{er} décembre est caractérisé en termes de période de retour maximale, selon les pas de temps d'observation considérés, de 30 mn à 24 heures.

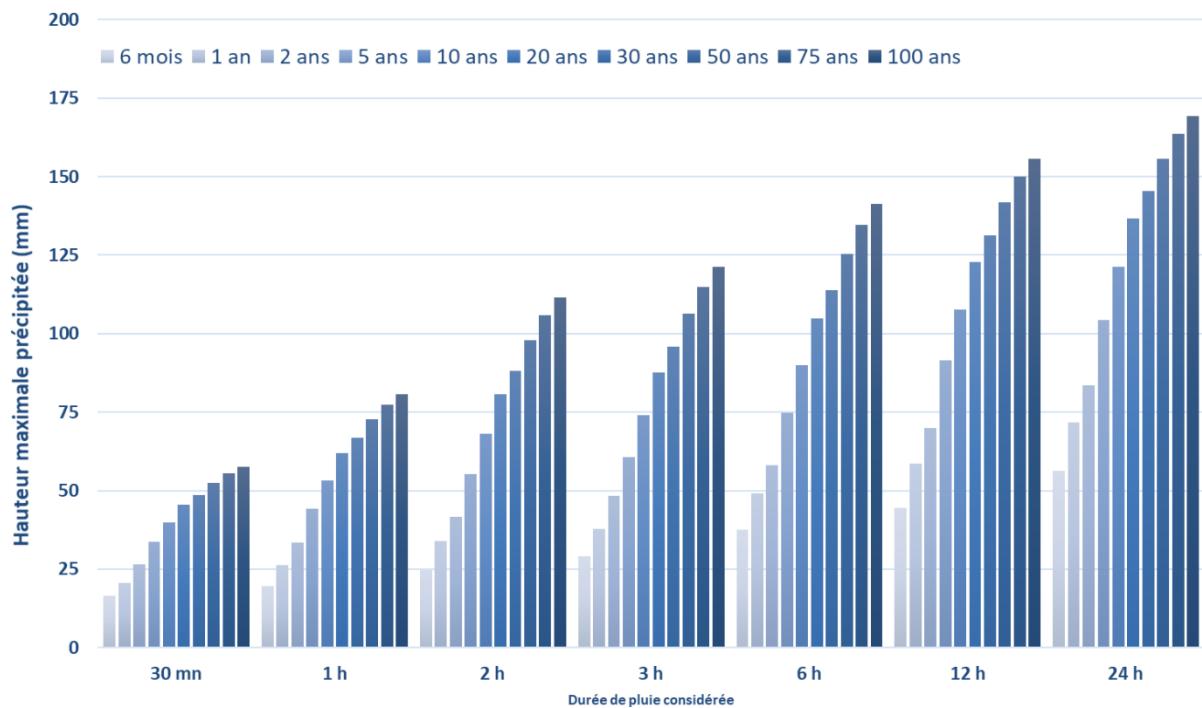


Figure 30 : Hauteurs maximales précipité selon la durée de pluie considérée, associées aux périodes de retour de 6 mois à 100 ans, d'après les données de Météo France station Nice - 1982-2013 (6 mois à 2 ans) 1982-2016 (5 ans à 100 ans)

Date de la pluie	Durée de temps sec préalable	La Costière			Aspremont			Hauteur d'eau maximale à Aqueducc
		Cumul total mesuré au sol	Période de retour maximale (T_{max})	Durée associée à T_{max}	Cumul total mesuré au sol	Période de retour maximale	Durée associée	
20-déc-20	19 jours	82 mm	2 ans	6 à 24h	112 mm	10 ans	12 h	52 cm
01-déc-20	4 jours				87 mm	2 ans	12 à 24 h	50 cm
23-nov-20	-	153 mm	10 à 20 ans	12 à 24h	137 mm	5 à 10 ans	24 h	54 cm
03-nov-20	10 jours	84 mm	10 à 20 ans	30mn à 2h	60 mm	2 ans	0 mn à 1 h	65 cm
24-oct-20	1 jour	40 mm	6 mois	2h	46 mm	< 6 mois		46 cm
19-oct-20	2 jours	78 mm	10 à 20 ans	30mn à 3 h	45 mm	1 an	1 à 3 h	59 cm
15-oct-20	45 jours	44 mm	6 mois	30mn à 24h	62 mm	1 an	30 mn à 12 h	48 cm

Tableau 2 : Caractéristiques des événements pluvieux mesurés sur le bassin versant du Magnan entre le 15 octobre et le 20 décembre 2020 (source : MNCA).

Estimation de pluie par radar météorologique

A partir des réflectivités mesurées par le radar météorologique du Mont-Vial, des lames d'eau sont estimées à partir de la chaîne de traitement ZPHI de la société NOVIMET.

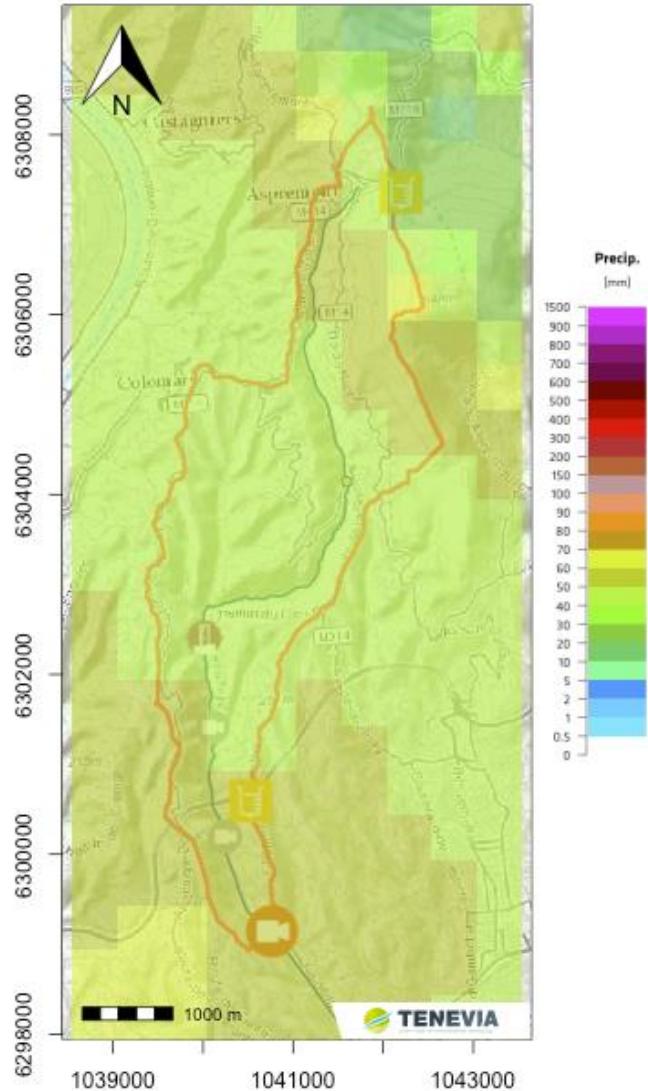


Figure 31 : Variabilité spatiale des cumuls de pluie mesurés par radar (avec positionnement des stations hydrométriques et pluviométriques du SAC ainsi que des caméras)

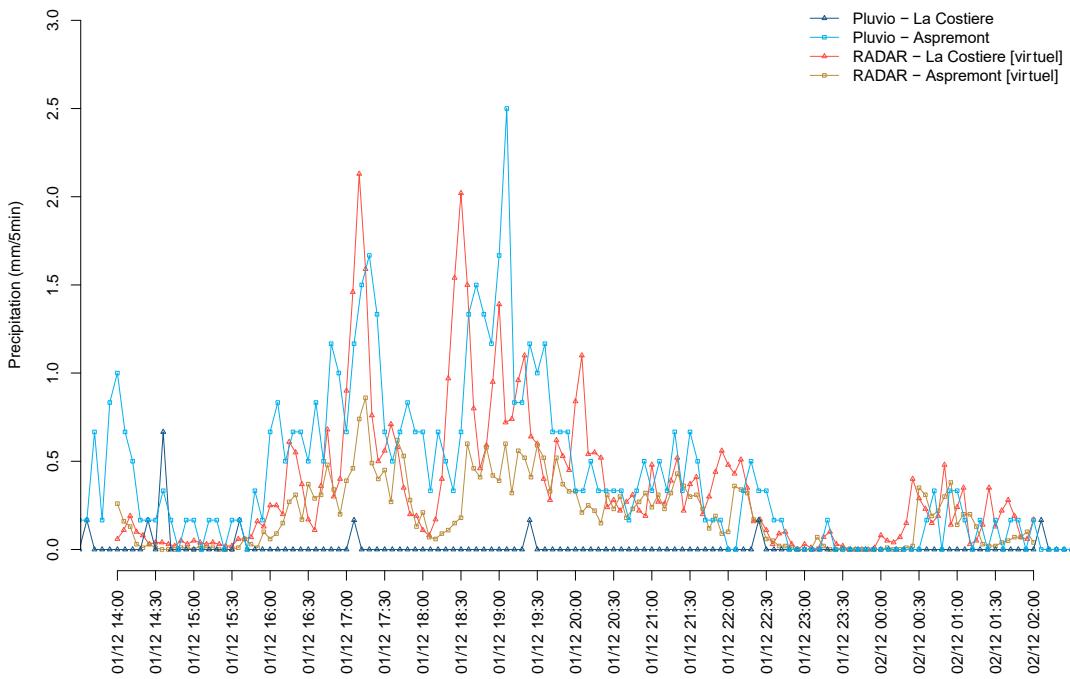


Figure 32 : Comparaison des estimations radar et des données station au droit des postes pluviométriques

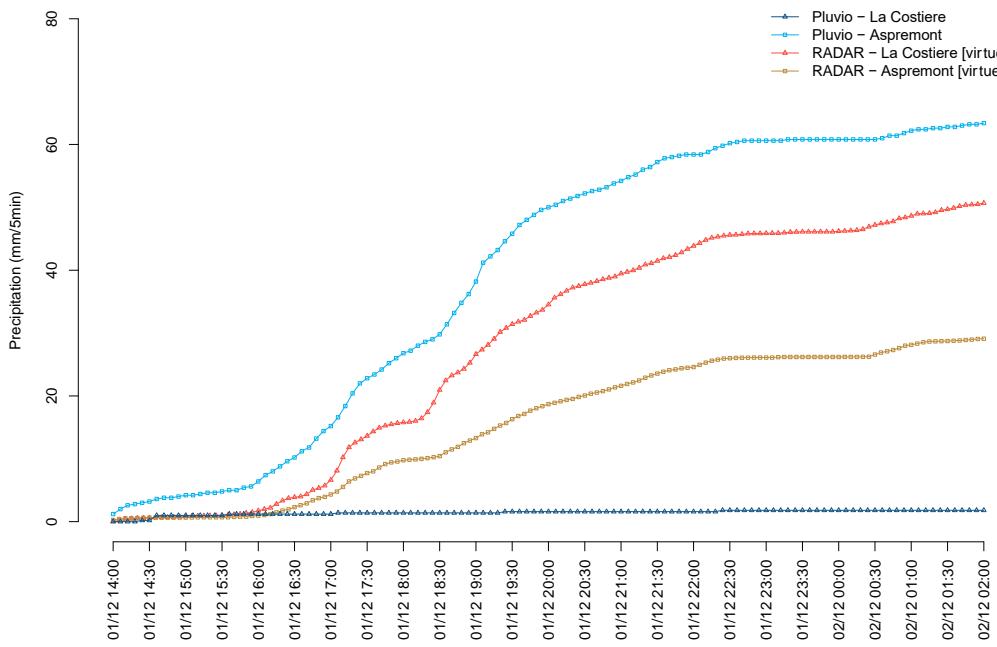


Figure 33 : Comparaison en cumul des estimations radar au droit des postes pluviométriques et des données station

La variabilité spatiale des pluies est assez marquée et les écarts entre radar et pluvios sont significatifs. Ceci est une caractéristique relevée pour les 4 épisodes de cet automne (graphiques de comparaison disponibles en annexe dans le répertoire ressources/cartes_radar_et_comparaisons_radar_pluvios).

L'autre caractéristique qui semble systématique est une sous-estimation des précipitations radar sur la zone Aspremont sur la partie amont du bassin.

Données hydométriques mesurées dans le cadre du SAC Magnan

La Figure 34 et la Figure 35 présentent les hauteurs et les débits mesurés et estimés à partir des stations du SAC Magnan. La hauteur d'eau maximale mesurée est de 50 cm à l'Aqueduc. Le niveau d'eau reste entre 40 et 50 cm toute la soirée, de 19H30 à minuit.

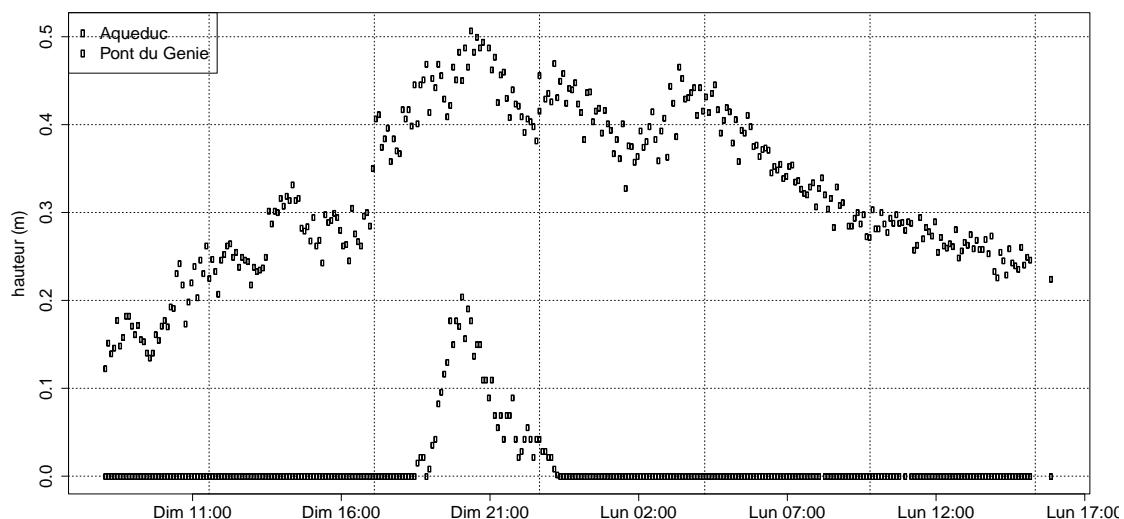


Figure 34 : Hauteurs d'eau mesurées par les stations hydrométriques du SAC Magnan

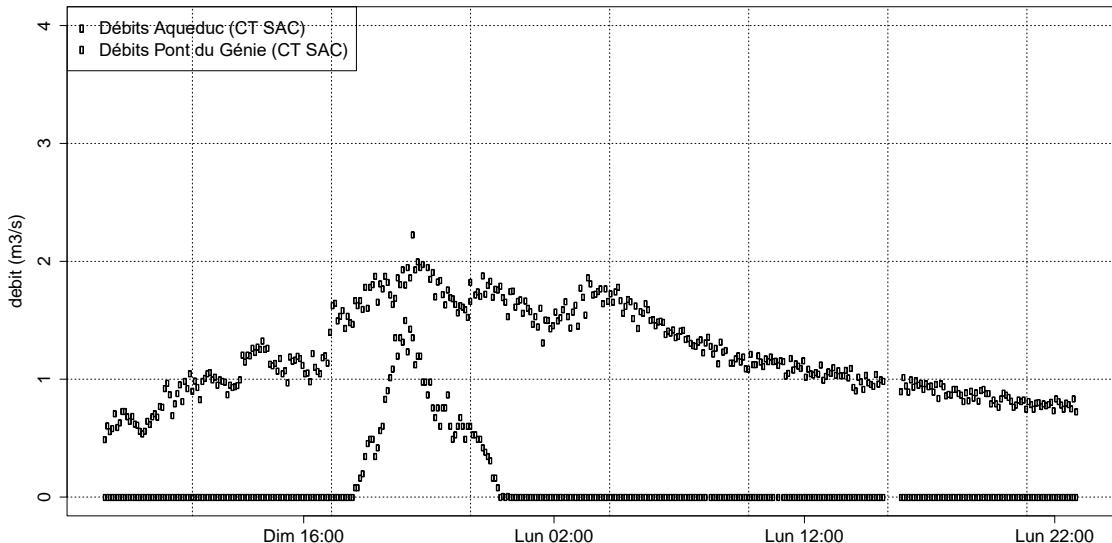


Figure 35 : Débits estimés à partir des hauteurs d'eau mesurées des stations du SAC Magnan

Moins de 20 minutes s'écoulent entre la hauteur maximale à Pont du Génie (2019-12-01 20:06:00) et la hauteur maximale à l'Aqueduc (2019-12-01 20:24:00). Le bassin intermédiaire entre les deux stations contribue également significativement aux débits de crue à l'Aqueduc. La période antécédente étant bien chargée en événements pluvieux, l'écoulement est déjà bien soutenu et les réservoirs souterrains bien remplis en début d'événement.

Données hydrométriques fournies par les caméras intelligentes

Les caméras installées sur les sites aval, médian et amont permettent de compléter le réseau de mesure et de surveillance et d'appréhender l'ampleur de l'aléa sur la partie aval du bassin.

Alors que le bas de l'échelle n'a pas été atteint pour le site aval, les hauteurs d'eau ont été suffisamment importantes pour déclencher la mesure de hauteurs et de déclenchement d'alarmes sur les caméras amont et médian.

Afin de disposer des mires virtuelles pour le RETEX, la banque d'images sur les 3 sites a été traitée avec la version 20.02 du moteur de traitement CamFlow. Les franchissements de seuils d'alarmes sont globalement similaires au fonctionnement observé en temps réel mais les mesures peuvent être légèrement différentes. L'échelle virtuelle et l'incrustation des seuils dans l'image aujourd'hui disponibles en temps réel enrichissent cependant considérablement ce retour d'expérience. Les données temps réel brutes peuvent être téléchargées à partir de l'utilisation du mode temps différé de votre accès à l'application Riverboard (<https://tenevia-riverboard.fr>).

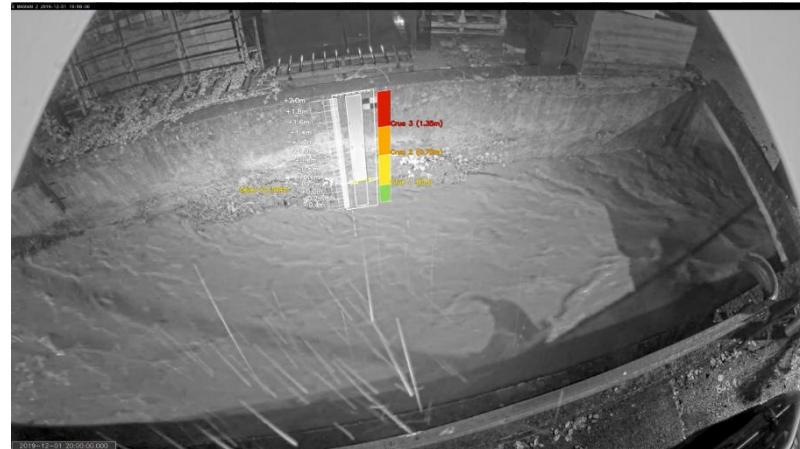


Figure 36 : Hauteur maximale sur le site amont avant la coupure du réseau (time stamp coupure 2019-12-01 20:00:00 UTC)

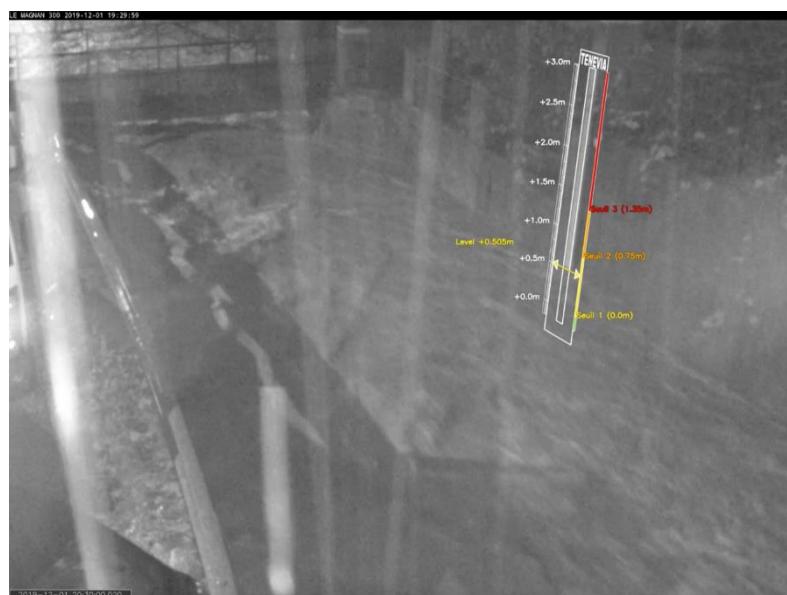


Figure 37 : Hauteur maximale relevée sur le site median



Figure 38 : Hauteur maximale relevée sur le site aval

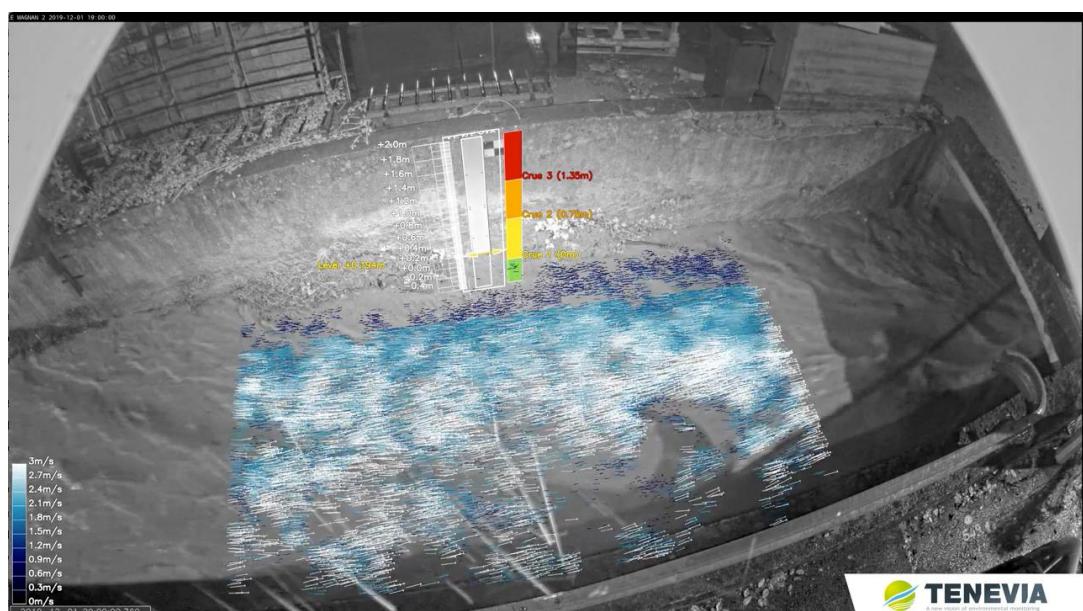


Figure 39 : Champ de vitesses de surface et hauteur mesurés sur le site amont

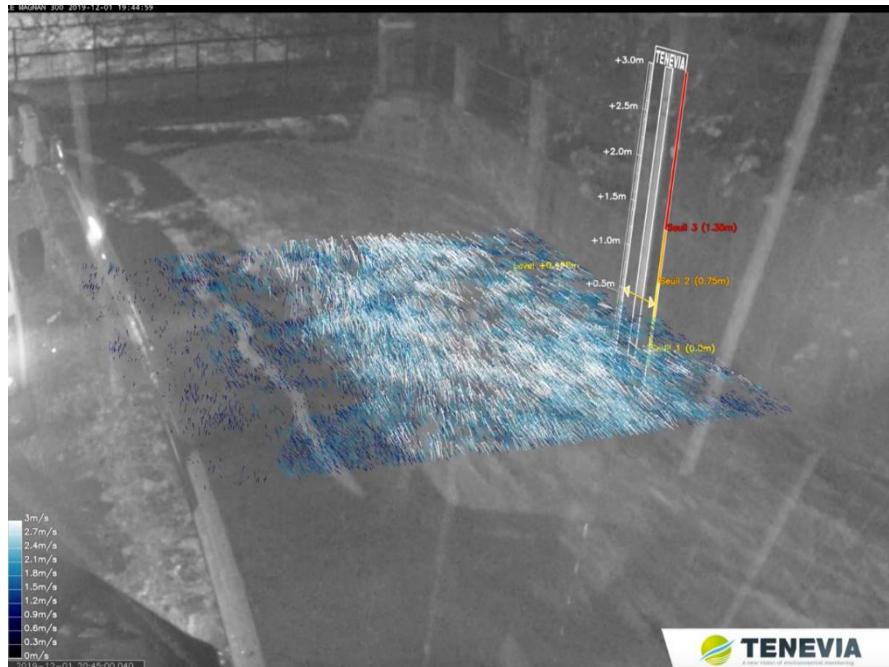


Figure 40 : Champ de vitesse de surface et hauteur mesurés sur le site médian

Des vidéos permettant d'apprécier visuellement les mesures effectuées sont données en annexe de ce rapport au sein des répertoires ressources/videos_hauteurs et ressources/videos_vitesses_display_all. Ils permettent de constater que la mesure de hauteur est globalement satisfaisante et que les vitesses de surface ont pu être mesurées même la nuit à partir de l'éclairage par projecteur infrarouge.

Les figures présentées ci-après (Figure 41 à Figure 46) permettent d'analyser les valeurs numériques des mesures effectuées.

Elles permettent de constater que malgré des conditions d'éclairage difficile, les mesures de vitesses conduisent à des estimations de débits cohérentes sur les deux sites équipés de caméras pour lesquels le bas de l'échelle a été atteint. La mise en eau de l'échelle du site amont est un peu tardive mais une fois ce niveau dépassé les débits sont très cohérents avec ceux mesurés sur le site médian situé environ 1km en aval.

En revanche, les débits de pointe mesurés par les caméras sont environ 3 à 4 fois supérieurs aux débits estimés à partir des courbes de tarage du SAC Magnan. Ceux-ci étant établis sans jaugeages et les résultats obtenus étant tout à fait concordants avec d'autres mesures effectuées sur des périodes diurnes, une révision des relations hauteur-débit du SAC Magnan semble incontournable.

L'analyse de la relation entre la hauteur mesurée et les jaugeages de surface réalisés au cours de la nuit du 01-02 Décembre fait apparaître une tendance très nette mais également une dispersion sur les basses eaux qui semble vraisemblablement liée à un effet

d'hystérésis et/ou un de-tarage (nuages de points distincts pour la montée en crue et la décrue). L'hystérésis pourrait être causé par un contrôle aval variable alors que le de-tarage pourrait être lié aux importantes modifications morphologiques constatées après chaque crue et discutées au cours du COTECH du mois de Novembre 2019. La Figure 46 permet également de constater l'évolution du profil transversal de vitesses avec la hauteur.

La détection de débordement de cunette n'avait pas encore été activée sur le site aval pour cet épisode. Cependant, étant donnée la qualité actuelle des images de nuit, le fonctionnement n'est pour le moment satisfaisant sur les périodes nocturnes. La qualité d'image sera améliorée par la pose de la caméra prévue initialement avec projecteur infrarouge externe.

Problèmes d'horodatage des caméras

L'analyse des données hydrométriques a également fait apparaître les problèmes d'horodatage des caméras déjà soulignés.

La hauteur maximale est relevée à la station caméra médian à 2019-12-01 20:30:00 UTC alors que comme vu précédemment la hauteur maximale du radar du SAC situé en aval est à 2019-12-01 20:24:00 UTC. L'ensemble des caméras sont en avance (de 5 à 7 minutes) sur l'heure UTC et la gestion de la time zone semble quelque peu aléatoire (nouveaux problèmes réglés au passage à l'heure d'hiver).

Pour une raison pour le moment inexpliquée, la caméra amont était en avance d'une heure sur la caméra du médian au cours de l'épisode du 01 Déc 2019. Ce décalage a été compensé pour établir les figures précédentes. Comme préconisé à l'installation, les caméras devraient toutes être réglées en UTC et synchronisées avec un serveur de temps. L'accès à distance par l'équipe TENEVIA pourrait permettre une identification plus rapide des causes de certains problèmes de configuration par le prestataire de la ville ou dysfonctionnements constatés.

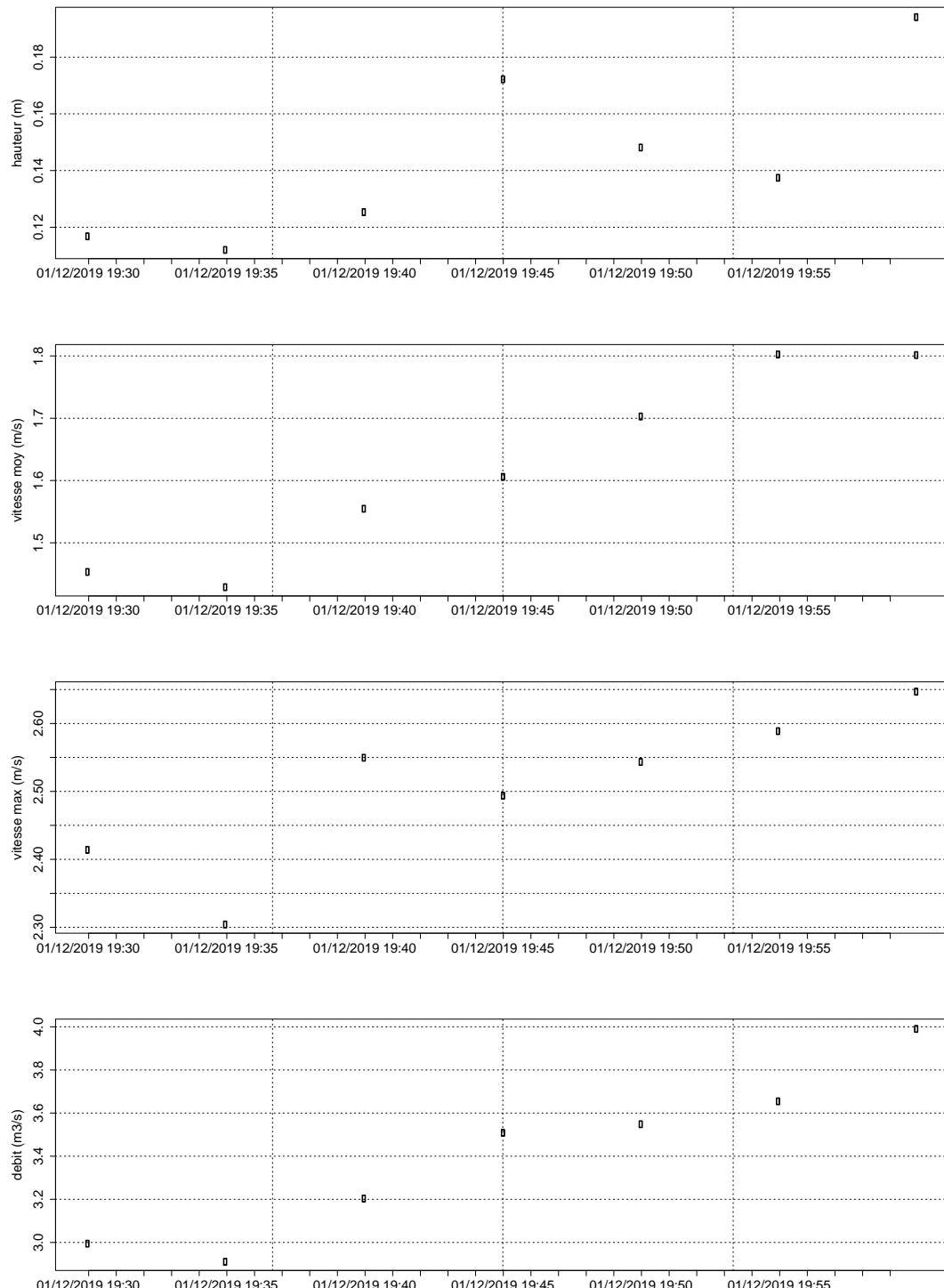


Figure 41 : Chroniques de hauteurs, vitesses de surface et débits au site amont (jusqu'à arrêt de l'envoi d'images lié à l'arrachage de la liaison fibre optique)

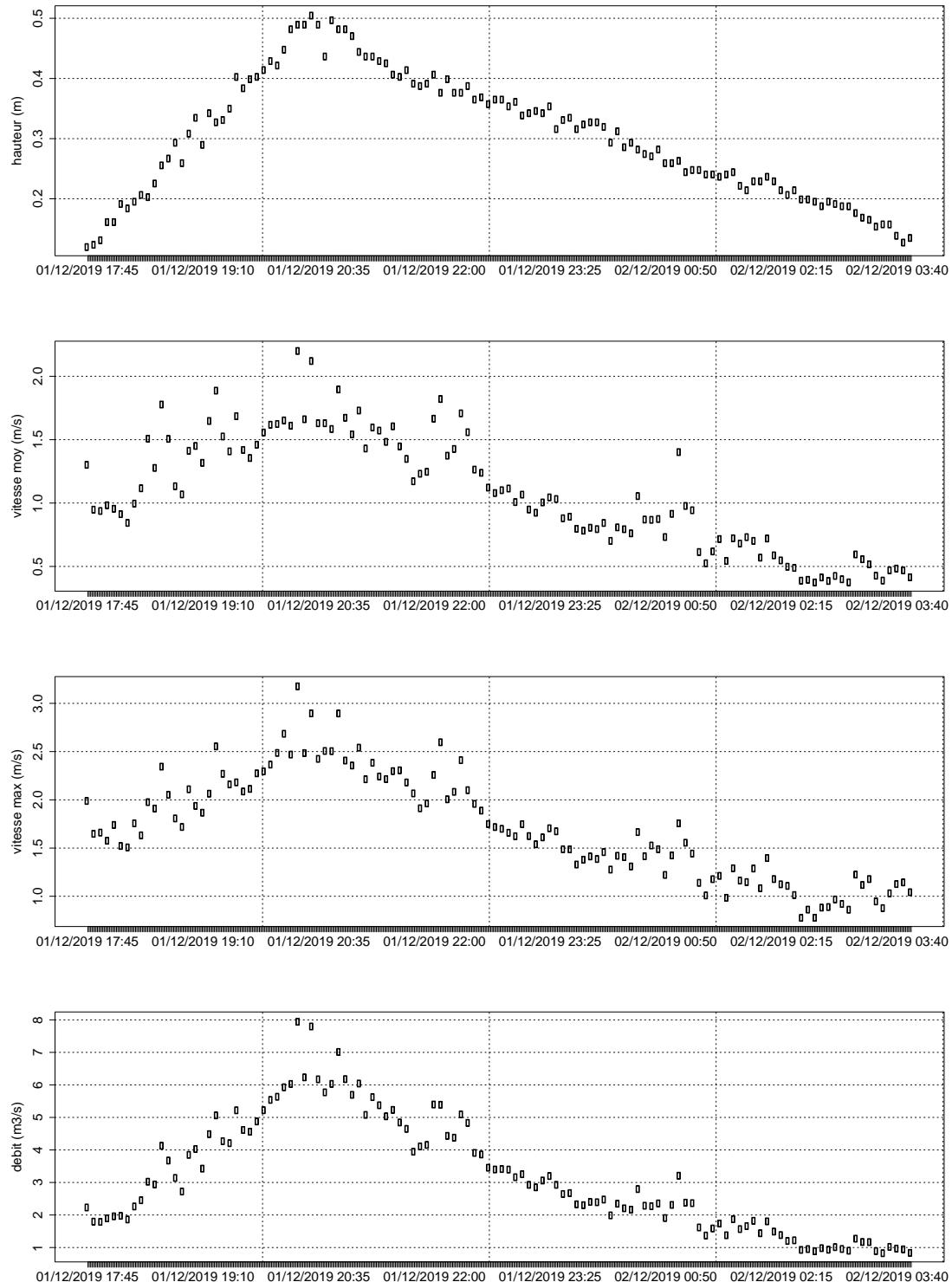


Figure 42 : Chroniques de hauteurs, vitesses de surface et débits mesurés sur la caméra du site median

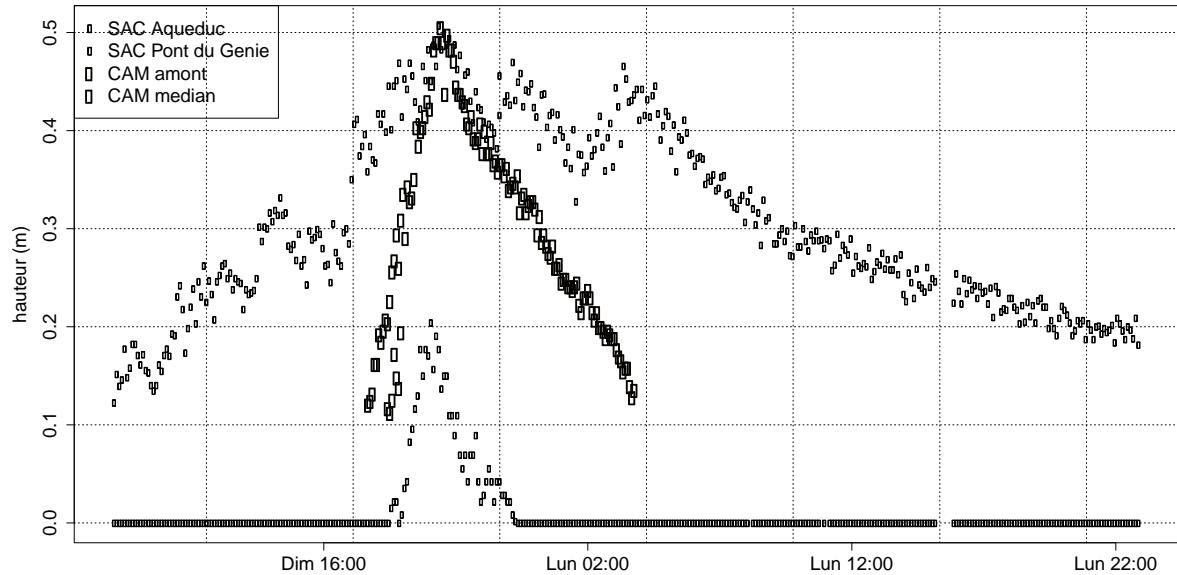


Figure 43 : Comparaison des mesures de hauteur par caméra avec les mesures du SAC Magnan

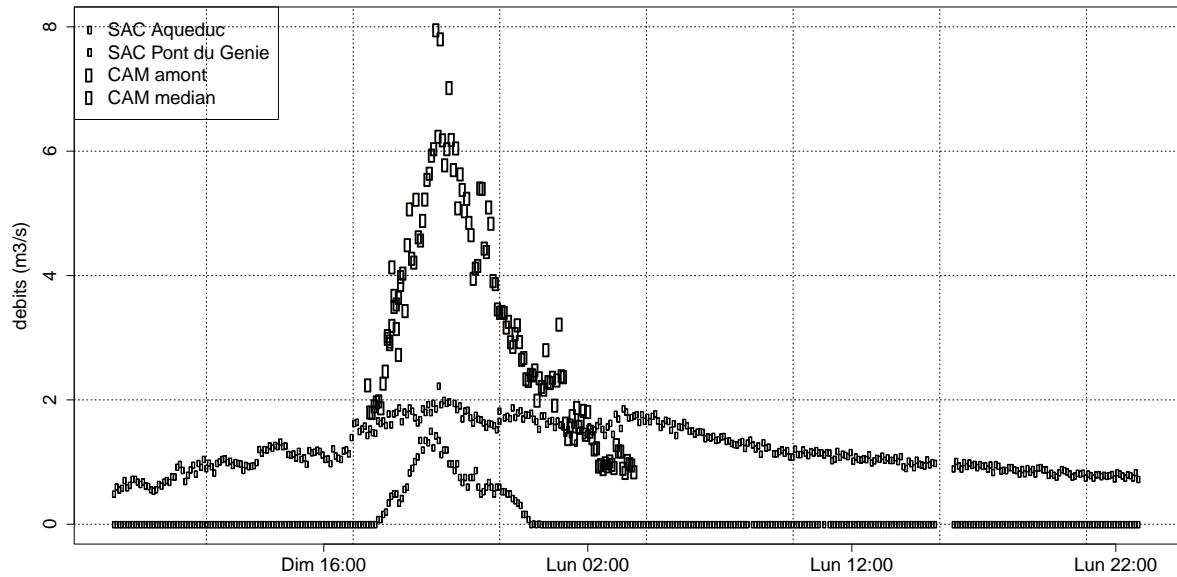


Figure 44 : Comparaison des mesures de débits par caméra avec les débits estimées par courbe de tarage empirique du SAC Magnan

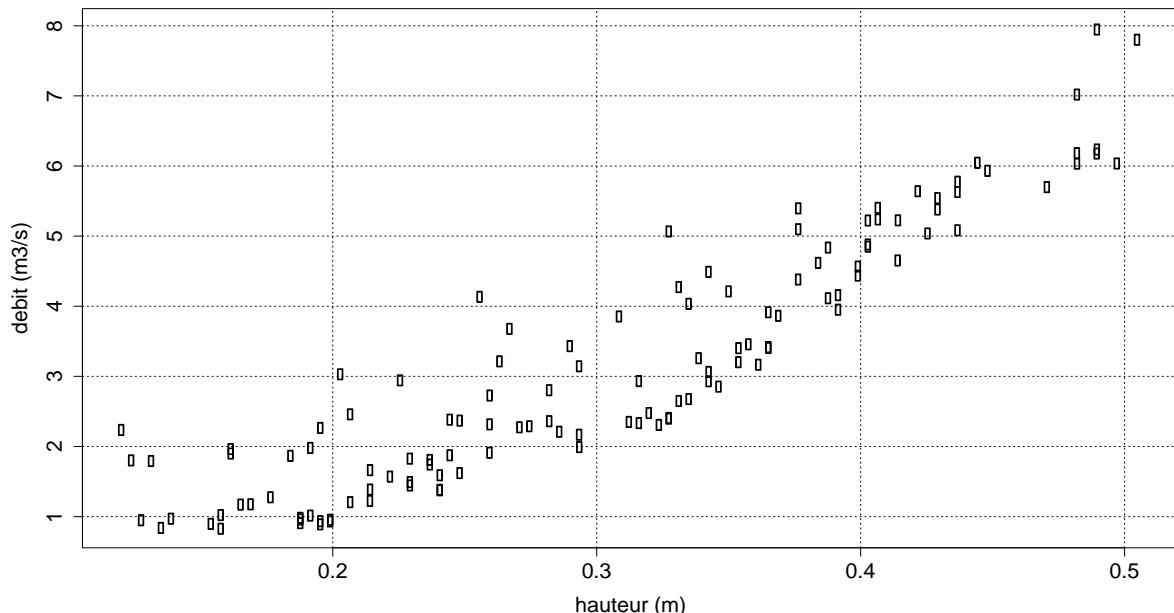
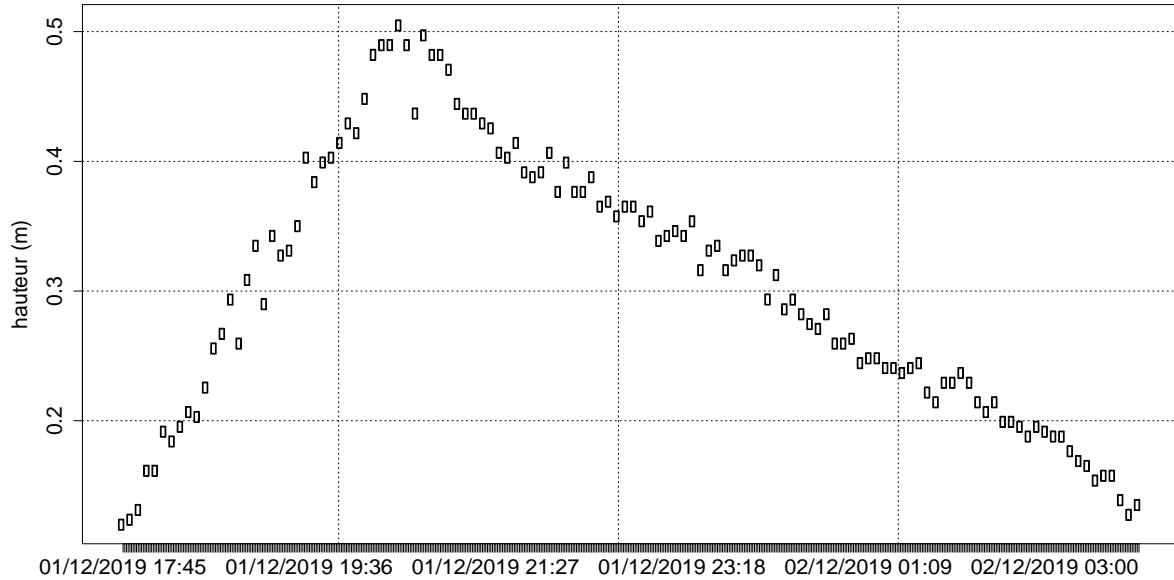


Figure 45 : Relation hauteur débits sur le site médian (bonne cohérence malgré un détarage vraisemblable après le pic de crue)

Le débit pointe estimé par hydrovidéo est de $8m^3/s$, contre $2m^3/s$ estimé par la courbe de tarage établie préalablement de manière théorique et implémentée dans le SAC. L'hydrovidéo permet de d'affranchir de l'organisation d'une campagne temporaire de jaugeage, et de ses aléas, en cours d'évènement, de nuit en week-end.

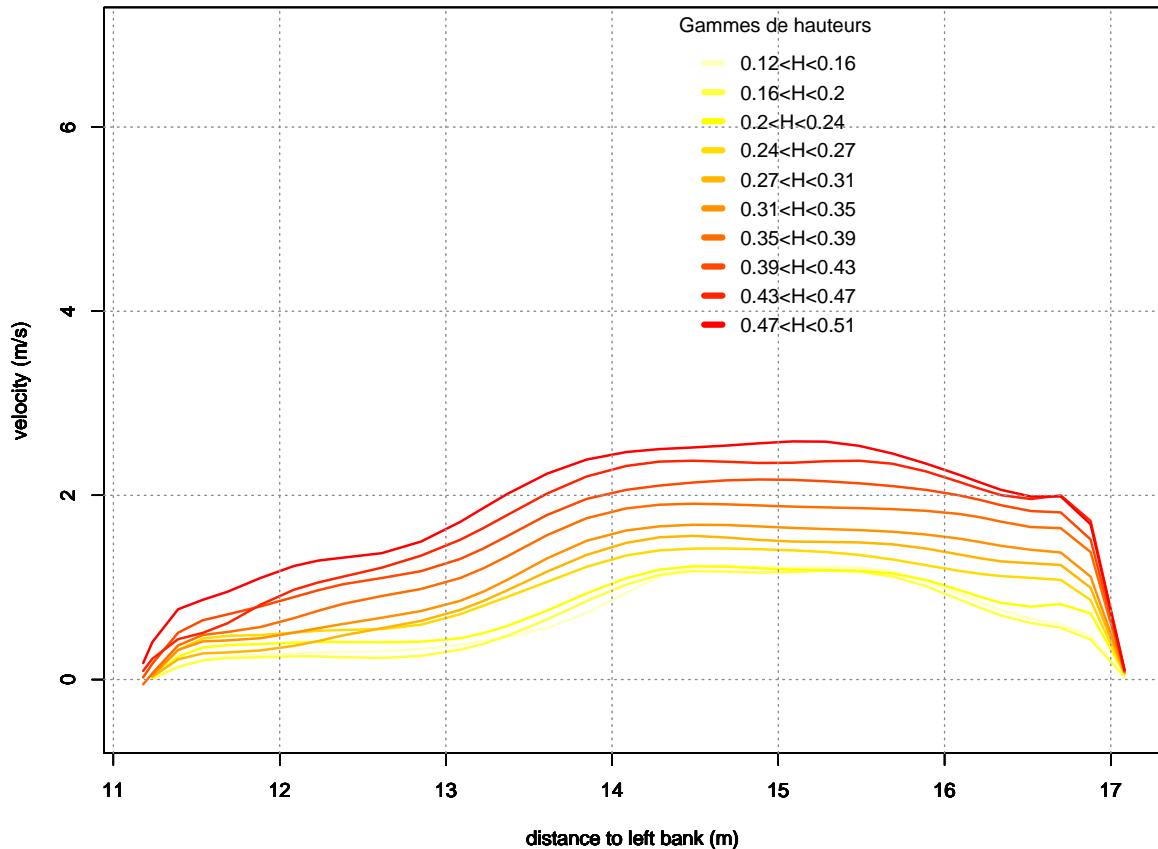


Figure 46 : Evolution du profil transversal de vitesses de surface mesuré en fonction de la hauteur d'eau sur le site médian

Prévisions hydrométéorologiques à 1H30 et évaluation

Rappel de la chaîne de prévision hydrométéorologique et des seuils d'alerte

Pour rappel, la chaîne de prévision hydrométéorologique mise en place sur le bassin versant du Magnan est caractérisée par les éléments suivants :

- la mesure et la prévision de précipitations à partir du radar météo, pas de temps de 5 minutes, prévision par advection jusqu'à un horizon de 1h30 ;
- une procédure intégrant les données des postes pluviométriques afin de détecter et corriger les éventuels écarts avec les données radar ;
- un modèle hydrologique spatialisé fonctionnant en continu¹ et réalisant toutes les 5 minutes des prévisions jusqu'à un horizon de 1h30 (2h de simulation, 30min dans le passé et 1h30 dans le futur) ;

¹ par opposition à événementiel pour éviter les problèmes initialisation en début d'épisode

- un calage initial du modèle a été réalisé avec les données de pluie et de débit du SAC Magnan (et donc les courbes de tarage du SAC Magnan) ;
- une procédure d'assimilation utilisant les écarts avec les mesures hydrométriques afin de corriger en temps réel certains des stocks et/ou des paramètres du modèle avec une régularisation pour assurer la stabilité ;
- une assimilation pour le moment des débits estimés à partir des mesures du radar de hauteur du SAC installé à l'Aqueduc amont (avec la courbe de tarage du SAC).

Il est important de noter que pour le moment, seul le radar aval du SAC (à l'Aqueduc) est utilisé pour la procédure de réajustement par assimilation. En effet, elles sont disponibles pour une gamme de hauteur plus large que celles des caméras et des courbes de tarage des caméras venaient d'être établies et présentées au COTECH du 28/11/2019.

Les seuils de mesures de hauteur et de prévision de débits ont été fixés par la DPGR et le service Eaux Pluviales et GEMAPI avec l'assistance de TENEVIA (Figure 47 à Figure 49). La correspondance hauteur-débits avait été approchée et extrapolée à l'aide des premières mesures de débits. Celle-ci devra être réactualisée avec les mises à jour de courbe de tarage des caméras.

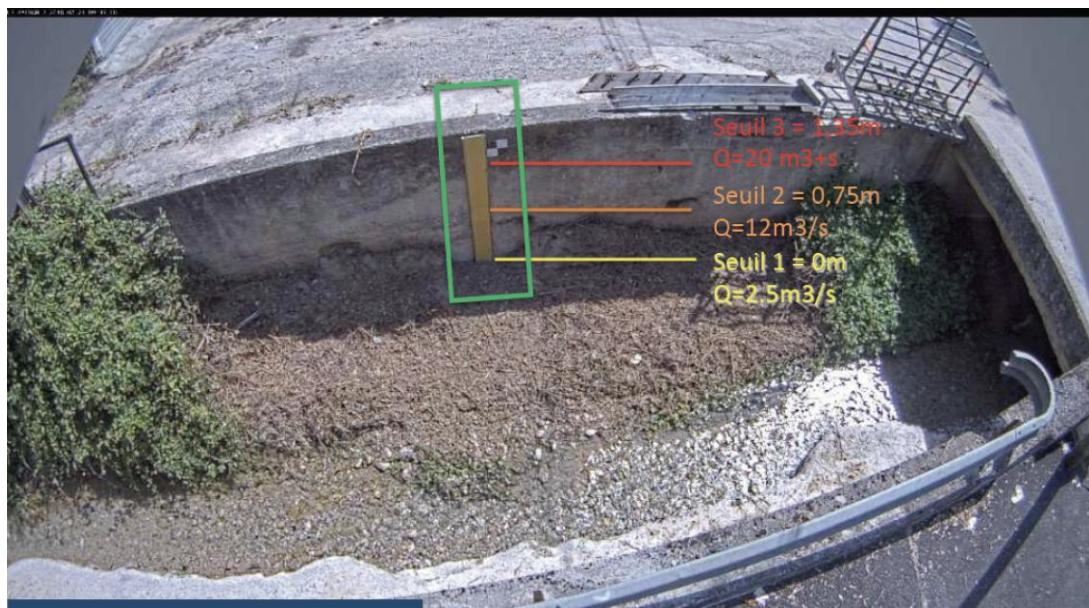


Figure 47 : Seuils de mesure de hauteur et de prévision de débit sur le site amont



Figure 48 : Seuils de mesure de hauteur et de prévision de débits sur le site médian



Figure 49 : Seuils de mesure de hauteur et de prévision de débits pour le site aval

Seuil d'alerte	Amont		Médian		Aval	
	Hauteur	Débit	Hauteur	Débit	Hauteur	Débit
Seuil 3	1,35 m	20 m ³ /s	1,35 m	30 m ³ /s	3 m	120m ³ /s
Seuil 2	0,75m	12 m ³ /s	0,75m	12 m ³ /s	2,15m	81m ³ /s
Seuil 1	0,0 m	2,5 m ³ /s	0,0 m	1,5 m ³ /s	1,15m	10m ³ /s

Tableau 3 : Synthèse des seuils d'alerte aux 3 stations

Prévisions et leurs évolutions au fil de l'évènement

Les phases-clés des prévisions émises au cours de l'épisode sont décrites de la Figure 50 à la Figure 55. Les prévisions sont disponibles à 5 points du bassin (dont les 3 caméras), mais nous analysons ici les prévisions émises à l'aval (proche caméra aval et radar aqueduc).

A partir des prévisions de précipitations émises par advection (en bleu clair au-delà de t=0), une montée significative des débits est prévue dès 16h30 UTC. A 16h55 les prévisions de pluie entraînent des prévisions de débits encore plus importants alors qu'à 17h10 on prévoit une montée en crue beaucoup moins importante. Les prévisions de débits repartent à la hausse à 18h30 avec un pic notable prévu vers 10 heures. La prévision émise à 19h30 réduit considérablement l'amplitude de la montée et décale le pic vers 20h30-21h.

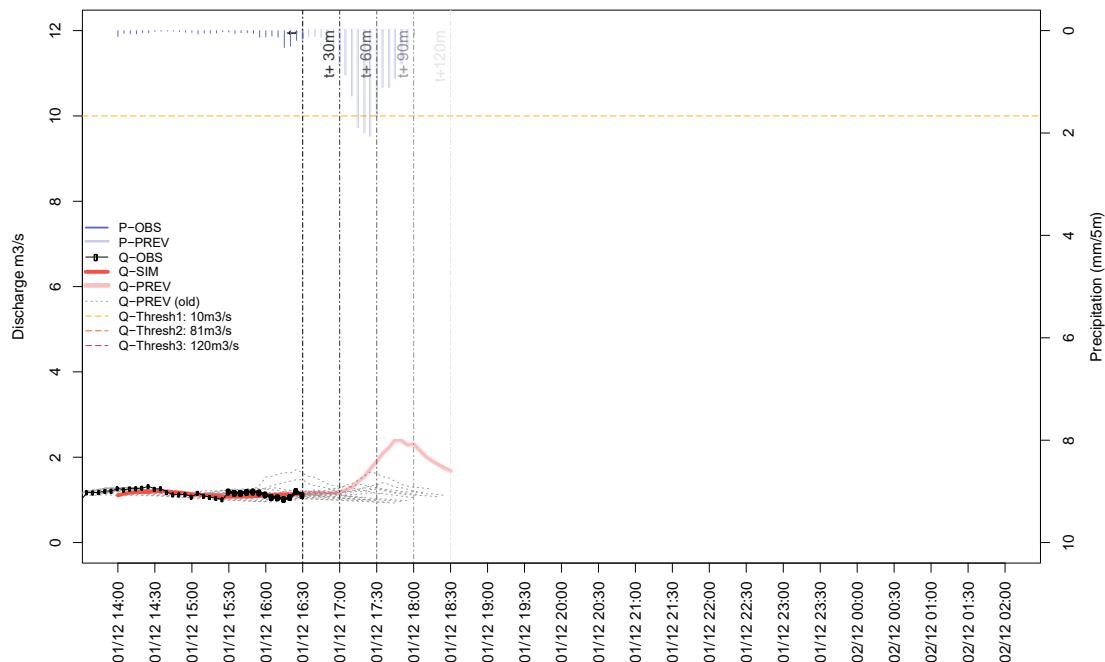


Figure 50 : Prévision HydroCore Magna naval émise à 16h30 UTC

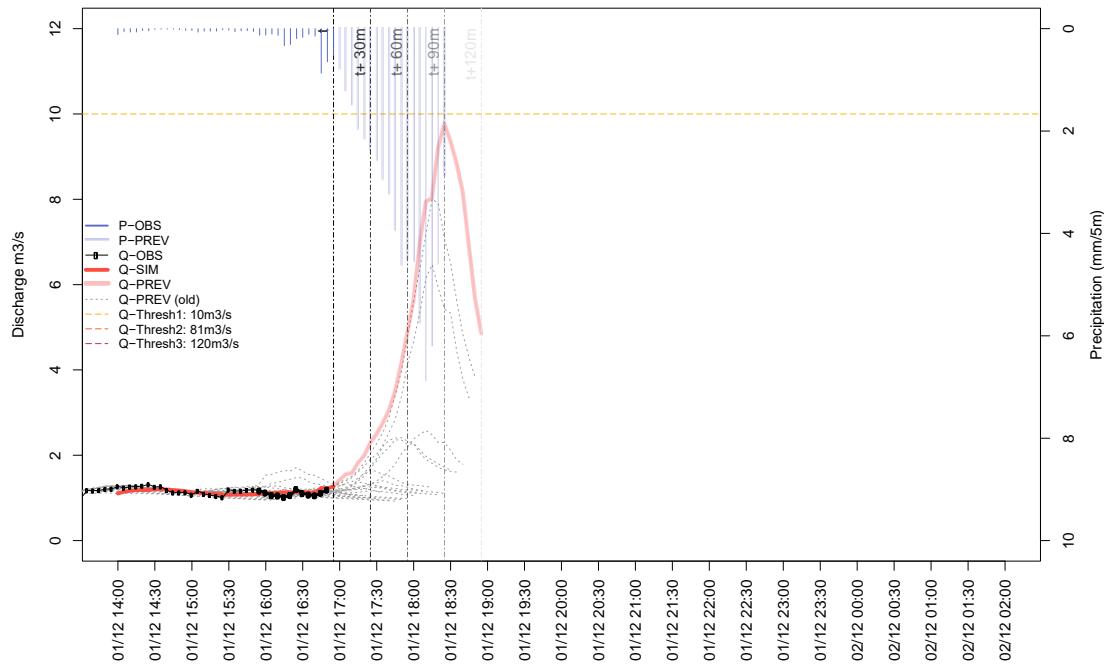


Figure 51 : Prévision HydroCore Magnanaval émise à 16h55 UTC

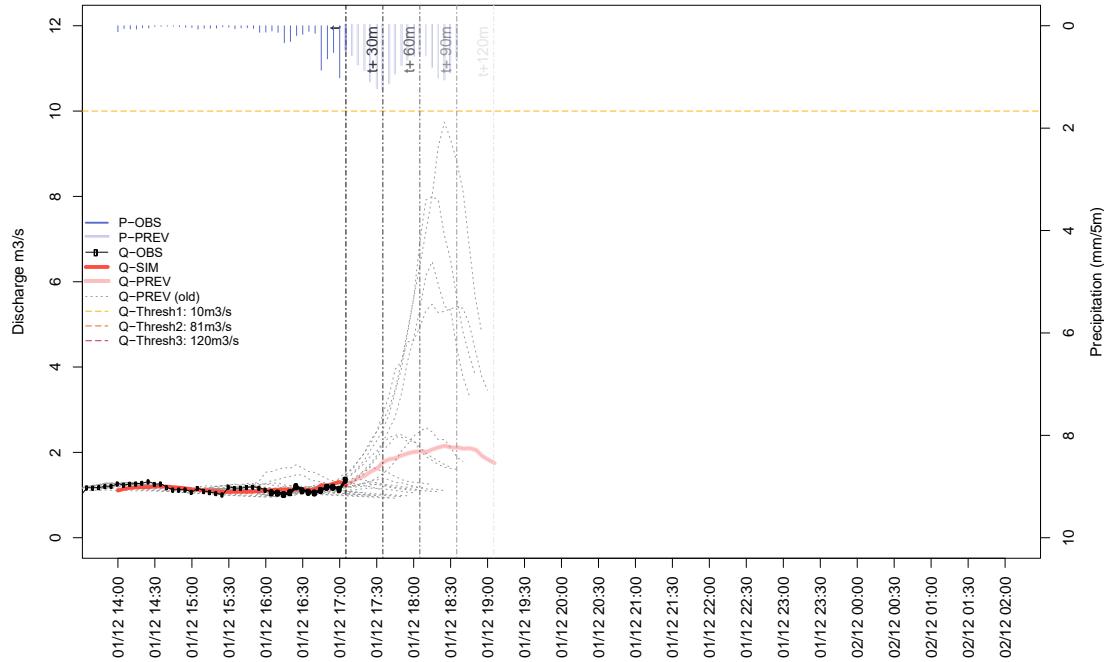


Figure 52 : Prévision HydroCore Magnanaval émise à 17h10

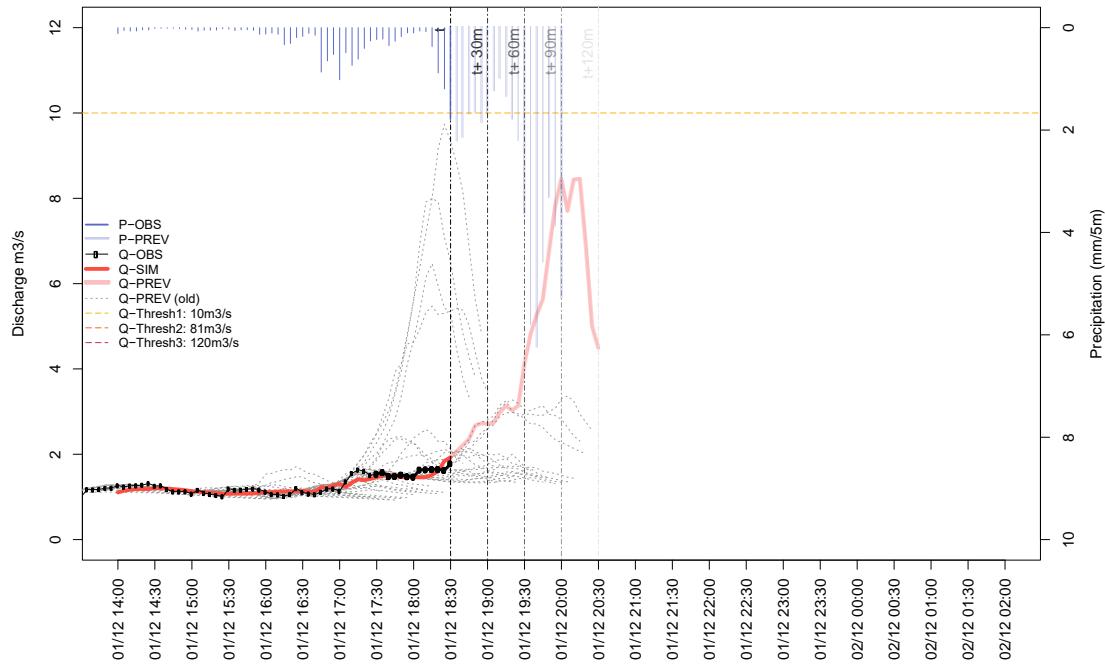


Figure 53 : Prévision HydroCore Magnanaval émise à 18h30 UTC

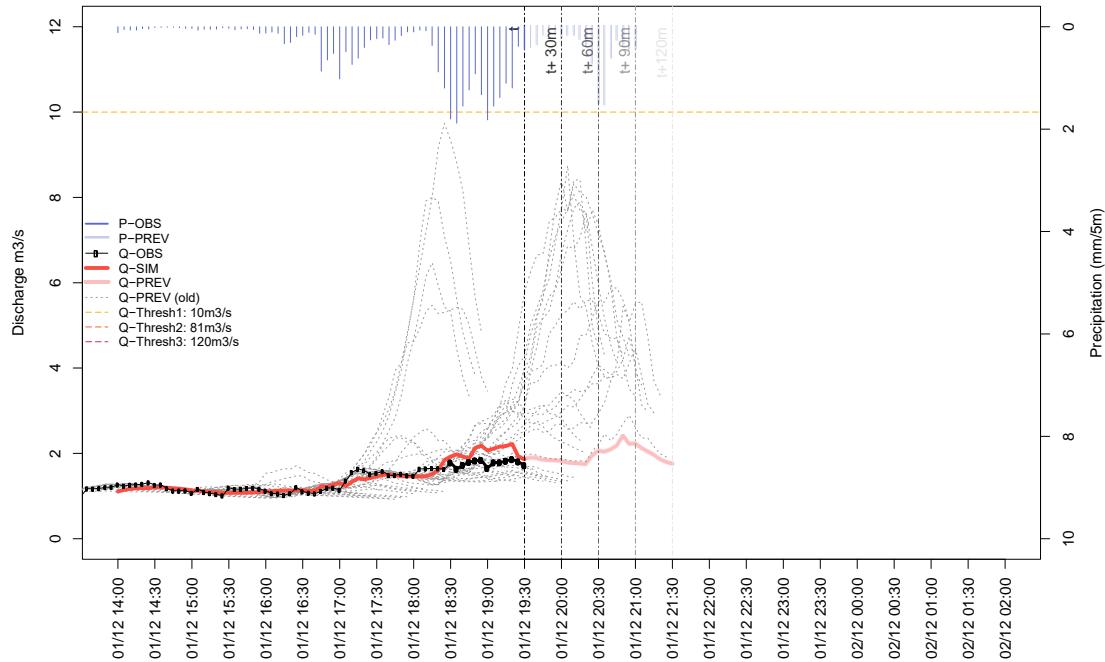


Figure 54 : Prévision HydroCore Magnanaval émise à 19h30

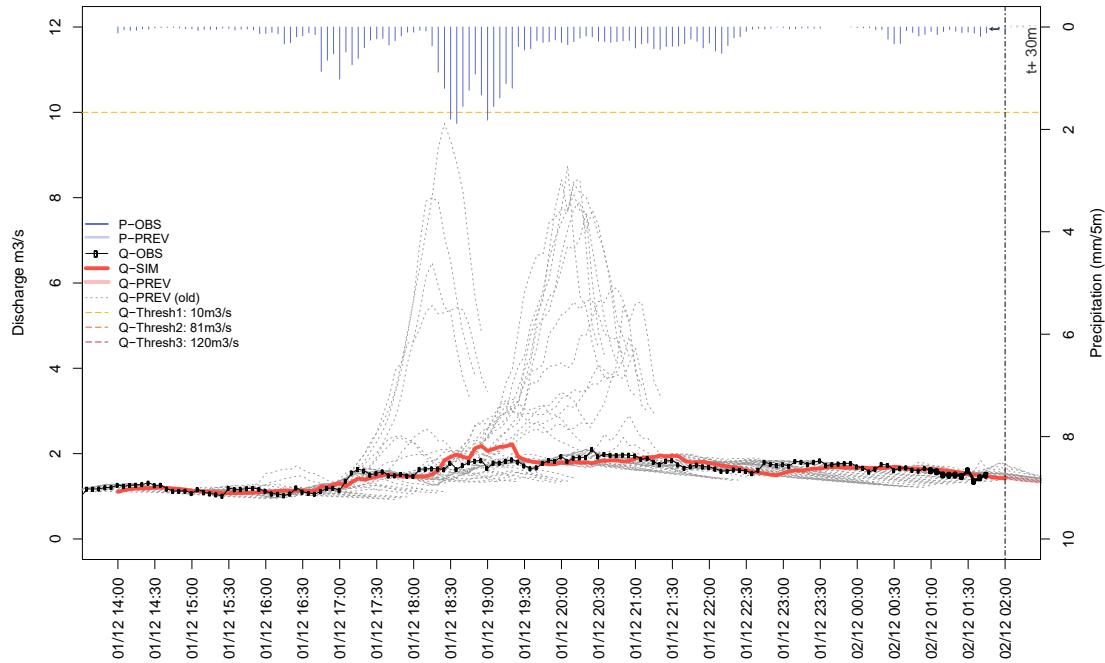


Figure 55 : Prévision HydroCore complète à l'Aqueduc (camera aval)

Les prévisions émises à tous les pas de temps et pour les 2 autres points où sont installés des caméras sont disponibles en annexe dans le répertoire ressources/evt_2019-12-01_previs_hydro. Les prévisions sont également mises à disposition pour les 3 autres épisodes de cet automne ayant généré un débordement de cunette.

Du point de vue de la prévision hydrométéorologique, l'événement du 01-02 Déc 2019 est caractérisé par :

- des alertes déclenchées dès 16h45 pour le site amont et 16h30 sur le site médian alors que les seuils de mesures de hauteur ont été franchis à 17h45 sur le site médian et 18h30 sur le site amont ;
- des prévisions de débits très fluctuantes au plus fort de l'épisode ;
- un horizon plutôt limité de la prévision de pluie et une certaine instabilité liée au processus d'advection et aux corrections effectuées sur la lame d'eau à partir des décalages constatées avec les postes pluviométriques ;
- un écrêtement des débits de crue à cause de l'assimilation de débits fortement sous-estimés car issus de la courbe de tarage du SAC Magnan (i.e. débits radar Aqueduc).

Des conclusions similaires peuvent être émises pour les 3 autres épisodes de l'automne même si l'instabilité des prévisions est plus importante pour ceux du mois de Décembre. Malgré les difficultés liées aux incertitudes inhérentes à la prévision (notamment sur les prévisions et mesures de précipitations), la chaîne de prévision permet tout de même

d'anticiper l'aléa avec un horizon de prévision variable en fonction des épisodes mais toujours un peu au-delà du temps de réponse du bassin.

Remontée des informations et émissions d'alerte sur le superviseur

Cette crue n'a pas généré de débordement du Magnan, susceptible d'appeler des mesures spécifiques de gestion de crise. L'illustration ci-après représente l'historique du superviseur, généré par les prévisions le jour de la crue.

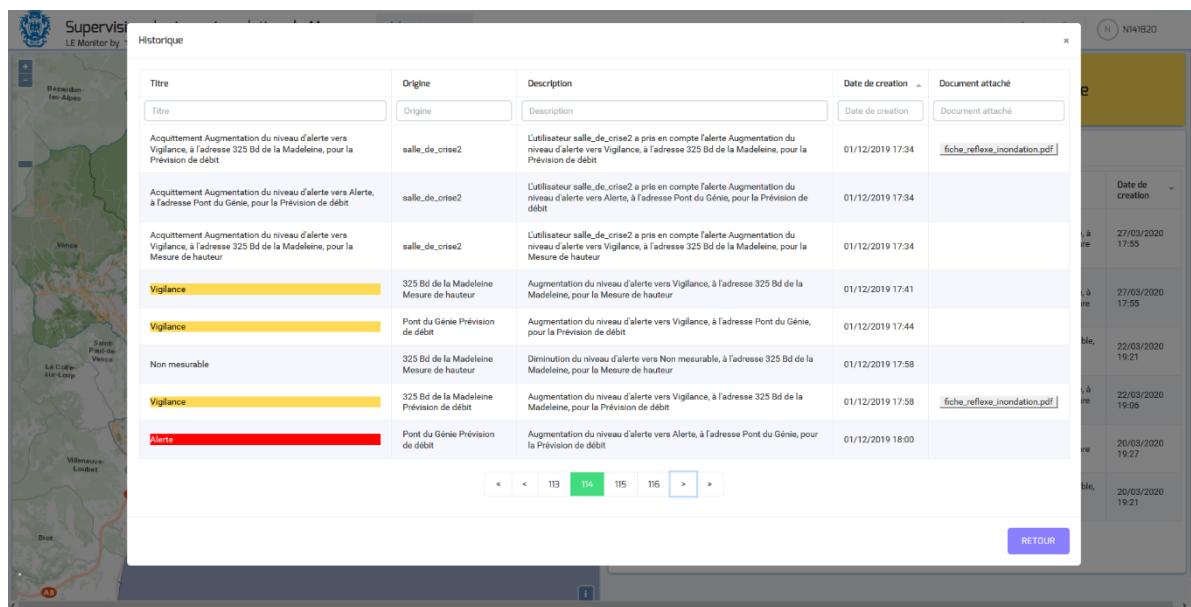


Figure 56 : Visuel de l'historique du Superviseur Magnan

Perspectives d'amélioration

Les principales perspectives d'amélioration peuvent être listées de la façon suivante :

- révision de la stratégie de correction des lames d'eau radar ;
- révision du calage initial du modèle biaisé par la courbe de tarage du SAC ;
- consolidation de l'ensemble des relations hauteur-débits et assimilation de débits plus cohérents ;
- ajustement des seuils d'alerte et des actions qui en découlent.

L'ensemble de points évoqués fait partie des opérations de maintenance et d'amélioration continue prévus au cours de la période 2020-2021.

Cette période sera également mise à profit pour accompagner la prise en main du superviseur par l'ensemble des ingénieurs d'astreinte de la Métropole Nice Côte d'Azur.

6.1.2. Les modèles de données

Les observations Météo

```
{
  "id": "WeatherObserved:06088001",
  "type": "WeatherObserved",
  "address": {
    "type": "PostalAddress",
    "value": {
      "postalCode": "06088001",
      "addressLocality": "Nice",
      "addressCountry": "France"
    },
    "metadata": {}
  },
  "dateObserved": {
    "type": "DateTime",
    "value": "2020-01-07T10:00:00.00Z",
    "metadata": {}
  },
  "dewPoint": {
    "type": "Number",
    "value": 3,
    "metadata": {
      "timestamp": {
        "type": "DateTime",
        "value": "2020-01-07T10:00:00.00Z"
      },
      "unitCode": {
        "type": "Text",
        "value": "CEL"
      }
    }
  },
  "humidity": {
    "type": "Number",
    "value": 60,
    "metadata": {
      "timestamp": {
        "type": "DateTime",
        "value": "2020-01-07T10:00:00.00Z"
      },
      "unitCode": {
        "type": "Text",
        "value": "P1"
      }
    }
  },
  "location": {
    "type": "geo:json",
    "value": {
      "type": "Point",
      "coordinates": [
        7.208333,
        43.733333
      ]
    }
  }
}
```

```

        43.648333,
        2
    ],
},
"metadata": {}
},
"precipitation": {
    "type": "Number",
    "value": 0,
    "metadata": {
        "timestamp": {
            "type": "DateTime",
            "value": "2020-01-07T10:00:00.00Z"
        },
        "unitCode": {
            "type": "Text",
            "value": "MMT"
        }
    }
},
"pressure": {
    "type": "Number",
    "value": 1025.3,
    "metadata": {
        "timestamp": {
            "type": "DateTime",
            "value": "2020-01-07T10:00:00.00Z"
        },
        "unitCode": {
            "type": "Text",
            "value": "A97"
        }
    }
},
"temperature": {
    "type": "Number",
    "value": 10.4,
    "metadata": {
        "timestamp": {
            "type": "DateTime",
            "value": "2020-01-07T10:00:00.00Z"
        },
        "unitCode": {
            "type": "Text",
            "value": "CEL"
        }
    }
},
"windDirection": {
    "type": "Number",
    "value": 340,
    "metadata": {
        "timestamp": {
            "type": "DateTime",
            "value": "2020-01-07T10:00:00.00Z"
        },
        "unitCode": {

```

```
        "type": "Text",
        "value": "DD"
    }
}
},
"windDirectionMax": {
    "type": "Number",
    "value": 340,
    "metadata": {
        "timestamp": {
            "type": "DateTime",
            "value": "2020-01-07T10:00:00.00Z"
        },
        "unitCode": {
            "type": "Text",
            "value": "DD"
        }
    }
},
"windSpeed": {
    "type": "Number",
    "value": 4.4,
    "metadata": {
        "timestamp": {
            "type": "DateTime",
            "value": "2020-01-07T10:00:00.00Z"
        },
        "unitCode": {
            "type": "Text",
            "value": "MTS"
        }
    }
},
"windSpeedMax": {
    "type": "Number",
    "value": 6.3,
    "metadata": {
        "timestamp": {
            "type": "DateTime",
            "value": "2020-01-07T10:00:00.00Z"
        },
        "unitCode": {
            "type": "Text",
            "value": "MTS"
        }
    }
}
}
```

Les prévisions Météo

```

"address": {
  "type": "PostalAddress",
  "value": {
    "postalCode": "06088",
    "addressLocality": "Nice",
    "addressCountry": "France"
  },
  "metadata": {}
},
"cloudCover": {
  "type": "Number",
  "value": 3,
  "metadata": {
    "comment": {
      "type": "Text",
      "value": "See MeteoFrance correlation table"
    },
    "timestamp": {
      "type": "DateTime",
      "value": "2020-01-07T10:00:00.00Z"
    }
  }
},
"dateForecast": {
  "type": "DateTime",
  "value": "2020-01-07T10:00:00.00Z",
  "metadata": {}
},
"dateGenerated": {
  "type": "DateTime",
  "value": "2020-01-07T11:00:00.00Z",
  "metadata": {}
},
"gustWindSpeed": {
  "type": "Number",
  "value": 0,
  "metadata": {
    "timestamp": {
      "type": "DateTime",
      "value": "2020-01-07T10:00:00.00Z"
    },
    "unitCode": {
      "type": "Text",
      "value": "KMH"
    }
  }
},
"humidity": {
  "type": "Number",
  "value": 60,
  "metadata": {
    "timestamp": {
      "type": "DateTime",
      "value": "2020-01-07T10:00:00.00Z"
    },
    "unitCode": {
      "type": "Text",
      "value": "Percent"
    }
  }
}

```

```

        "value": "P1"
    }
}
},
"location": {
    "type": "geo:json",
    "value": {
        "type": "Point",
        "coordinates": [
            7.268333,
            43.701944,
            0
        ]
    },
    "metadata": {}
},
"precipitation": {
    "type": "Number",
    "value": 0,
    "metadata": {
        "timestamp": {
            "type": "DateTime",
            "value": "2020-01-07T10:00:00.00Z"
        },
        "unitCode": {
            "type": "Text",
            "value": "MMT"
        }
    }
},
"precipitation3h": {
    "type": "Number",
    "value": 0,
    "metadata": {
        "timestamp": {
            "type": "DateTime",
            "value": "2020-01-07T10:00:00.00Z"
        },
        "unitCode": {
            "type": "Text",
            "value": "MMT"
        }
    }
},
"rainSnowAltitudeLimit": {
    "type": "Number",
    "value": 2000,
    "metadata": {
        "timestamp": {
            "type": "DateTime",
            "value": "2019-12-20T10:00:00.00Z"
        },
        "unitCode": {
            "type": "Text",
            "value": "MTR"
        }
    }
}
}

```

```

},
"temperature": {
  "type": "Number",
  "value": 10,
  "metadata": {
    "timestamp": {
      "type": "DateTime",
      "value": "2020-01-07T10:00:00.00Z"
    },
    "unitCode": {
      "type": "Text",
      "value": "CEL"
    }
  }
},
"temperatureC": {
  "type": "Number",
  "value": 12,
  "metadata": {
    "timestamp": {
      "type": "DateTime",
      "value": "2020-01-07T10:00:00.00Z"
    },
    "unitCode": {
      "type": "Text",
      "value": "CEL"
    }
  }
},
"temperatureD": {
  "type": "Number",
  "value": 3,
  "metadata": {
    "timestamp": {
      "type": "DateTime",
      "value": "2020-01-07T10:00:00.00Z"
    },
    "unitCode": {
      "type": "Text",
      "value": "CEL"
    }
  }
},
"windDirection": {
  "type": "Number",
  "value": 15,
  "metadata": {
    "timestamp": {
      "type": "DateTime",
      "value": "2020-01-07T10:00:00.00Z"
    },
    "unitCode": {
      "type": "Text",
      "value": "DD"
    }
  }
},
}

```

```

"windSpeed": {
  "type": "Number",
  "value": 10,
  "metadata": {
    "timestamp": {
      "type": "DateTime",
      "value": "2020-01-07T10:00:00.00Z"
    },
    "unitCode": {
      "type": "Text",
      "value": "KMH"
    }
  }
}
}

```

Les observations des fleuves

```

{
  "id": "WaterObserved:SACMAG01",
  "type": "WaterObserved",
  "address": {
    "type": "PostalAddress",
    "value": {
      "streetAddress": "209 boulevard de la Madeleine",
      "addressLocality": "Nice",
      "addressCountry": "France"
    },
    "metadata": {
      "timestamp": {
        "type": "DateTime",
        "value": "2019-04-08T07:42:30.00Z"
      }
    }
  },
  "data": {
    "type": "StructuredValue",
    "value": {
      "fullID": {
        "type": "Text",
        "value": "ASSAIN-000NCA-SACMAG01"
      },
      "sensorType": {
        "type": "Text",
        "value": "LIMNI"
      }
    },
    "metadata": {
      "timestamp": {
        "type": "DateTime",
        "value": "2019-04-08T07:42:30.00Z"
      }
    }
  }
}

```

```

"dateObserved": {
  "type": "DateTime",
  "value": "2020-01-07T10:48:00.00Z",
  "metadata": {}
},
"flow": {
  "type": "Number",
  "value": 0,
  "metadata": {
    "timestamp": {
      "type": "DateTime",
      "value": "2020-01-07T10:48:00.00Z"
    },
    "unitCode": {
      "type": "Text",
      "value": "MQS"
    }
  }
},
"level": {
  "type": "Number",
  "value": 0.071042039,
  "metadata": {
    "timestamp": {
      "type": "DateTime",
      "value": "2020-01-07T10:48:00.00Z"
    },
    "unitCode": {
      "type": "Text",
      "value": "MTR"
    }
  }
},
"location": {
  "type": "geo:json",
  "value": {
    "type": "Point",
    "coordinates": [
      7.229513563,
      43.70895543
    ]
  },
  "metadata": {
    "timestamp": {
      "type": "DateTime",
      "value": "2019-04-08T07:42:30.00Z"
    }
  }
}
}

```

Les prévisions des fleuves

{

La cooperazione al cuore del Mediterraneo
 La coopération au coeur de la Méditerranée

```

"id": "WaterForecast:ENVIRO-PROTER-MagnanAspremont",
"type": "WaterForecast",
"address": {
  "type": "PostalAddress",
  "value": {
    "streetAddress": "Route de la Sirole",
    "postalCode": "06670",
    "addressLocality": "Colomars",
    "addressCountry": "FR"
  },
  "metadata": {}
},
"dataProvider": {
  "type": "Text",
  "value": "TENEVIA HydroCore",
  "metadata": {}
},
"dateIssued": {
  "type": "DateTime",
  "value": "2019-12-11T11:34:04.00Z",
  "metadata": {}
},
"flow": {
  "type": "Number",
  "value": 0.204063212,
  "metadata": {
    "TimeInstant": {
      "type": "Text",
      "value": "2019-12-11T11:34:00Z"
    },
    "unitCode": {
      "type": "Text",
      "value": "MQS"
    }
  }
},
"location": {
  "type": "geo:json",
  "value": {
    "type": "Point",
    "coordinates": [
      7.2430585,
      43.7536635
    ]
  },
  "metadata": {}
},
"name": {
  "type": "Text",
  "value": "Prévision de débit instant t + 60 min",
  "metadata": {}
},
"source": {
  "type": "Text",
  "value": "http://...org",
  "metadata": {}
},

```

```

"validFrom": {
  "type": "DateTime",
  "value": "2019-12-11T11:25:00.00Z",
  "metadata": {}
},
"validTo": {
  "type": "DateTime",
  "value": "2019-12-11T12:25:00.00Z",
  "metadata": {}
},
"validity": {
  "type": "Text",
  "value": "2019-12-11T11:25:00.00/2019-12-11T12:25:00.00",
  "metadata": {}
}
}
}

```

Les Alertes

```

{
  "id": "Alert:Observation-MagnanAcqueducAmont",
  "type": "Alert",
  "alertSource": {
    "type": "Text",
    "value": "TENEVIA CamFlow",
    "metadata": {}
  },
  "category": {
    "type": "Text",
    "value": "weather",
    "metadata": {}
  },
  "dateIssued": {
    "type": "DateTime",
    "value": "2019-04-10T07:51:00.00Z",
    "metadata": {}
  },
  "description": {
    "type": "Text",
    "value": "Pas de débordement de cunette",
    "metadata": {}
  },
  "location": {
    "type": "geo:json",
    "value": {
      "type": "Point",
      "coordinates": [
        7.2430585,
        43.7536635
      ]
    },
    "metadata": {}
  },
  "severity": {
    "type": "Text",
    "value": "informational",
    "metadata": {}
  }
}
}

```

```
"metadata": {},
},
"subCategory": {
  "type": "Text",
  "value": "floodRisk",
  "metadata": {}
}
}
```