



**PRÉFET
DE LA RÉGION
RÉUNION**

*Liberté
Égalité
Fraternité*

INRAE

Hydris
hydrologie

VIGICRUES RÉUNION

PRÉVISION DES CRUES EN MILIEU MONTAGNEUX SOUS CLIMAT TROPICAL : EXEMPLE DE LA RÉUNION

BABY Florent ¹, BOUJARD Patrick ¹, MARTEL Stéphane ¹, ROULENQ Anthony ¹, VILLANI David ¹, ORGANDE Didier ², JAVELLE Pierre ³, TILMANT François ⁴, PERRIN Charles ⁴

¹ DEAL Réunion/SPRINR/CVH, Saint-Denis, La Réunion, France

² HYDRIS hydrologie, Montferrier-sur-Lez, France

³ Université Aix-Marseille, INRAE, UR RECOVER, Aix-en-Provence, France

⁴ Université Paris Saclay, INRAE, UR HYCAR, Antony, France

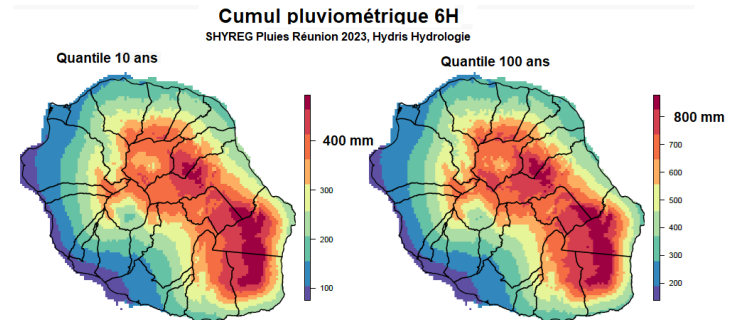
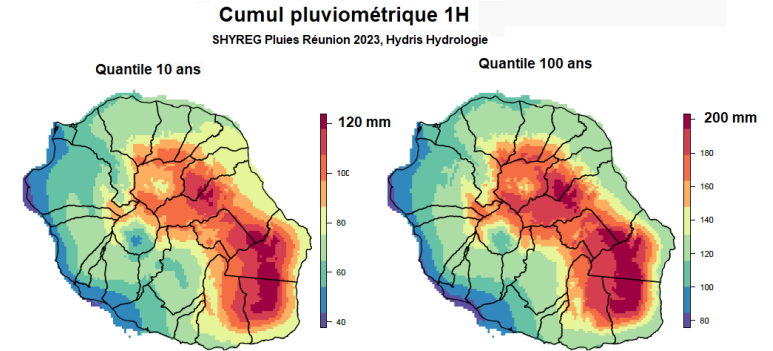
Prévision des crues et des inondations – Avancées, valorisation et perspectives

Jeudi 30 Novembre 2023



- 1. Contexte de La Réunion : hydro-météorologie et vigilance crues**
- 2. Stratégie de la CVH Réunion pour la prévision des crues**
- 3. Développement des outils de prévision et application opérationnelle**
- 4. Perspectives**

- 2 500 km² de relief torturé (point culminant à 3 069 m) _ 863 100 habitants en 2020
- 1 habitant sur 4 en zone potentiellement inondable - Inondations par débordement de cours d'eau, ruissellement, submersion marine
- Régime tropical humide
 - Grandes variations spatio-temporelles des pluies, Records mondiaux de pluie entre 12 heures et 15 jours (1144mm en 12h et plus de 6m en 15 jours)
- Réseau hydrographique particulièrement dense
Rivières à écoulement permanent issues des cirques, à fort transport solide
Ravines de l'Est et du Nord de taille plus modeste
Ravines de l'Ouest et du Sud à écoulement intermittent et transport solide réduit
- 17 BV à enjeux de petites tailles (10 à 150 km²) et très pentus instrumentés pour le suivi des hauteurs d'eau
- Temps de concentration très faibles (1 à 3h)
- Phase de crues et de décrues rapides
- Temps de réponse très faibles, qui diminuent au cours de l'épisode



Création :

2006 - Juillet	Mission d'inspection générale dans le domaine des RN à la Réunion → mise en œuvre d'une politique visant à améliorer la prévision des pluies et l'anticipation des crues (2nd radar météo).
2007 - Avril	Mission du SCHAPI sur l'opportunité de la mise en place d'une CVH → confirme la faisabilité d'une CVH, sans reprendre toutes les missions imparties au SPC en métropole.
2010 - Octobre	Lettre de mission du DGPR au Préfet de La Réunion → fixe les missions, les options techniques, financières, et opérationnelles, pour la mise en place d'une CVH au sein de la DDE. Partenariat avec Météo-France pour la caractérisation des précipitations et l'hébergement du PC Crues.

Mission :

Apporter une expertise sur le risque de crue avec la meilleure anticipation possible.

Moyens : à ce jour

- **9 ETP** : 1 responsable de cellule + 3 hydromètres + 3 chargés d'études hydrologie/hydraulique + 1 responsable SI + 1 VSC

- Réseaux de mesure et communication :

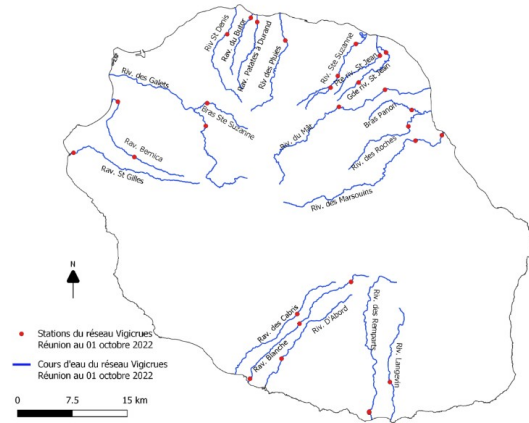
- **pluviométrique** : géré par Météo-France → 62 pluviomètres + 2 radars (ANTILOPE)

- **hydrométrique** : géré par CVH → 31 stations dont 12 en partenariat avec l'OE

- **collecte des données** : géré par la CVH

- **RADIO** : mode principal en temps réel → 11 sites points hauts + 31 sites points bas

- **GSM – IP** : mode de rattrapage à la demande



Vigilance crues à La Réunion

Système de vigilance crues actuel :

La Vigilance Crues couvre les **17 cours d'eau instrumentés**

Elle concerne le risque de **crues par débordement de cours d'eau**, les phénomènes de montée rapide n'entrent pas dans le périmètre

Elle est publiée sur le site internet vigicrues-reunion.re (données temps réel disponibles)

Vigilance émise avec une faible anticipation : surveillance

Evolution envisagée sur la vigilance crues :

Passage à une vigilance quotidienne à 24h

Prise en compte des réflexions sur les niveaux de service et le projet de couverture totale (pas de niveau avancé prévu à moyen terme)

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
Liberté
Égalité
Fraternité

VIGICRUES RÉUNION
Service d'information sur le risque de crues des principaux cours d'eau à La Réunion

NORD • EST • SUD • OUEST • METROPOLE

Mise à jour du site Vigicrues Réunion :
Vous pouvez, dès à présent, vous abonner pour recevoir les notifications par courriel lorsqu'une vigilance crues est émise.
Pour cela, cliquez sur l'icône KR dans l'information générale.

Carte de La Réunion
L'état maximum de la vigilance crues à La Réunion est **VI**.
▲ Pas de risque de crue génératrice de débordements, mais restez ATTENTIF aux évolutions météorologiques

Cliquez sur un symbole de la carte pour afficher les données de la station

- Risque de crue majeure
- Risque de crue dangereuse ou débordements importants
- Risque de crue dangereuse ou débordements

Information générale
Accéder au bulletin d'information

Production de l'information : 19/11/2023 à 12h00 (heure locale Réunion)

Les cartes et les bulletins de vigilance crues sont produits toute l'année dès lors qu'au moins un bassin versant sous surveillance de l'État, atteint le 1^{er} niveau de vigilance (niveau JAUNE).

- **En cas de vigilance crues en cours**, celle-ci sera affichée en page d'accueil et actualisée en fonction de l'évolution de la situation.
- **En cas d'absence de vigilance crues**, il est conseillé néanmoins de se tenir informé des évolutions météorologiques en cas de pratique d'activités sensibles au risque météorologique, en particulier en bord de raienne ou de rivières.

La vigilance crues a vocation à anticiper les risques de débordement des cours d'eau. Le ruissellement urbain et les phénomènes imprévisibles, très rapides et très localisés tels que les crues soudaines, n'entrent pas dans le périmètre de la vigilance crues.

VIGICRUES RÉUNION
<http://vigicrues-reunion.re/>

Sommaire

1. Contexte de La Réunion : hydro-météorologie et vigilance crues
- 2. Stratégie de la CVH Réunion pour la prévision des crues**
3. Développement des outils de prévision et application opérationnelle
4. Perspectives

Vers la prévision des crues...

Stratégie mise en place au sein de la CVH Réunion

Cours d'eau/ravines surveillés

Approche double/triple modèle + abaques :

- ** Modèle Global, conceptuel, continu avec assimilation de données : **modèle GRP** sur 13 BV surveillés
 - Alimentation par lame d'eau prévue brute (Arome OI) et observée (Antilope) **Opérationnel**
- ** Modèle Distribué, conceptuel, continu sans assimilation de données : **modèle SMASH Prévision** sur les BV surveillés
 - Alimentation par lame d'eau prévue brute (Arome OI) et observée (Antilope) **Opérationnel**
- ** **Abaques** Pluies/Vigilances/Débits :
 - Relations pluies/vigilances/débits **Opérationnel**
 - Estimation coeff de ruissellement global par BV

Cours d'eau/ravines non surveillés

Approche modèles régionalisés + abaques :

- ** Modèle distribué, conceptuel, continu sans assimilation de données avec comparaison de quantiles de débits : **modèle SMASH** sur l'ensemble de l'île (hors enclos)
 - **Anticipation** : alimentation par lame d'eau observée (Antilope) _ type VigicruesFlash **Opérationnel**
 - **Prévision** : alimentation par lame d'eau prévue brute (Arome) et observée (Antilope) **Opérationnel**
- ** **Abaques** Pluies/Vigilances/débits **estimées**
 - Analyse multi-critère des BV non surveillés vs. BV surveillés **En cours**

Sommaire

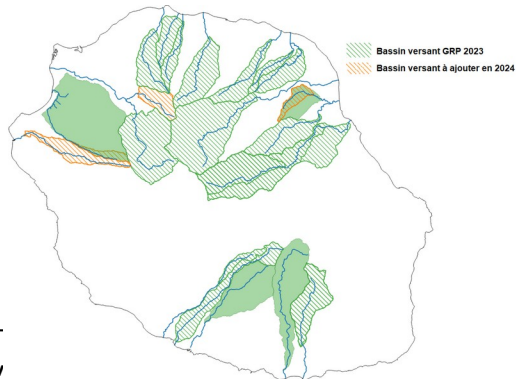
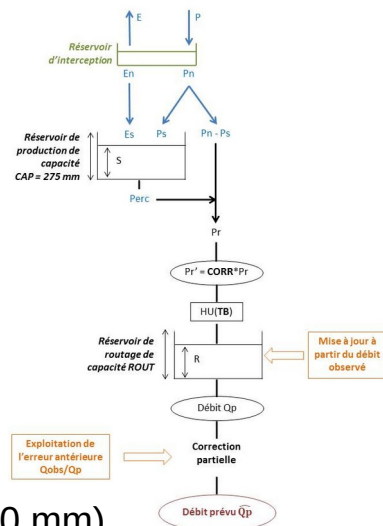
1. Contexte de La Réunion : hydro-météorologie et vigilance crues
2. Stratégie de la CVH Réunion pour la prévision des crues
- 3. Développement des outils de prévision et application opérationnelle**
4. Perspectives

Boucle de modélisation basée sur le modèle GRP

- 13 stations calibrées
- Pas de temps 15 mins
- Deux horizons de calage :
 - Temps de réaction des BV et objectif opérationnel (24 h)
- Stabilité des paramètres entre le calage complet et les deux sous-périodes
- Très hauts débits sous-estimés en général par le modèle

→ Valeurs de paramètres (Rout, Corr et Tb) : cohérentes avec les caractéristiques des BV

- capacité d'infiltration importante (Corr < 0,5)
- hydrogrammes marqués en terme de montée/descente (2h < Tb < 3h et Rout < 200 mm)



Région	Cours d'eau	Paramètres			Critères de performance				Nbre données
		ROUT (mm)	CORR (-)	TB (h)	Eff (-)	POD (%)	FAR (%)	CSI (%)	
NORD	Saint-Denis	190	0.49	2.5	0.71	66	57	35	156
	Butor	40	0.65	1.9	0.82	82	10	75	12
	Durand	23	0.31	2.2	0.63	83	29	63	8
	Pluies	17	0.34	2.5	0.62	48	22	42	33
	Ste-Suzanne	176	0.98	2.9	0.47	49	27	42	53
	Petite St-Jean	29	0.43	2.5	0.77	38	11	36	22
	Grande St-Jean	45	0.55	2.9	0.67	47	29	39	51
SALAZIE	Mât	113	0.43	2.5	0.71	50	17	46	11
EST	Roches	118	1	2.5	0.71	48	33	39	277
	Marsouins	308	0.78	2.5	0.66	36	0	36	205
SUD	Langevin	155	0.29	2	0.77	65	27	52	21
MAFATE	Galets	109	0.33	2.5	0.68	75	20	63	19

Critères de performance à partir des seuils de vigilance

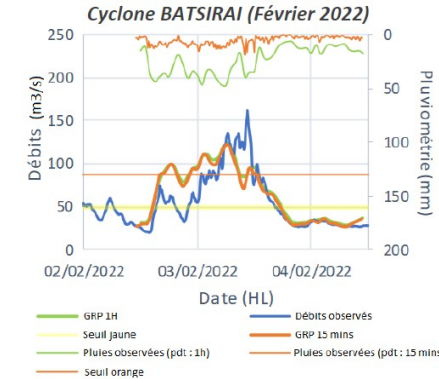
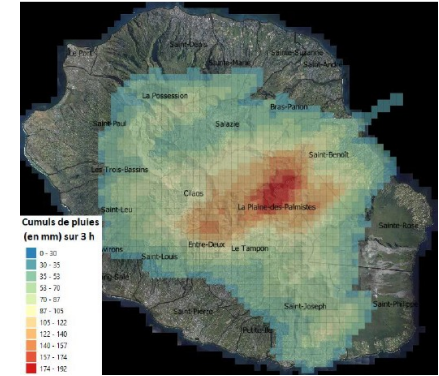
Boucle de modélisation basée sur le modèle GRP

Performance de la boucle sur les événements pluvieux marquants des saisons 2021 et 2022 :

- 7 événements « marquants »
- Mode jeu : pluies observées
- Simulations lancées à H-24 par rapport au pic de crue observé
- Trois critères d'évaluation :
 - décalage temporel par rapport au pic de crue (C1),
 - différence entre le débit max observé et le débit max simulé (C2),
 - décalage temporel pour le dépassement du seuil jaune (C3).

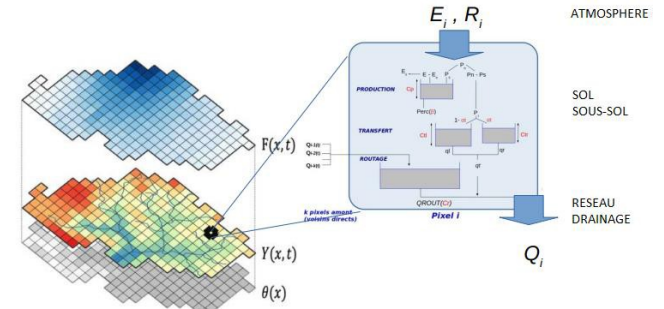
→ Résultats satisfaisants

Région	Cours d'eau	N° Critère	DANILO			IMAN			Fortes Pluies 04/2021			Fortes Pluies 08/2021			Fortes Pluies 01/2022-1			Fortes Pluies 01/2022-2			BATSIRAI			Fortes Pluies 04/2022			Total des critères respectés			Nbre d'évènements sur le cours d'eau
			1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
NORD	St-Denis					OK	X	OK	OK	X	OK				X	X	X	X	X	OK	OK	OK	OK	OK	OK	/	4	2	4	7
	Pluies					OK	OK	OK	OK	X	OK							OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	5	4	5	6
	Ste-Suzanne					OK	X	FA							OK	X	FA										2	0	0	2
	Petite St-Jean					OK	X	AM							OK	OK	OK				OK	X	AM				3	1	1	3
EST	Gde St-Jean		OK	X	AM	OK	X	OK	X	X	OK				OK	OK	OK	OK	X	OK				OK	X	OK	5	1	5	6
	Roches		OK	X	OK	X	X	OK	OK	OK	OK	X	X	X	OK	X	OK	OK	X	OK	OK	X	OK	OK	OK	/	6	2	6	8
SUD	Marsouins		X	X	OK	OK	X	OK	OK	X	X	X	X	X	OK	X	OK	OK	X	OK	OK	X	FA				6	1	5	8
	Langevin											OK	X	X				X	X	X	X	OK	OK				1	1	1	3
MAFATE	Blanche																				X	X	AM	OK	X	AM	1	0	0	2
	Galets																	OK	X	AM							1	0	0	1

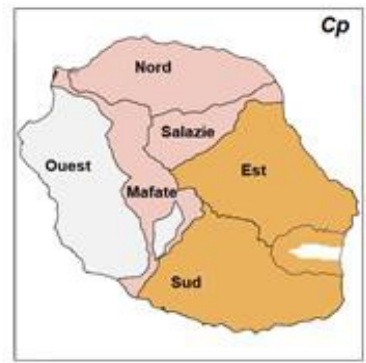


Boucle de modélisation basée sur le modèle SMASH

- Calage régional uniforme sur six régions de l'île (en se basant sur 27 stations)
- Pas de temps 15 mins et pas d'espace : 250 m
- Validation spatiale, temporelle ou spatio-temporelle :
→ scores de contingence encourageants



- Boucle développée pour l'ouverture à moyen terme du service Vigicrues Flash à La Réunion mais performances intéressantes sur le réseau surveillé de la CVH



Région	Cours d'eau	Paramètres				Scores de contingences			Nbre crues
		Cp (mm)	Alpha (-)	Ctr (mm)	Beta (-)	POD (%)	FAR (%)	CSI (%)	
NORD	Saint-Denis	1580	0.43	104	-	85	59	38	95
	Butor					55	40	40	11
	Durand					100	82	18	11
	Pluies					87	23	69	23
	Ste-Suzanne					56	0	56	18
	Petite St-Jean					86	9	79	35
	Grande St-Jean					50	0	50	66
SALAZIE	Mât	2021	0.42	97	-	67	0	64	11
EST	Roches	4035	0.52	86	-	56	13	52	226
	Marsouins					84	43	52	197
SUD	Langevin	4075	0.49	58	5.8	62	31	49	29
MAFATE	Galets	1309	0.32	115	-				

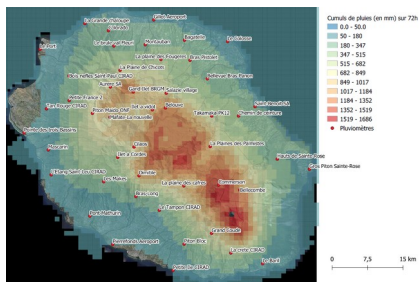
Critères de performance à partir des seuils de vigilance

Boucle de modélisation basée sur le modèle SMASH

SMASH : réseau non surveillé

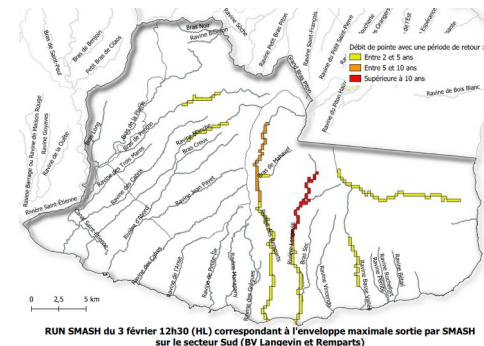
→ Principe de fonctionnement en pratique

Lame d'eau prévue/observée

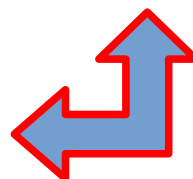


Modélisation SMASH
(runs toutes les 15 mins)

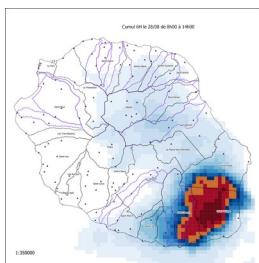
Sorties SMASH :
période de retour de débit pour tous
les pixels drainant au moins 8km²



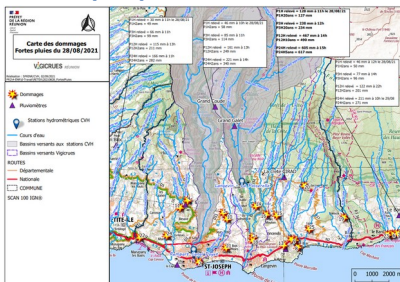
Rejeu SMASH + Capitalisation des données sur les événements passés (base de données historique)



Comparaison des résultats temps-réel avec la base de données historique



Lame d'eau Antiope canal (mm)



Boucle de modélisation basée sur le modèle SMASH

SMASH : réseau surveillé et non surveillé

→ SMASH « Anticipation » et « Prévision »

Type d'information :

- Uniquement débordement de cours d'eau
- Réseau surveillé et non surveillé : cours d'eau drainant un BV d'au moins 8km² soit 56 cours d'eau à La Réunion

SMASH « Anticipation » :

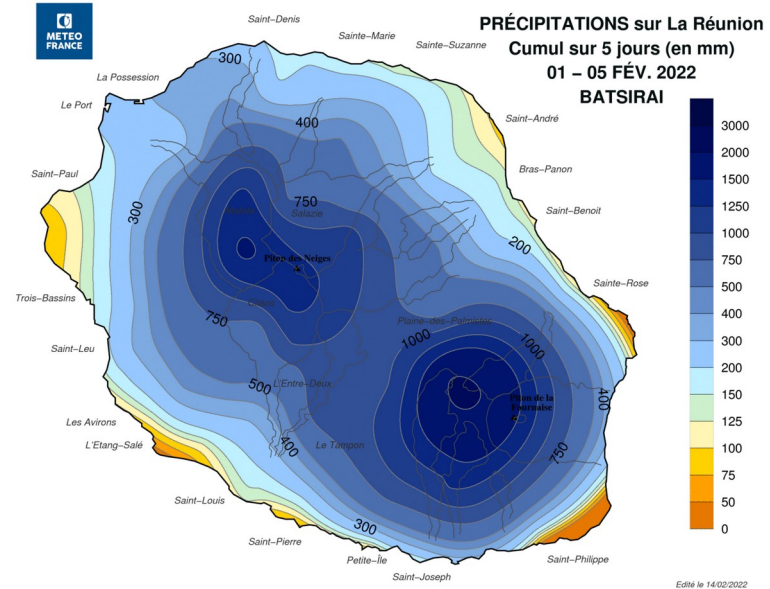
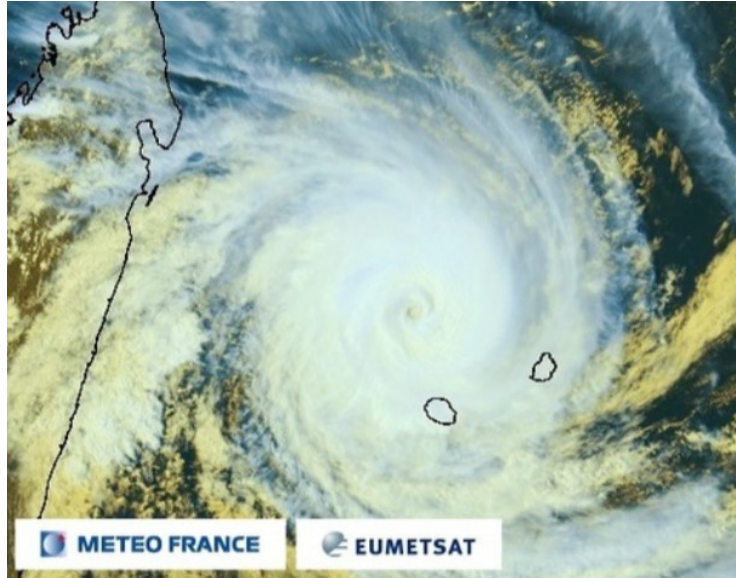
- Alimentation par la lame d'eau observée (+ hypothèses sur la pluie sur les 2 heures à venir)
- Avantage : degré d'incertitude moindre car peu d'hypothèses sur la pluie
- Inconvénient : anticipation de l'ordre de : 1h à 3h (en lien avec le temps de réaction des BV)

SMASH « Prévision » :

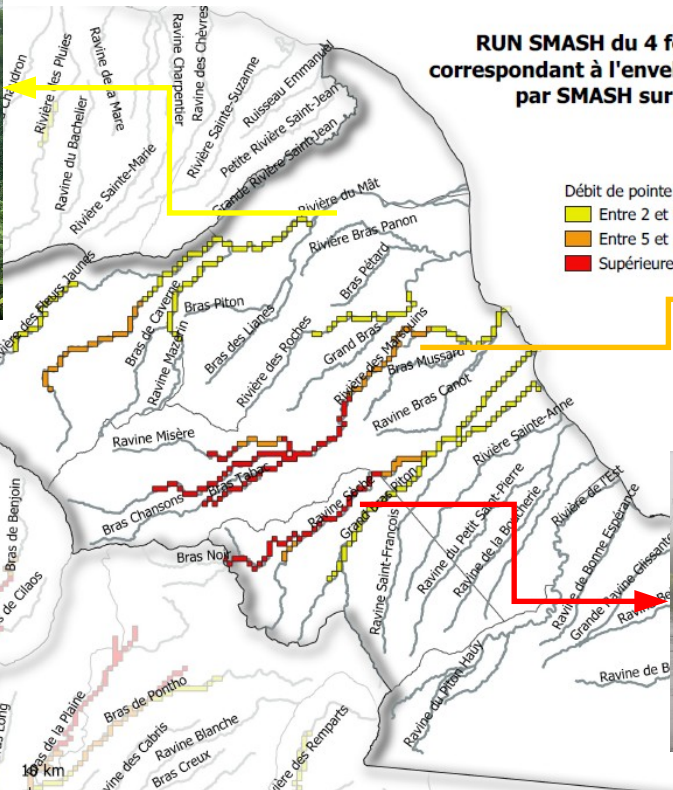
- Alimentation par la lame d'eau observée et la lame d'eau prévue (AROME OI)
- Avantage : informations en « mode prévision » soit 36 h après l'arrivée de la lame d'eau prévue
- Inconvénient : degré d'incertitude fort car hypothèses sur la pluie et sur l'hydrologie

SMASH : réseau surveillé et non surveillé

Exemple pour Cyclone BATSIRAI : du 2 au 4 février 2022



- Bellecombe-Jacob: **1598 mm** en 48 heures (4ème valeur la plus élevée depuis 1966)
- Aurère : **1143 mm** en 48 heures (> T10 ans)
- Grand-Coude : **896 mm** en 48 heures (2ème valeur la plus élevée depuis 1978).
- Pont d'Yves: **736 mm** en 48h (valeur la plus élevée depuis 2001 battant le record de **671 mm**)
- Cilaos : **492 mm** en 12 h (> T10 ans)
- Grand-Galet : **486 mm** en 12 h (> T10 ans)



**RUN SMASH du 4 février 01h30 (HL)
correspondant à l'enveloppe maximale sortie
par SMASH sur le secteur Est**

Débit de pointe avec une période de retour :

- Entre 2 et 5 ans
- Entre 5 et 10 ans
- Supérieure à 10 ans



ZONE EST



Sommaire

1. Contexte de La Réunion : hydro-météorologie et vigilance crues
2. Stratégie de la CVH Réunion pour la prévision des crues
3. Développement des outils de prévision et application opérationnelle
- 4. Perspectives**

- **Amélioration** de la production quotidienne d'une **pluie expertisée** type AP/BP (bulletin de prévision) sur douze zones identifiées :
 - objectivation des sorties brutes du modèle AROME-OI déterministe
- Intégration des différents scénarios de pluies issus d'**AROME-OI ensembliste** (opérationnel chez Météo France OI pour la saison cyclonique 2023/24) :
 - prévision hydrologique ensembliste (incertitudes de la prévision)
- **GRP** : passage à GRP 2021. Test expérimental d'une version plus réactive aux intensités de pluie (Astagneau *et al.*, 2022).
- **SMASH** : passage au modèle S6 et adaptation de la méthode de calage (approche multi-critère) et de régionalisation (« pré-régionalisation ») (Huynh *et al.*, 2023) ; Poster n°37 du colloque SHF