



Projet HYDRODEMO

Évaluation de l'aléa torrentiel dans les petits bassins versants des Alpes du Nord

Action 4 : Développer un cadre de modélisation hydrologique pour les petits bassins versants torrentiels

Projet HYDRODEMO : Évaluation de l'aléa torrentiel dans les petits bassins versants des Alpes du Nord

Action 4 : Résultats des simulations hydrologiques MORDOR-SD pour 13 bassins versants de Grenoble-Alpes Métropole

Alexandre Mas¹, Guillaume Evin¹, and Matthieu Le Lay²

¹Univ. Grenoble Alpes, INRAE, UR ETNA, 38000, Grenoble, France

²EDF-DTG, Department S, 21 avenue de l'Europe, BP 41, 38040 Grenoble cedex 09, France

15 avril 2022



Financement : Projet financé avec le concours de l'Union européenne. L'Europe s'engage sur le Massif Alpin avec le Fonds Européen de Développement Régional. Opération soutenue par l'Etat - Fonds national d'aménagement et de développement du territoire.

Citation : Mas, A., Evin, G. et Le Lay, M. 2021. *HYDRODEMO - Action 4 : Résultats des simulations hydrologiques MORDOR-SD pour 13 bassins versants de Grenoble-Alpes Métropole* [Rapport de recherche] INRAE - UR ETNA.

Résumé

Le projet HYDRODEMO a pour objectif de mieux connaître les risques liés aux crues torrentielles dans les Alpes du Nord et de pouvoir mieux s'en prémunir. Ces phénomènes torrentiels sont en effet parfois destructeurs car extrêmement chargés en matériau solide. HYDRODEMO vise à combler un manque critique de connaissance sur ce type d'aléa, tout d'abord en caractérisant l'hydrologie et le transport solide de bassins versants instrumentés, puis en définissant une méthodologie de transposition aux autres bassins versants des Alpes du Nord. L'action 4 du projet HYDRODEMO vise à caractériser le fonctionnement hydrologique des petits bassins versants torrentiels des Alpes du Nord au moyen d'outils de modélisation.

Ce rapport présente en détails les résultats obtenus sur les bassins versants identifiés par Grenoble-Alpes Métropole comme prioritaires pour l'amélioration de la connaissance de leur fonctionnement hydrologique. Les séries simulées avec le modèle MORDOR-SD ont été utilisées pour calculer des débits de pointe de crues associés à différents temps de retour. Ils ont été comparés aux valeurs fournies par les méthodes Shyreg et Crupedix ainsi qu'aux estimations trouvées dans la littérature. Les sorties du modèle ont également été analysées en détail pour la simulation d'un épisode de crues historique ayant concerné plusieurs bassins de l'échantillon en août 2005. Le cadre de modélisation mis en place est une base de travail satisfaisante mais la validité de ses résultats est grandement conditionnée par la disponibilité de forçages de précipitation fiables.

Table des matières

1	Introduction	5
2	Données et outils	5
2.1	Forçages météorologiques	5
2.2	Débits observés	5
2.3	Modèle hydrologique	6
2.4	Résumé de l'approche méthodologique	6
3	Zoom Grenoble-Alpes Métropole	6
3.1	Bassins étudiés	6
3.2	Données analysées	8
4	Analyse des résultats	22
4.1	Régimes d'écoulement	22
4.2	Quantiles de débits	22
4.3	Analyse événementielle	23
4.4	Impact des forçages	26
5	Conclusions	26
	Bibliographie	27

1 Introduction

L'objectif de l'action 4 du projet HYDRODEMO est de mettre en place un cadre de modélisation hydrologique pour les petits bassins versants torrentiels des Alpes du Nord. Ces derniers sont caractérisés par un fonctionnement hydrologique particulier, avec des temps de réponse très courts et un transport solide potentiellement important. De plus, ils sont généralement localisés en partie en montagne, dans des zones où l'installation et la maintenance d'équipements de mesures météorologiques ou hydrométriques sont complexes. Ce sont donc majoritairement des bassins non jaugés où les précipitations sont mal connues.

Lorsque ces bassins contiennent des zones à enjeux, la connaissance de leur fonctionnement hydrologique est primordiale pour évaluer le risque de crues. Dans les Alpes du Nord, de nombreux cours d'eau conservent leur caractère torrentiel jusque dans des zones densément urbanisées à forts enjeux. C'est en particulier le cas pour l'agglomération de Grenoble, dont la situation géographique entraîne l'exposition de nombreuses zones au risque de crue torrentielle. Grenoble-Alpes Métropole, autorité compétente pour la gestion des risques naturels, s'est associé au projet HYDRODEMO pour améliorer sa connaissance du fonctionnement hydrologique d'un certain nombre de cours d'eau de son territoire.

Les travaux menés avec le modèle hydrologique MORDOR-SD ont permis de définir une stratégie de régionalisation des paramètres du modèle afin de simuler les débits sur des bassins non jaugés. La validation de ces simulations en s'appuyant sur des données de transport solide sur un large échantillon de bassins ne s'est pas avérée concluante. Une analyse détaillée des résultats de simulation a donc été menée sur un échantillon réduit composé des bassins versants d'intérêt pour Grenoble-Alpes Métropole.

Les aspects méthodologiques généraux de l'action 4 du projet HYDRODEMO sont rappelés en partie 2. La section 3 présente les bassins versants étudiés dans le cadre de ce zoom sur le territoire de Grenoble-Alpes Métropole et le contexte. Les résultats sont présentés et analysés dans la section 4.

2 Données et outils

2.1 Forçages météorologiques

Les données météorologiques utilisées (précipitation et température) sont des données grillées à la résolution spatiale de 1 km² et à la résolution temporelle de 1 heure. Les détails sont disponibles dans le rapport dédié à l'action 1 du projet ("État des lieux et recueil de l'information disponible concernant l'aléa torrentiel" Mas *et al.*, 2021).

2.2 Débits observés

Les séries de débits observés proviennent en majorité de la Banque Hydro (<http://hydro.eaufrance.fr/>) ainsi que de quelques stations gérées par EDF. Pour les stations de la Banque Hydro, les débits au pas de temps horaire ont été construits par interpolation des débits à pas de temps variable extraits de la Banque Hydro. Les débits EDF nous ont été fournis au pas de temps horaire.

Identifiant	Nom	Surface (km2)
1	Le Lanfrey au Fontanil	6.4
2	Le Charmeyran à La Tronche	4.4
3	Torrent de Jailleres à Montbonnot	0.88
4	Ruisseau de Laval à Brignoud	31.7
5	Le Vorz à Sainte-Agnès	32
6	Ruisseau de Lancey à Villard Bonnot	16.9
7	Le Domeynon à Domène	46.2
8	Le Sonnant à Gières	26.3
9	Le Vernon à Vaulnaveys le Haut	6.1
10	Le Premol à Vaulnaveys le Bas	11.6
11	Le Verderet à Eybens	14.8
12	Le Lavanchon à St Paul de Varces [Maubourg]	16.2
13	Le Rif Talon à Claix	4.1

TABLE 1 – Noms, superficie et des bassins étudiés.

2.3 Modèle hydrologique

Le modèle MORDOR (Garçon, 1996) est développé et utilisé par EDF depuis plus de 30 ans pour une large gamme d’application : gestion en temps réel, prévision des apports, études prospectives. Le modèle MORDOR-SD (Garavaglia *et al.*, 2017), utilisé dans nos travaux, est une version semi-distribué conceptuelle à réservoirs. Les détails relatifs au fonctionnement du modèle et à sa calibration sont présentés dans le rapport dédié Mas et Evin (2021a).

2.4 Résumé de l’approche méthodologique

Dans un premier temps, plusieurs expériences de calage du modèle ont été menées. Une stratégie a été validée, à l’issue de laquelle on dispose d’une paramétrisation du modèle pour chacun des 79 bassins jaugés des Alpes du Nord, et pour chaque forçage de précipitation.

Les paramètres du modèle ont ensuite été régionalisés selon une approche consistant à établir des relations avec certaines propriétés du bassin ou des forçages du bassin pour une partie des paramètres, et par transfert uniforme d’un “meilleur” jeu de paramètres sur l’ensemble du domaine pour les paramètres restants. Ces paramètres régionalisés ont permis de simuler les débits à l’exutoire d’un certain nombre de bassins versants non jaugés.

3 Zoom Grenoble-Alpes Métropole

3.1 Bassins étudiés

Un échantillon de 13 bassins versants a été sélectionné pour procéder à une étude détaillée de leur fonctionnement hydrologique. Parmi eux, 10 font partie du territoire administratif de Grenoble-Alpes Métropole et 3 du territoire de la Communauté de Communes du Grésivaudan. Ces derniers ont été ajoutés car ils sont particulièrement représentatifs des bassins versants ciblés lors de la définition des objectifs du projet HYDRODEMO. La localisation des bassins versants est présentée sur la figure 1. Un certain nombre de leurs caractéristiques sont précisées dans le tableau 1.



FIGURE 1 – Localisation des 13 bassins versants étudiés. L'identifiant numérique des bassins est le même que dans le tableau 1

Parmi ces bassins, seul le Sonnant dispose d'une station de mesure du débit assez ancienne pour que les données puissent être exploitées. Le Doménon dispose d'une station de mesure depuis 2018. Le Verderet est équipé d'une échelle de mesure de hauteur d'eau, mais il n'y a pas de courbe de tarage connue et les données ne sont à priori pas bancarisées. Les possibilités de comparaison de nos résultats à des données mesurées sont donc très limitées.

3.2 Données analysées

Sur ces 13 bassins, le modèle MORDOR-SD a été utilisé pour simuler des chroniques de débit au pas de temps horaire en utilisant deux forçages de précipitation sur des périodes temporelles différentes.

A partir de ces séries de débit, on a extrait les quantiles de débits de pointe associés aux temps de retour 2, 5, 10, 20, 50 et 100 ans, noté Q2, Q5, Q10, Q20, Q50 et Q100 dans la suite. Ces derniers ont été comparés aux quantiles donnés par la méthode Shyreg (Organde *et al.*, 2013) ainsi qu'aux quantiles calculés par d'autres méthodes selon les informations trouvées dans la littérature, en particulier dans les rapports d'ingénierie. Le travail de recherche bibliographique n'a permis de trouver des estimations que de certains (voir d'aucun) quantiles selon les bassins. On s'est donc limité à la comparaison du Q10 qui est le quantile qui a été trouvé pour le plus de bassins dans la littérature. La comparaison a également été faite au résultat de la méthode Crupedix qui permet d'estimer le Q10 d'un bassin selon l'équation 1 :

$$Q10 = S^{0.8} \frac{PJ_{10}^2}{80} R \quad (1)$$

avec S la surface du bassin en km^2 , PJ_{10} la pluie journalière de période de retour 10 ans en mm et R un coefficient régional égal à 1 sur notre zone d'étude. Les incertitudes associées à la méthode Crupedix sont assez élevées, cependant elle permet de fournir une estimation rapide du Q10 et est toujours employée ponctuellement dans des études hydrologiques.

Les résultats sont présentés ci-après bassin par bassin. Sur chaque fiche on trouve (de gauche à droite et de haut en bas) :

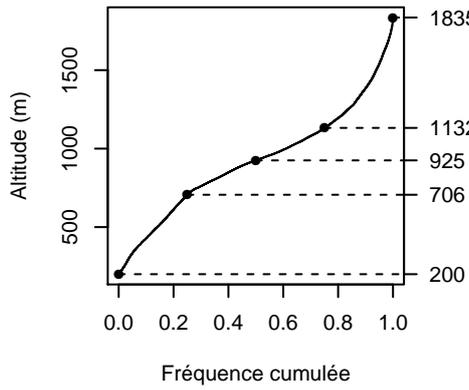
- Carte du bassin.
- Répartition des altitudes.
- Répartition des pentes.
- Répartition des orientations.
- Occupation du sol en 4 grandes classes.
- Débits journaliers moyens sur une année hydrologique (du 1er septembre au 31 août) simulés par MORDOR-SD avec les deux forçages de précipitation.
- Cumuls mensuels moyen de précipitation Spazm désagrégé et Comephore brut (P_s et P_c) et de débit simulés avec Spazm et Comephore (Q_s et Q_c) sur une année hydrologique.
- Intensités maximales sur 2 heures, 4 heures, 6 heures, 12 heures, 24 heures, 36 heures et 48 heures pour les précipitations Spazm désagrégé et Comephore brut (P_s et P_c) en mm et les débits simulés avec Spazm et Comephore (Q_s et Q_c) en m^3/s .
- Hydrogrammes normés par le débit de pointe des 40 plus fortes crues simulées par MORDOR-SD avec le forçage de précipitation Comephore et hydrogramme médian.
- Hydrogrammes normés par le débit de pointe des 120 plus fortes crues simulées par MORDOR-SD avec le forçage de précipitation Spazm et hydrogramme médian.
- Quantiles de débit de pointe de temps de retour 2 ans, 5 ans, 10 ans, 20 ans, 50 ans et 100 ans calculés à partir des simulations de MORDOR-SD avec les forçage de précipitation Comephore et Spazm (respectivement **M.c** et **M.sp**) et avec la méthode Shyreg (**Sh**).

La partie 4 apporte des compléments d'analyse sur ces résultats.

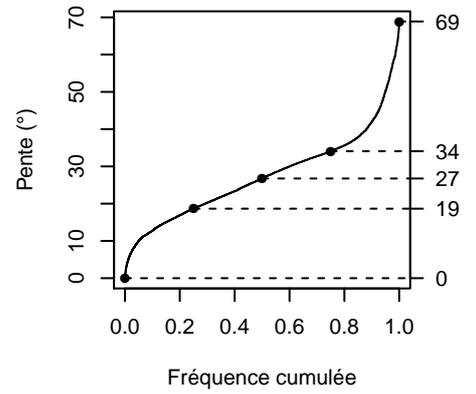
Le Lanfrey à Le Fontanil



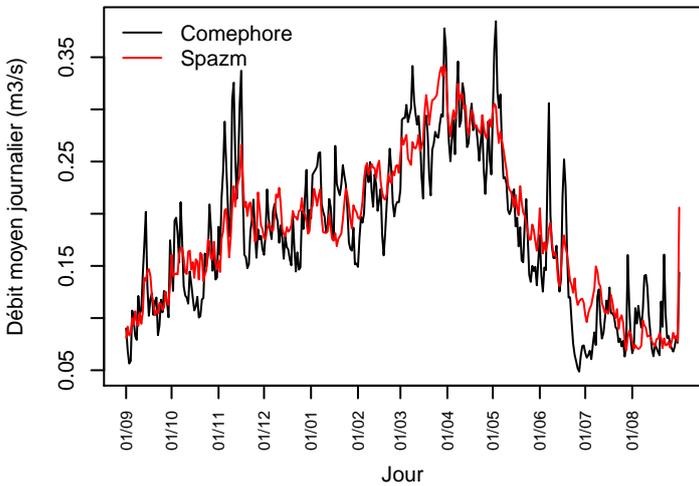
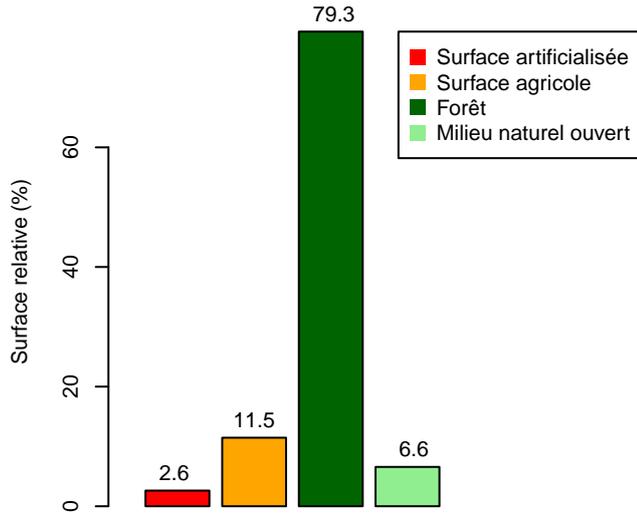
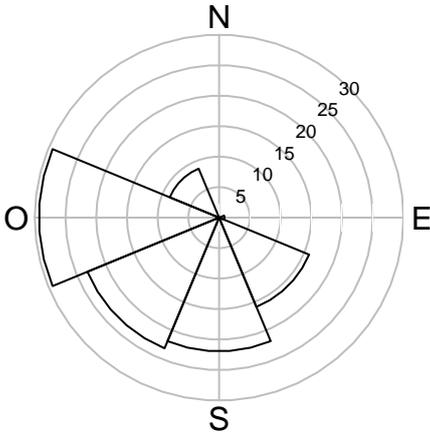
Hypsométrie



Pentes



Orientation

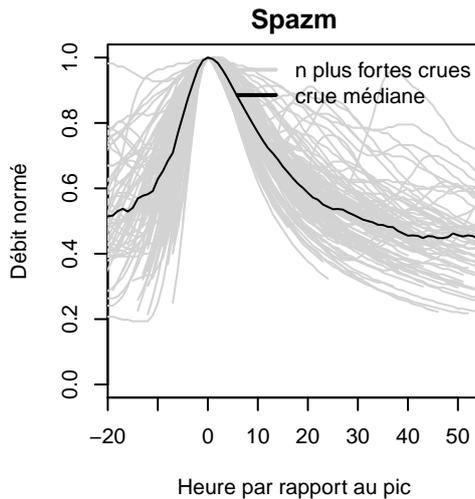
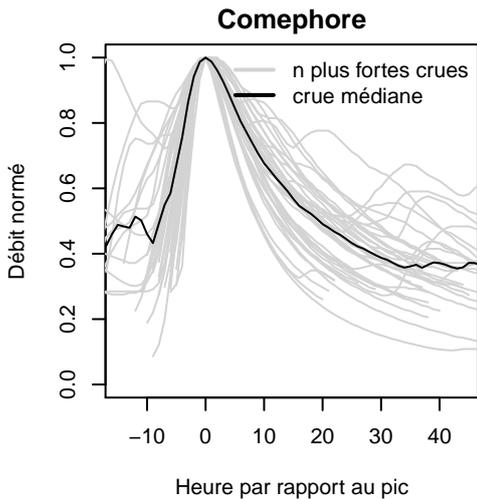


Cumuls mensuels moyens (mm)

	09	10	11	12	01	02	03	04	05	06	07	08	An
Ps	136	141	151	139	131	119	133	136	148	133	120	126	1621
Pc	113	113	135	103	114	91	99	112	123	100	105	116	1330
Qs	44	63	80	80	81	87	120	116	92	60	44	32	905
Qc	44	60	85	75	87	79	117	111	88	56	37	38	883

Intensités max

	2h	4h	6h	12h	24h	36h	48h
Ps (mm/h)	11.3	11.3	11.3	7.24	5.71	4.46	3.41
Pc (mm/h)	21.5	15.1	12.5	8.95	4.67	3.38	2.68
Qs (m3/s)	2.89	2.86	2.84	2.69	2.31	1.97	1.85
Qc (m3/s)	7.18	7.07	6.86	5.98	4.41	3.44	2.81



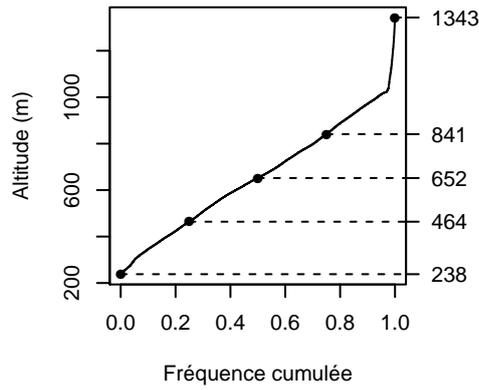
Quantiles (m3/s)

	M.c	M.sp	Sh
QP_2	2.23	1.67	2.6
QP_5	2.93	2	3.9
QP_10	3.59	2.22	5.2
QP_20	4.4	2.42	7
QP_50	5.74	2.65	10.4
QP_100	7.01	2.8	14

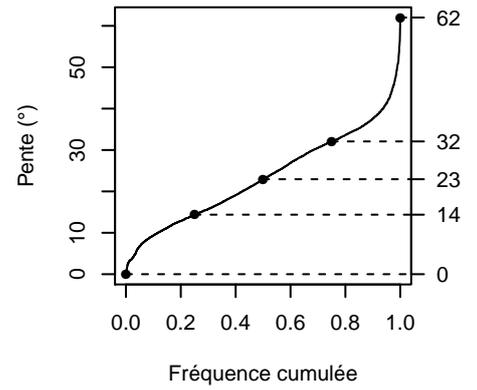
Le Charmeyran à La Tronche



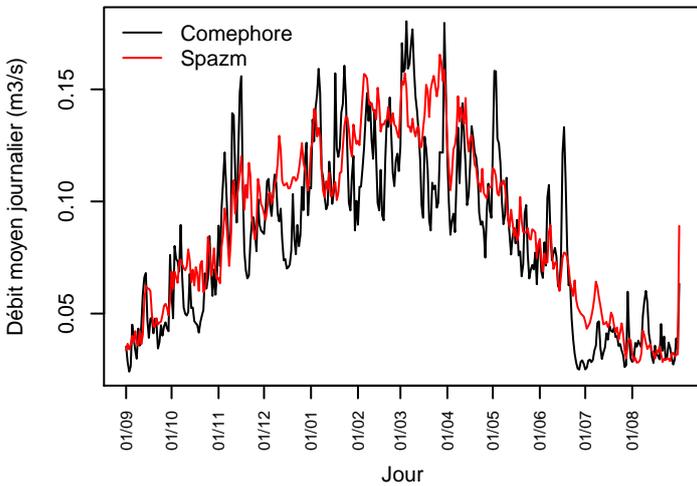
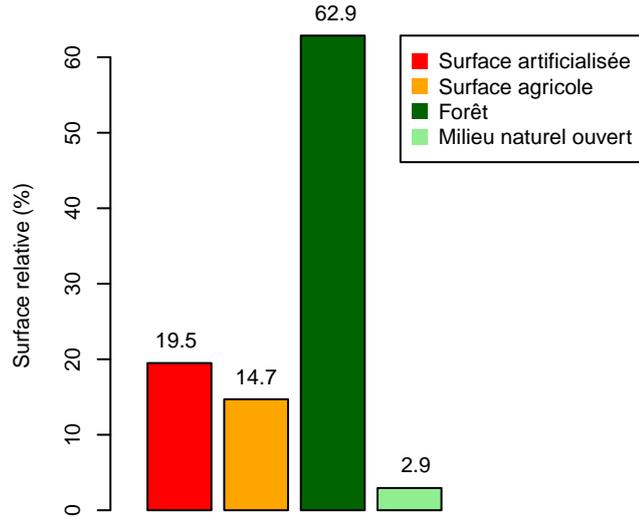
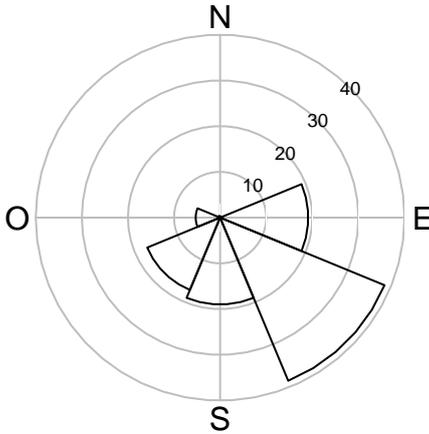
Hypsométrie



Pentes



Orientation

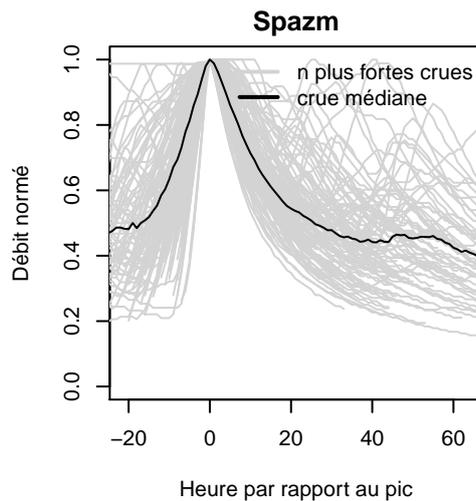
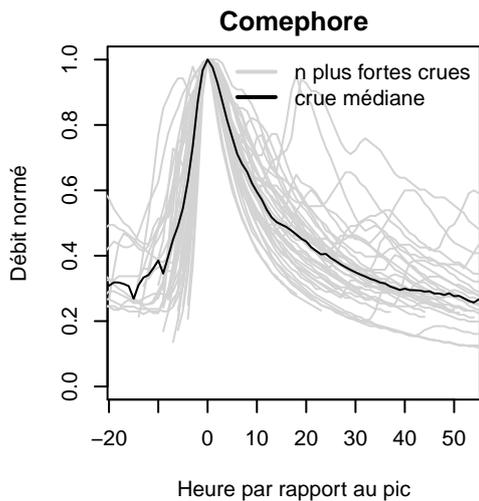


Cumuls mensuels moyens (mm)

	09	10	11	12	01	02	03	04	05	06	07	08	An
Ps	113	118	125	116	110	100	110	111	122	110	100	104	1343
Pc	96	100	118	91	102	80	89	92	109	93	93	106	1175
Qs	27	41	55	66	72	76	87	70	56	39	27	19	640
Qc	25	36	57	56	73	65	79	62	55	39	21	22	595

Intensités max

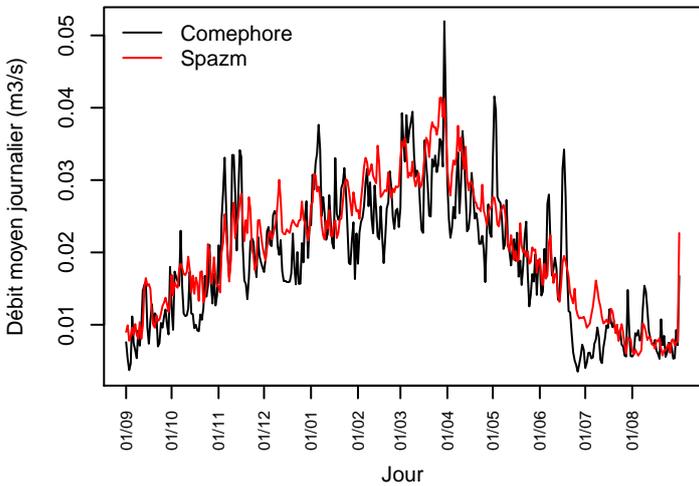
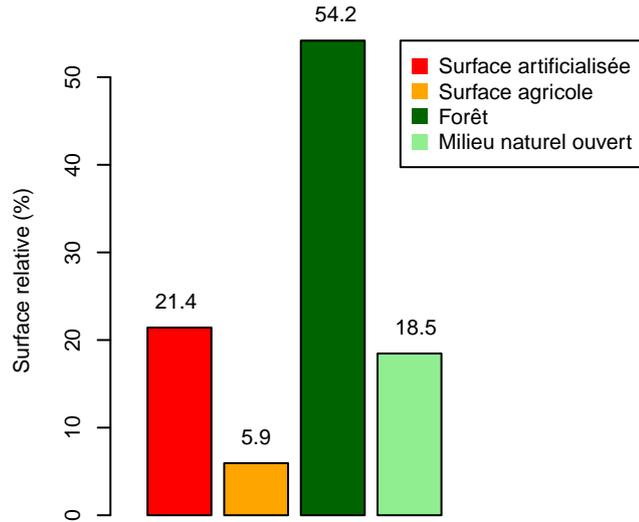
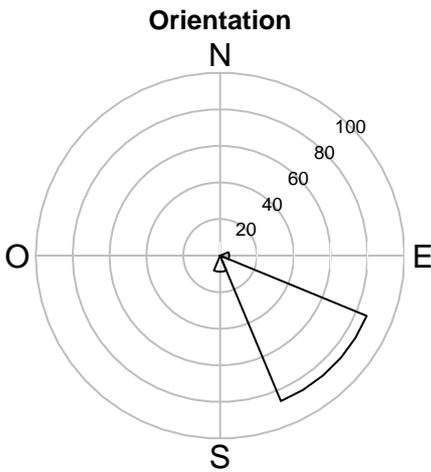
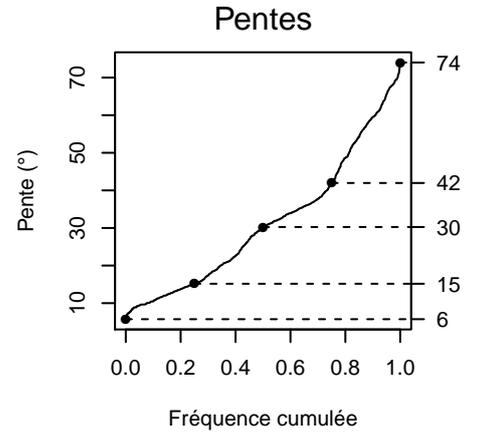
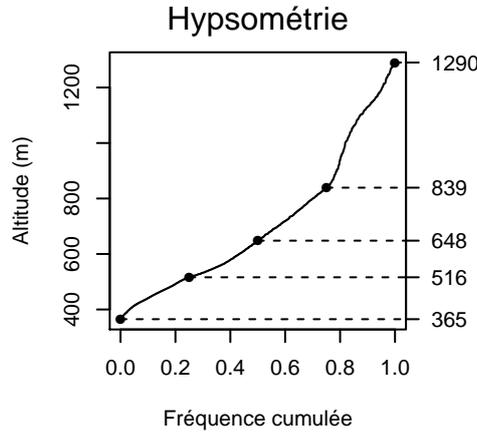
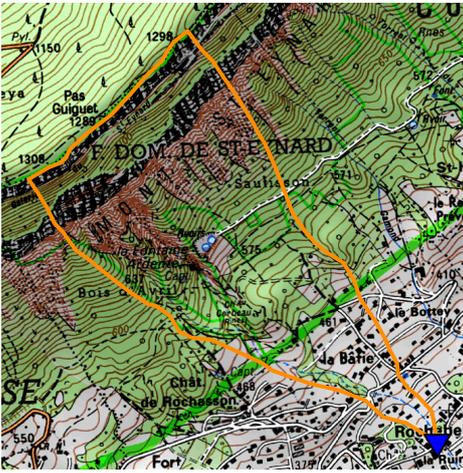
	2h	4h	6h	12h	24h	36h	48h
Ps (mm/h)	10.4	7.18	7.18	6.02	4.49	3.4	2.97
Pc (mm/h)	18.2	11.4	8.71	6.98	3.57	2.48	2.02
Qs (m3/s)	1.85	1.83	1.81	1.73	1.51	1.34	1.21
Qc (m3/s)	2.3	2.25	2.19	1.95	1.52	1.24	1.27



Quantiles (m3/s)

	M.c	M.sp	Sh
QP_2	1.33	0.99	2.5
QP_5	1.65	1.21	3.7
QP_10	1.87	1.36	4.8
QP_20	2.09	1.5	6.1
QP_50	2.35	1.67	8.5
QP_100	2.54	1.79	10.8

Torrent de Jailleres à Montbonnot

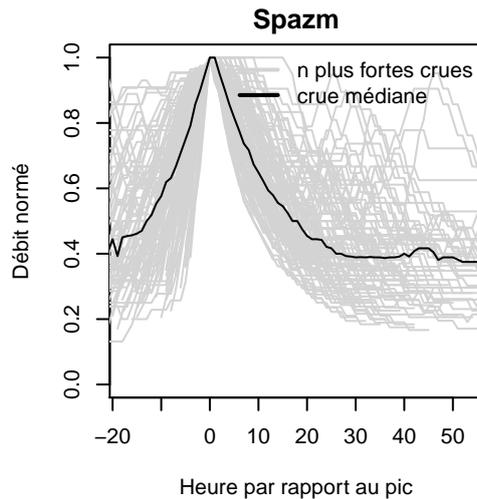
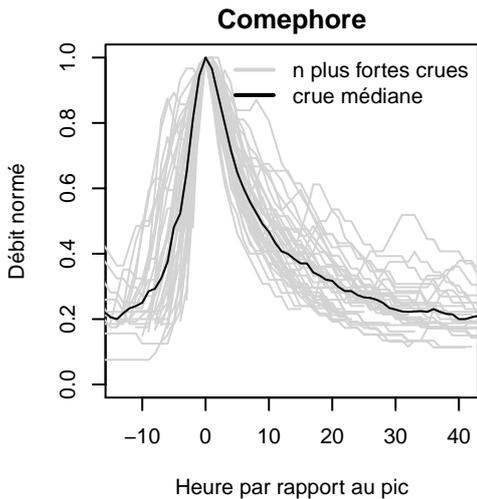


Cumuls mensuels moyens (mm)

	09	10	11	12	01	02	03	04	05	06	07	08	An
Ps	120	125	134	125	119	107	118	118	129	118	108	111	1437
Pc	96	101	119	93	103	80	91	95	111	96	93	104	1188
Qs	32	49	65	71	78	81	104	86	66	46	31	22	735
Qc	28	41	65	60	78	69	99	74	66	45	23	24	678

Intensités max

	2h	4h	6h	12h	24h	36h	48h
Ps (mm/h)	11.3	7.42	7.42	6.48	4.78	3.62	3.29
Pc (mm/h)	16	10.6	8.58	6.21	3.45	2.3	1.91
Qs (m3/s)	0.43	0.425	0.418	0.397	0.392	0.372	0.332
Qc (m3/s)	0.525	0.51	0.493	0.426	0.337	0.278	0.271



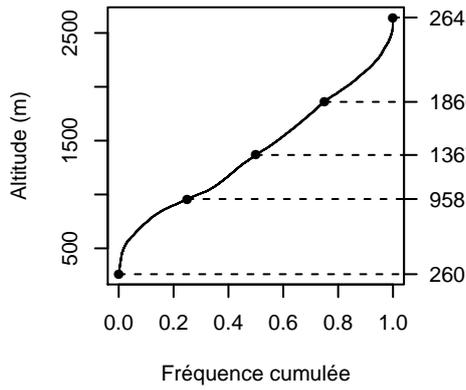
Quantiles (m3/s)

	M.c	M.sp	Sh
QP_2	0.38	0.28	0.2
QP_5	0.45	0.33	0.3
QP_10	0.49	0.37	0.4
QP_20	0.53	0.4	0.6
QP_50	0.57	0.44	0.8
QP_100	0.59	0.47	1.1

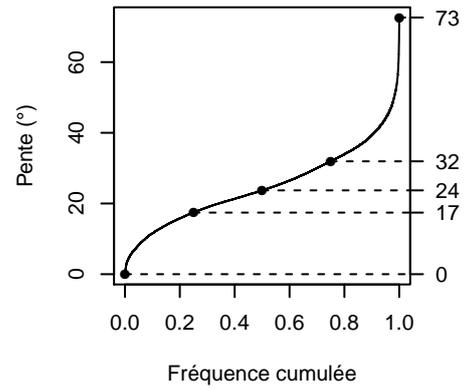
Ruisseau de Laval à Brignoud



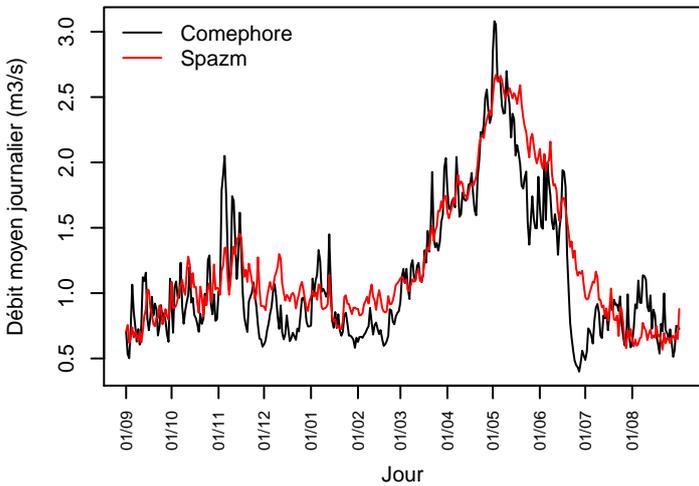
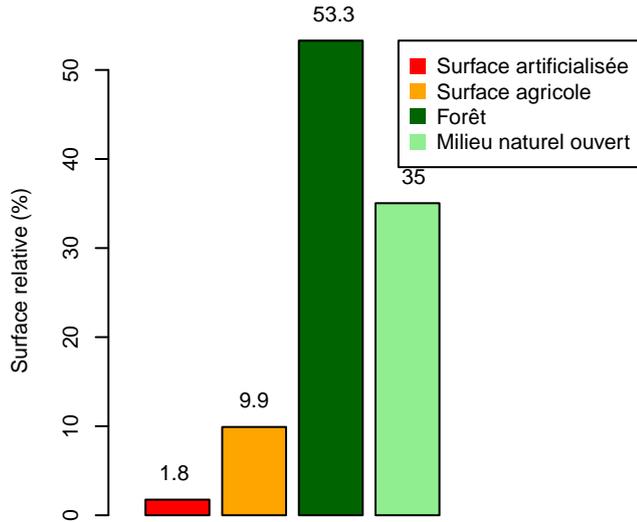
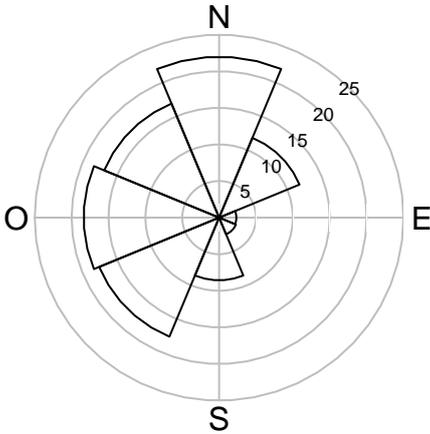
Hypsométrie



Pentes



Orientation

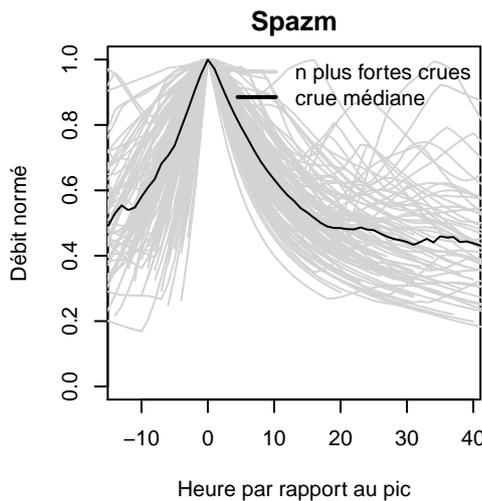
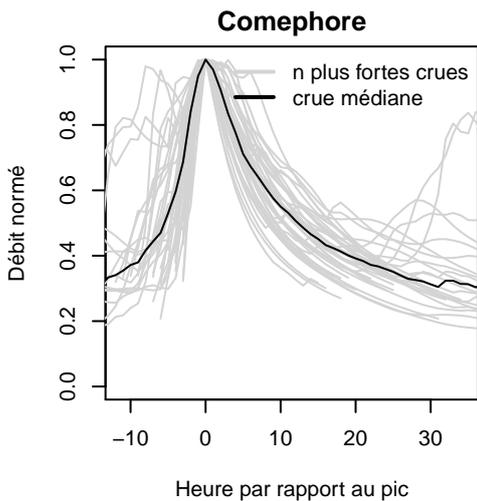


Cumuls mensuels moyens (mm)

	09	10	11	12	01	02	03	04	05	06	07	08	An
Ps	146	164	182	180	170	150	154	140	153	154	145	148	1891
Pc	111	117	133	112	119	92	105	103	132	120	125	133	1407
Qs	66	78	95	66	75	56	111	156	182	102	65	67	1124
Qc	64	86	95	85	75	72	109	157	203	132	74	55	1215

Intensités max

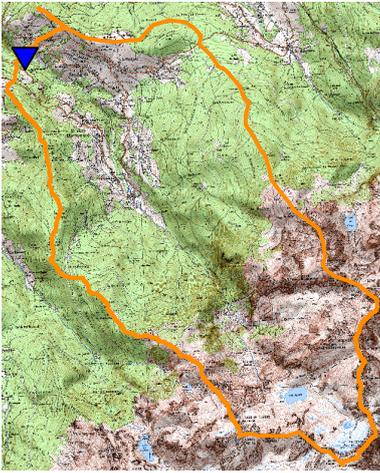
	2h	4h	6h	12h	24h	36h	48h
Ps (mm/h)	13.8	13.8	13.8	8.76	5.86	5.43	5.08
Pc (mm/h)	23.3	12.5	8.42	5.39	3.31	2.73	2.15
Qs (m3/s)	22.8	21.5	20.9	18.9	15.7	13.2	11.5
Qc (m3/s)	24.9	23.6	22.4	19	15.3	13.3	11.7



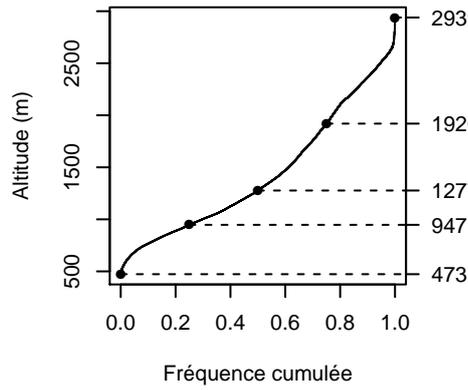
Quantiles (m3/s)

	M.c	M.sp	Sh
QP_2	14.1	11.6	8.6
QP_5	17.6	14.6	12.3
QP_10	20.5	17.2	16
QP_20	23.8	19.9	21
QP_50	28.6	23.7	30.8
QP_100	32.8	26.9	41.2

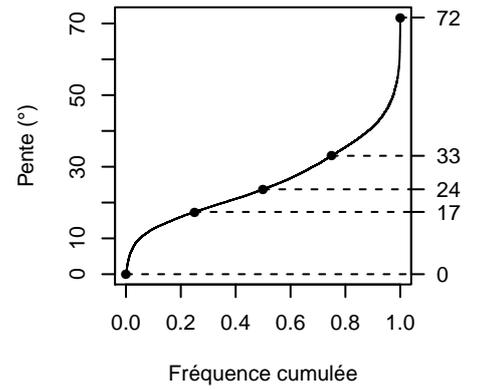
LeVorz à SainteAgnès



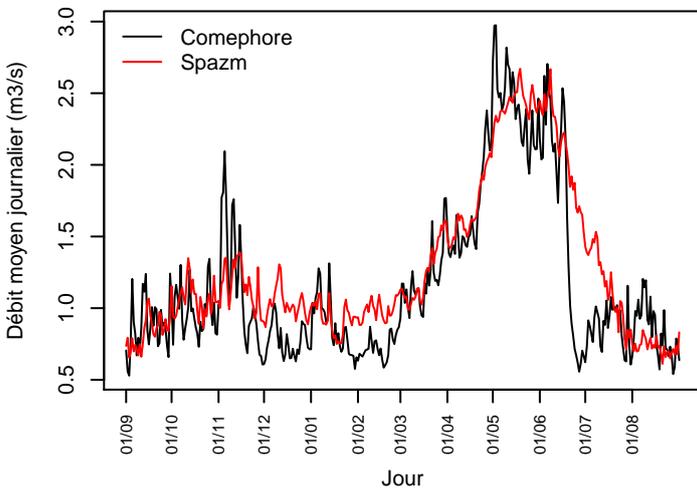
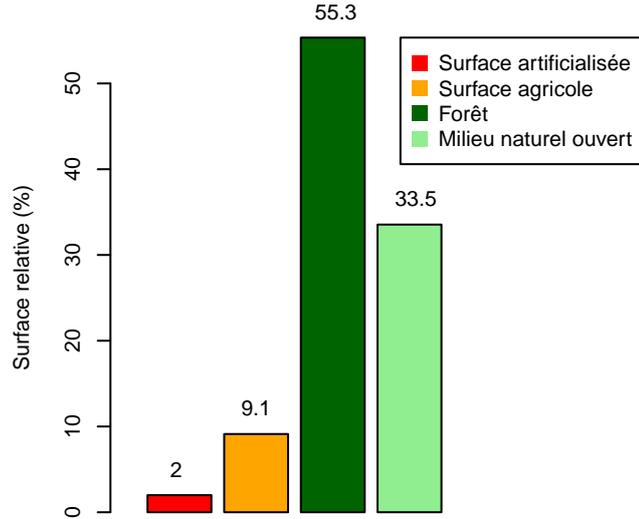
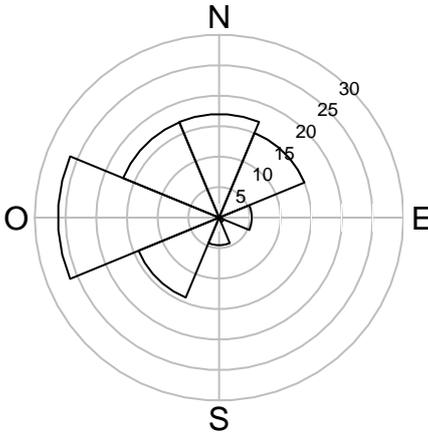
Hypsométrie



Pentes



Orientation

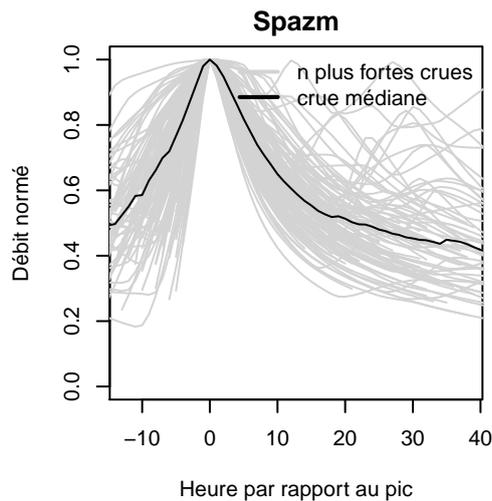
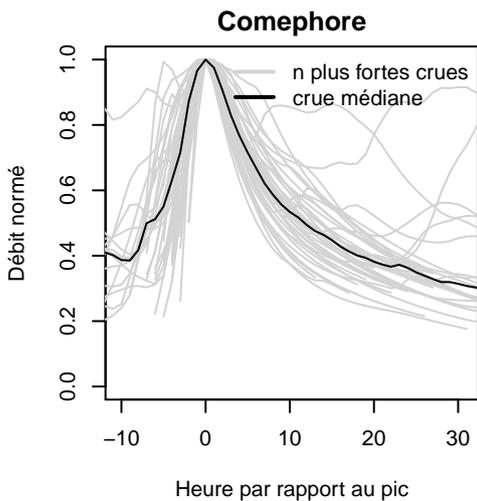


Cumuls mensuels moyens (mm)

	09	10	11	12	01	02	03	04	05	06	07	08	An
Ps	150	168	188	188	176	157	159	143	155	155	147	150	1940
Pc	105	111	126	103	111	85	96	95	122	110	116	122	1307
Qs	70	81	93	64	73	55	99	134	202	136	72	70	1156
Qc	67	89	93	86	77	75	103	136	203	171	96	60	1260

Intensités max

	2h	4h	6h	12h	24h	36h	48h
Ps (mm/h)	14.5	14.5	14.5	9.12	6	5.64	5.39
Pc (mm/h)	21.4	13.5	9.78	5.62	3.33	2.41	1.9
Qs (m3/s)	23.6	23.2	22.6	20.4	16.9	14.1	12.3
Qc (m3/s)	23.4	22.5	21.6	19.3	16.4	13.9	12.4



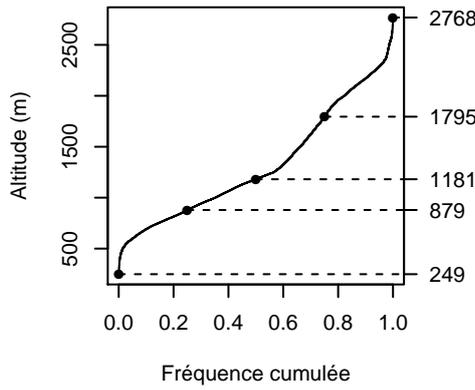
Quantiles (m3/s)

	M.c	M.sp	Sh
QP_2	14.8	11.5	8.4
QP_5	18	14.4	12.1
QP_10	20.4	16.7	16
QP_20	22.9	19.1	21.4
QP_50	26.1	22.2	31.8
QP_100	28.6	24.7	43

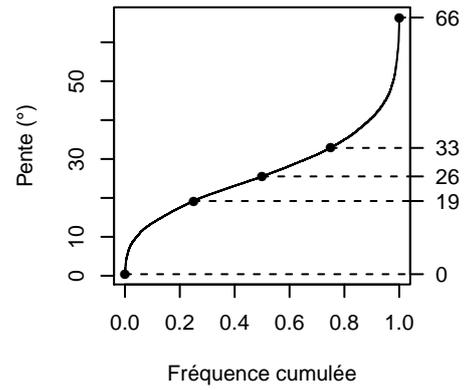
Ruisseaux Lancey à VillardBonnot



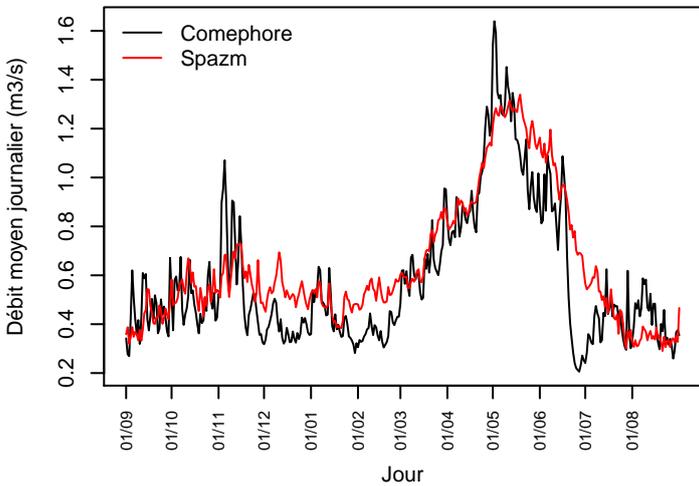
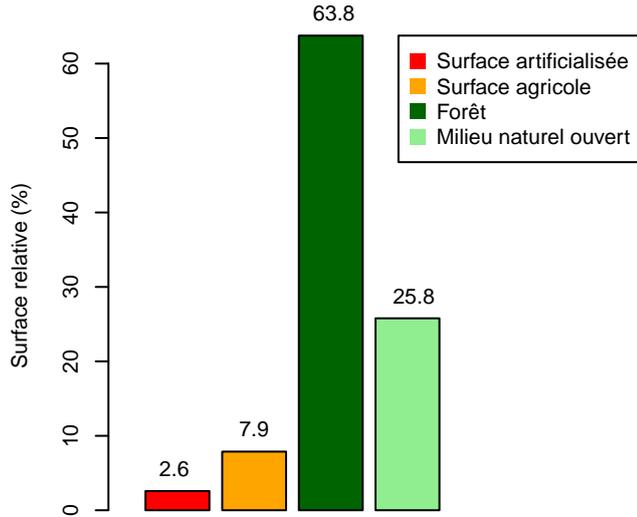
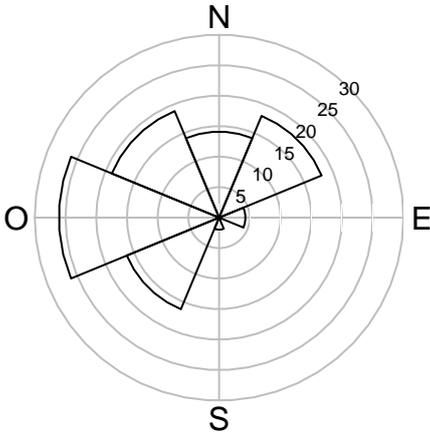
Hypsométrie



Pentes



Orientation

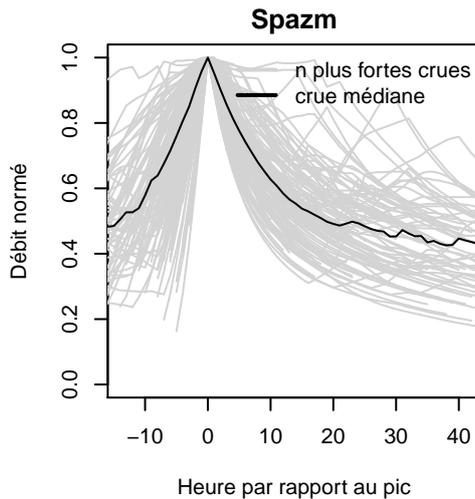
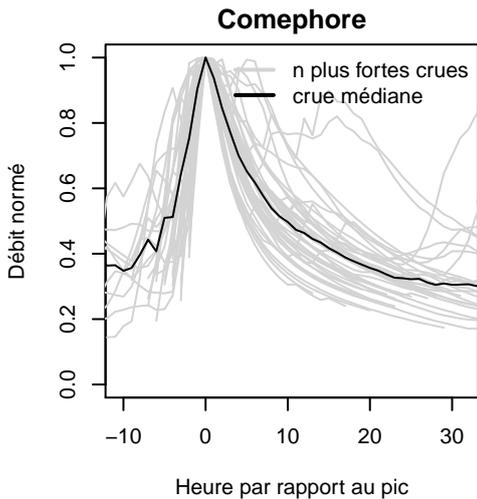


Cumuls mensuels moyens (mm)

	09	10	11	12	01	02	03	04	05	06	07	08	An
Ps	147	165	183	182	171	152	155	139	151	150	141	145	1887
Pc	101	104	118	92	100	77	88	91	116	99	108	114	1214
Qs	67	78	92	60	68	53	101	140	188	103	64	65	1084
Qc	63	85	92	84	75	76	107	142	196	142	76	53	1196

Intensités max

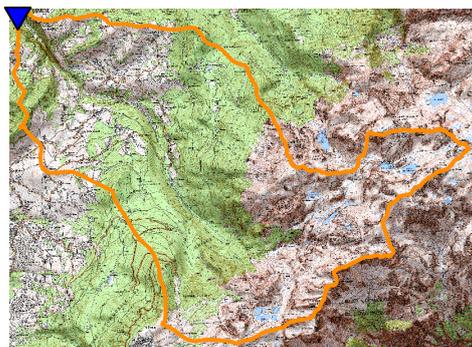
	2h	4h	6h	12h	24h	36h	48h
Ps (mm/h)	14.8	14.8	14.8	9.3	5.74	5.51	5.33
Pc (mm/h)	19.4	12.3	8.33	5.95	3.94	2.67	2
Qs (m3/s)	13.2	12.1	11.3	9.5	7.83	6.63	5.86
Qc (m3/s)	12.5	11.9	11.2	10.1	8.41	7.15	6.35



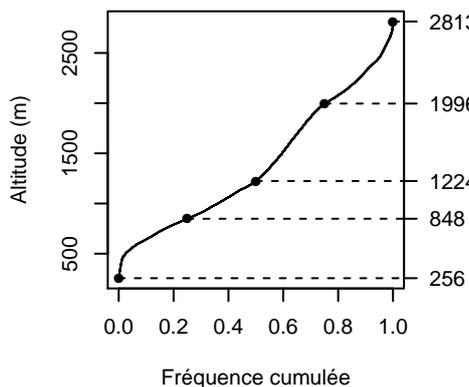
Quantiles (m3/s)

	M.c	M.sp	Sh
QP_2	8.3	6.05	4
QP_5	10	7.67	5.8
QP_10	11.3	8.92	7.8
QP_20	12.6	10.2	10.5
QP_50	14.4	12	15.9
QP_100	15.7	13.3	22

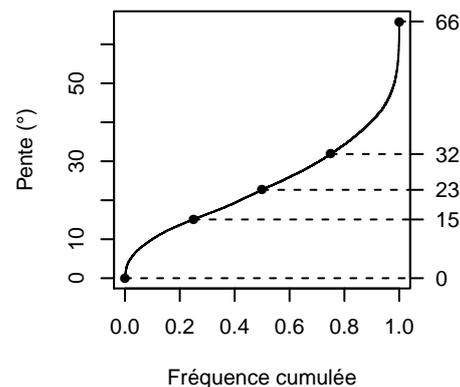
Le Domeynon à Domene



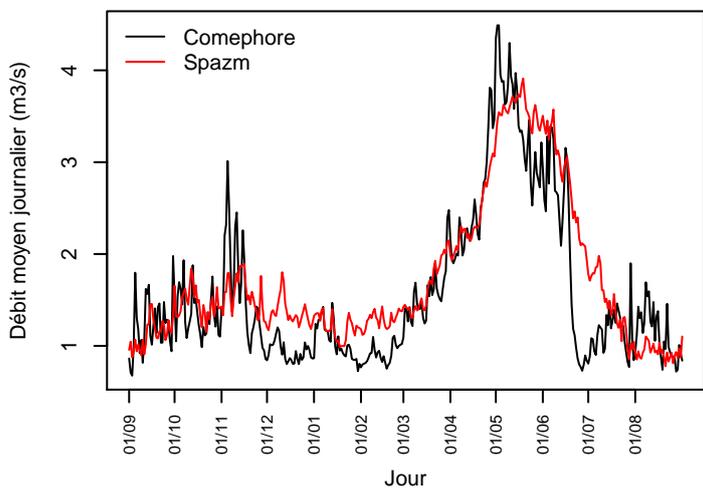
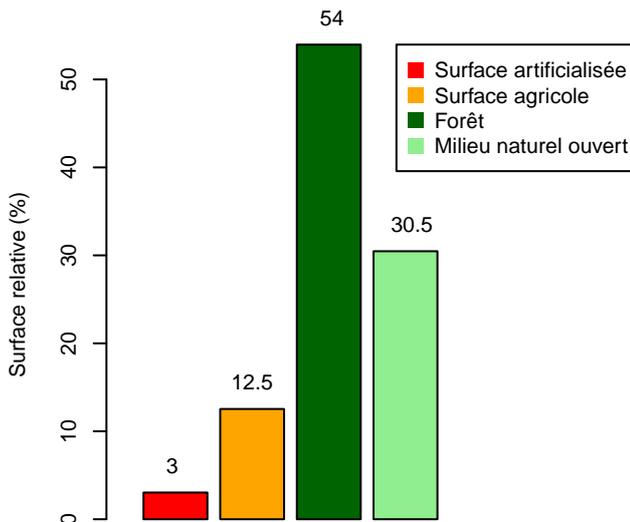
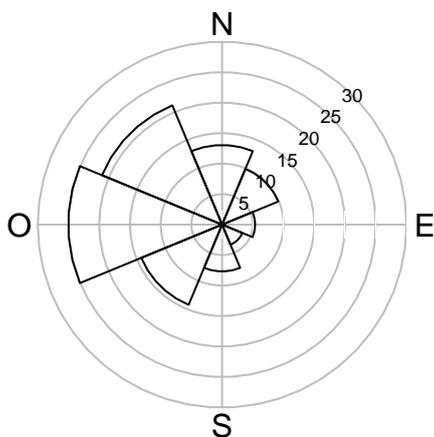
Hypsométrie



Pentes



Orientation

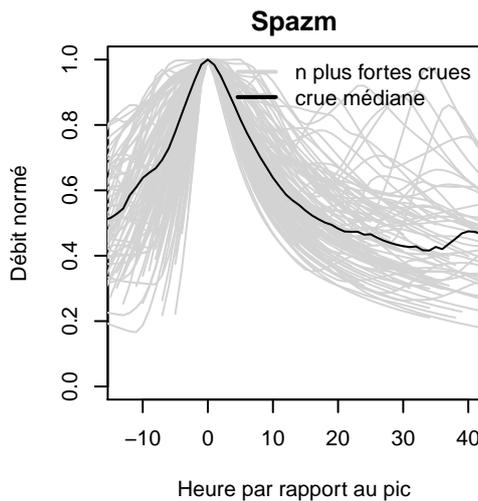
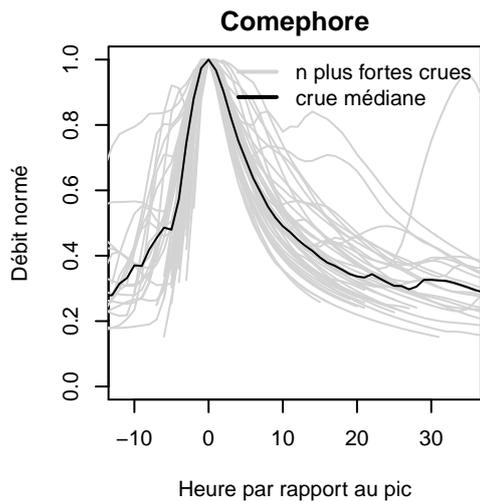


Cumuls mensuels moyens (mm)

	09	10	11	12	01	02	03	04	05	06	07	08	An
Ps	145	165	183	181	170	151	154	135	147	144	134	140	1853
Pc	98	101	115	85	93	74	85	90	114	92	102	107	1163
Qs	62	85	87	78	69	67	95	134	206	158	83	53	1183
Qc	67	78	89	54	60	47	90	140	202	117	66	65	1081

Intensités max

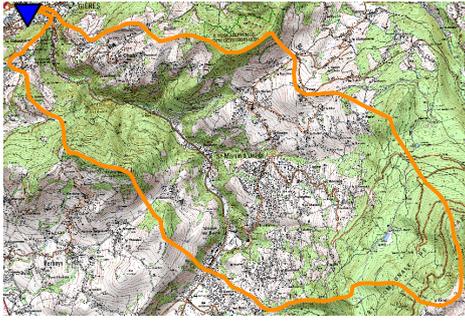
	2h	4h	6h	12h	24h	36h	48h
Ps (mm/h)	15.6	15.6	15.6	9.82	5.98	5.77	5.53
Pc (mm/h)	16.5	10.5	8.21	6.18	3.59	2.47	1.96
Qs (m3/s)	35.9	34.8	32.9	28.2	22.4	18.9	16.5
Qc (m3/s)	33.5	32	30.6	27.2	22.7	18.6	16.1



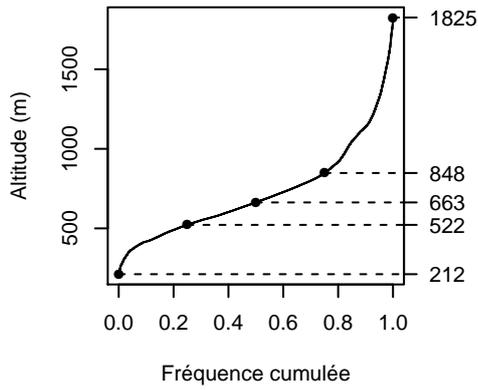
Quantiles (m3/s)

	M.c	M.sp	Sh
QP_2	22	15.8	9.4
QP_5	26.4	20	13.4
QP_10	29.9	23.4	17.5
QP_20	33.6	27	23.1
QP_50	39	32.2	33.8
QP_100	43.4	36.5	45.6

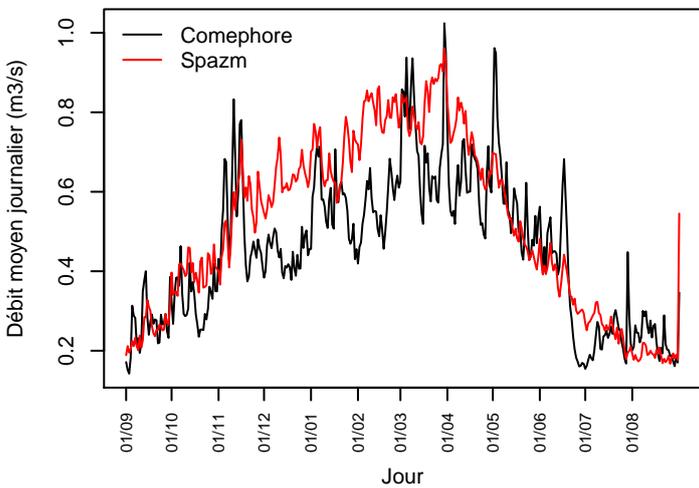
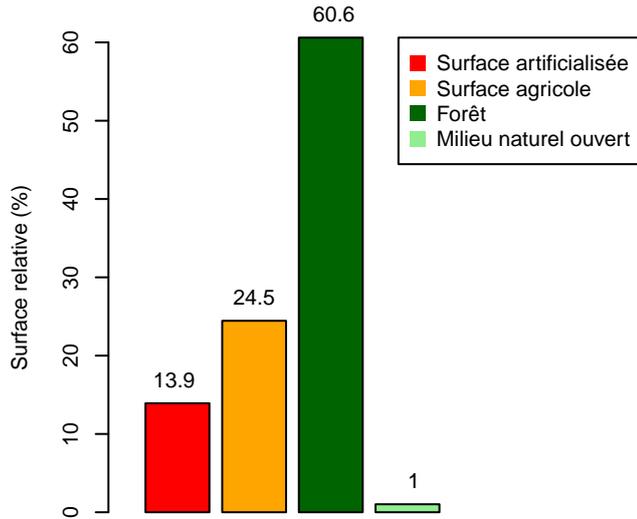
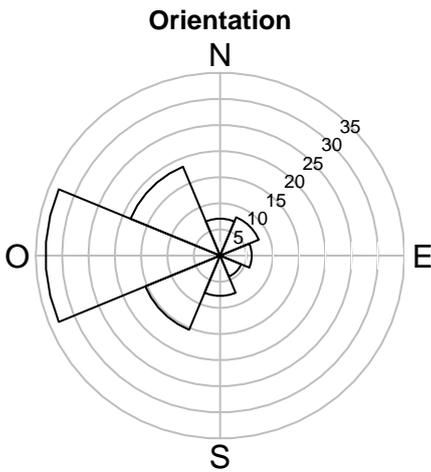
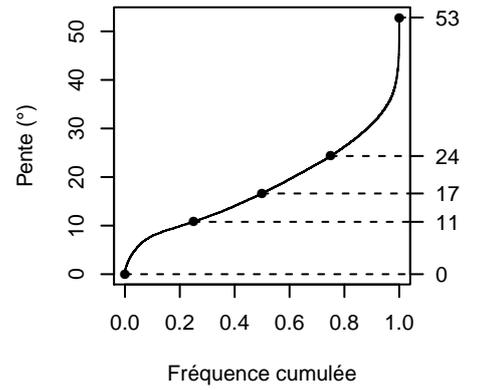
Le Sonnant à Gieres



Hypsométrie



Pentes

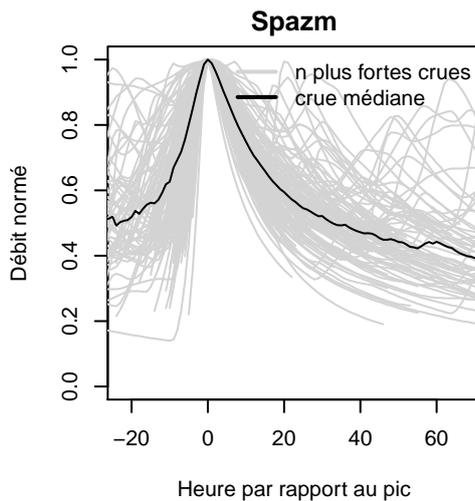
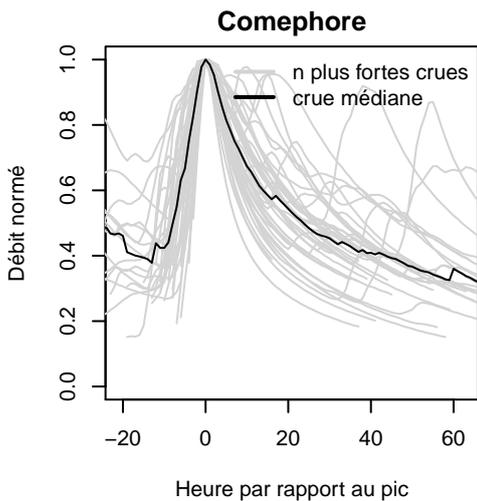


Cumuls mensuels moyens (mm)

	09	10	11	12	01	02	03	04	05	06	07	08	An
Ps	107	117	124	117	111	99	105	99	110	105	94	101	1295
Pc	101	100	115	83	91	75	87	93	120	93	99	108	1171
Qs	24	40	54	63	69	73	84	70	53	37	26	19	618
Qc	25	33	52	44	58	51	73	60	59	38	23	23	545

Intensités max

	2h	4h	6h	12h	24h	36h	48h
Ps (mm/h)	12.4	12.4	12.4	7.79	4.44	3.93	3.63
Pc (mm/h)	15.8	12.2	9.64	7.52	4.21	2.81	2.19
Qs (m3/s)	10.7	10.6	10.5	10.1	9.44	8.63	7.75
Qc (m3/s)	9.02	8.87	8.67	8	6.9	5.87	5.07



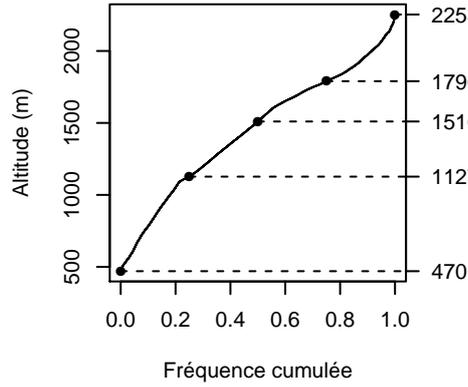
Quantiles (m3/s)

	M.c	M.sp	Sh
QP_2	5.42	5.05	5
QP_5	6.71	6.36	6.9
QP_10	7.68	7.37	8.8
QP_20	8.66	8.39	11.2
QP_50	9.95	9.76	15.4
QP_100	10.9	10.8	20.1

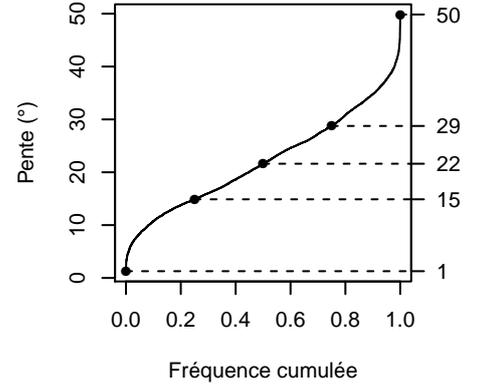
Le Vernon à Vaulnaveys le Haut



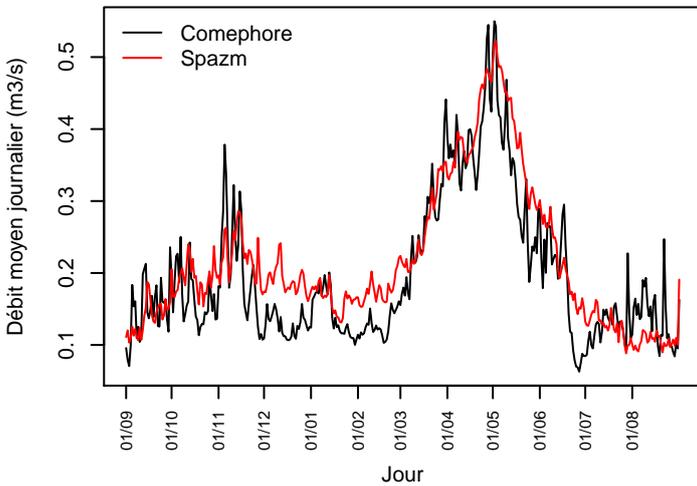
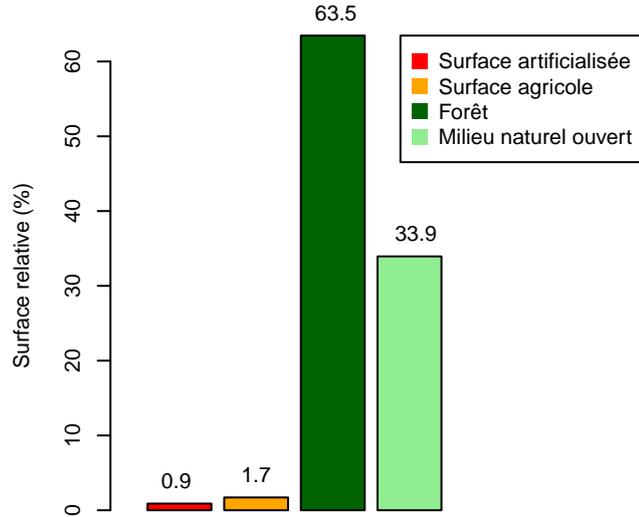
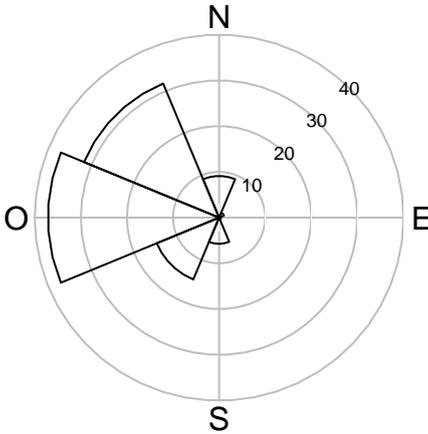
Hypsométrie



Pentes



Orientation



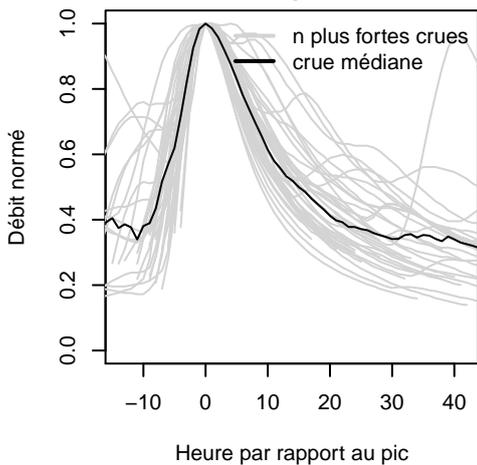
Cumuls mensuels moyens (mm)

	09	10	11	12	01	02	03	04	05	06	07	08	An
Ps	142	162	176	171	160	142	145	129	142	136	125	134	1769
Pc	103	101	114	81	89	76	87	96	123	93	101	109	1178
Qs	58	84	95	83	72	70	115	168	174	91	55	45	1115
Qc	62	72	89	56	63	51	113	164	148	77	55	59	1013

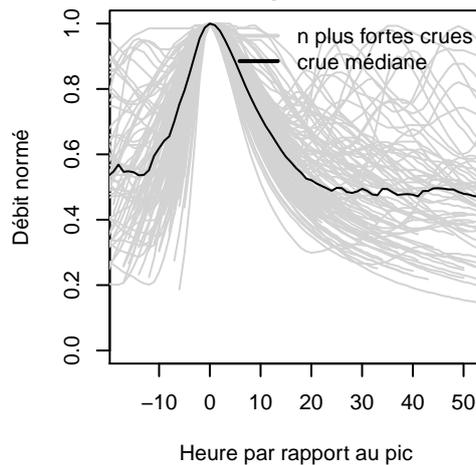
Intensités max

	2h	4h	6h	12h	24h	36h	48h
Ps (mm/h)	15.6	15.6	15.6	9.85	5.75	5.28	4.8
Pc (mm/h)	17	11.7	9.66	6.76	4.61	3.7	2.92
Qs (m3/s)	4.54	4.45	4.32	3.87	3.18	2.69	2.35
Qc (m3/s)	4.29	4.25	4.18	3.9	3.36	2.87	2.44

Comephore



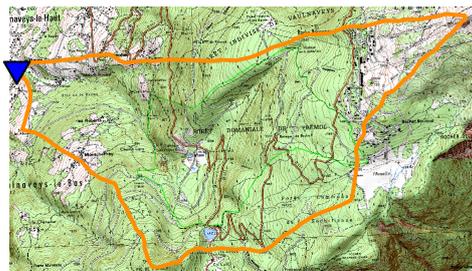
Spazm



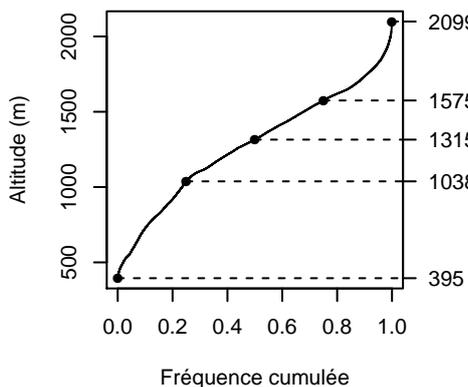
Quantiles (m3/s)

	M.c	M.sp	Sh
QP_2	2.68	2.04	1.3
QP_5	3.31	2.59	2
QP_10	3.79	3.04	2.7
QP_20	4.26	3.53	3.6
QP_50	4.87	4.23	5.6
QP_100	5.34	4.81	7.9

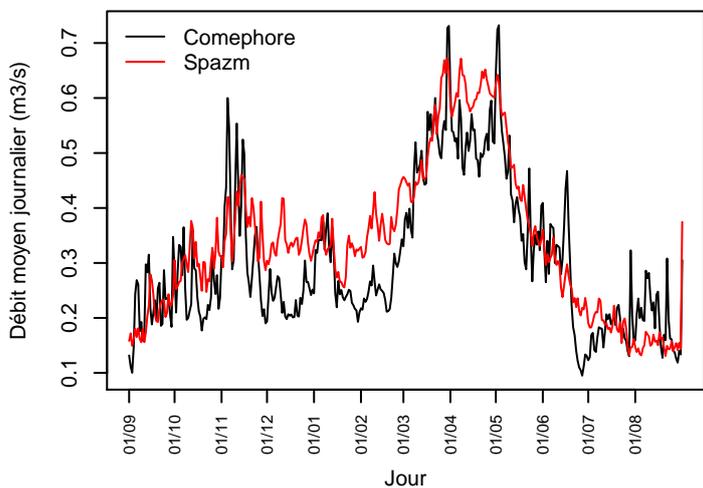
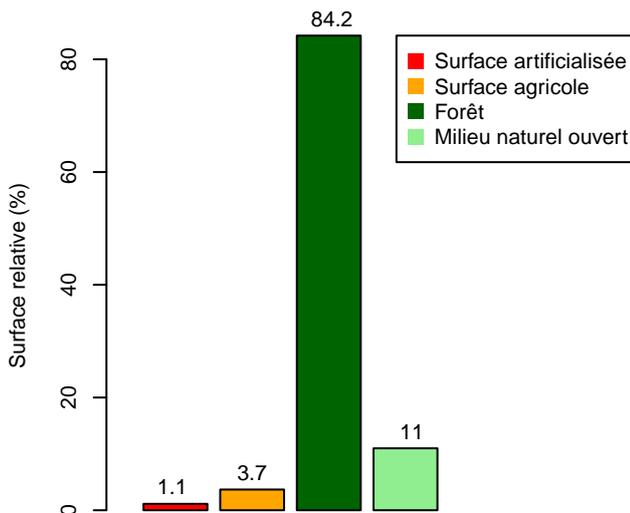
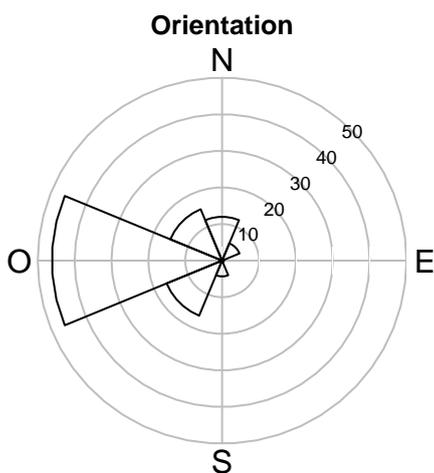
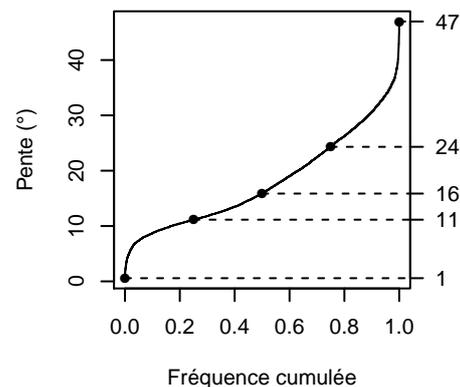
Torrent de Premol à Vaulnaveys le Bas



Hypsométrie



Pentes

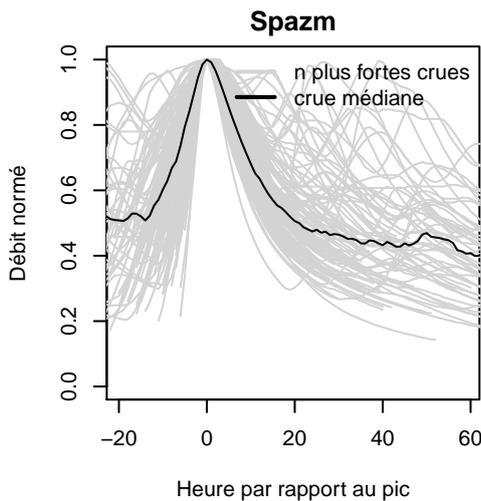
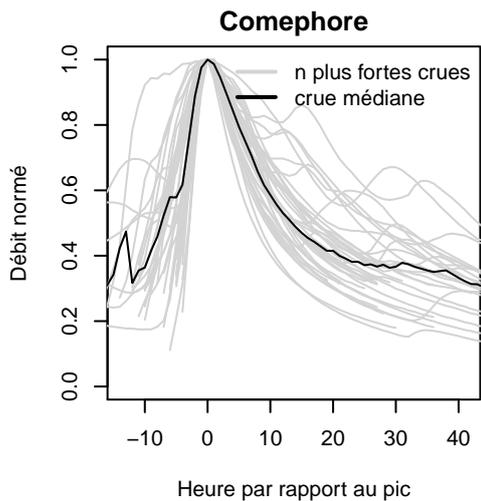


Cumuls mensuels moyens (mm)

	09	10	11	12	01	02	03	04	05	06	07	08	An
Ps	129	146	157	150	140	124	129	115	129	123	112	121	1580
Pc	103	102	117	81	90	75	85	94	121	92	98	108	1171
Qs	45	69	83	78	73	77	118	136	105	60	42	34	925
Qc	48	57	79	54	64	54	114	117	99	59	41	44	835

Intensités max

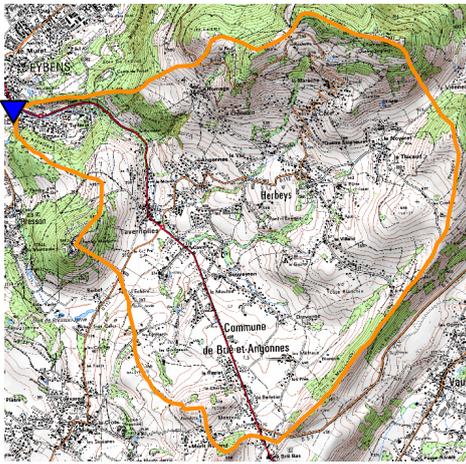
	2h	4h	6h	12h	24h	36h	48h
Ps (mm/h)	14.4	14.4	14.4	9.06	5.26	4.6	4.16
Pc (mm/h)	15.5	12.6	10.6	6.9	4.14	3.27	2.63
Qs (m3/s)	7.28	7.05	6.84	6	4.81	4.02	3.55
Qc (m3/s)	9.34	9.03	8.59	7.09	5.1	4.01	3.48



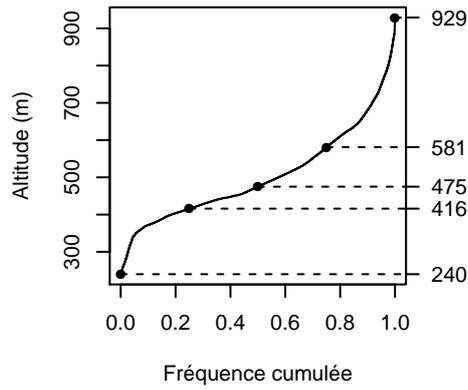
Quantiles (m3/s)

	M.c	M.sp	Sh
QP_2	4.01	3.46	1.7
QP_5	5.14	4.38	2.4
QP_10	6.26	5.11	3.2
QP_20	7.69	5.86	4.3
QP_50	10.2	6.91	6.5
QP_100	12.7	7.73	9.2

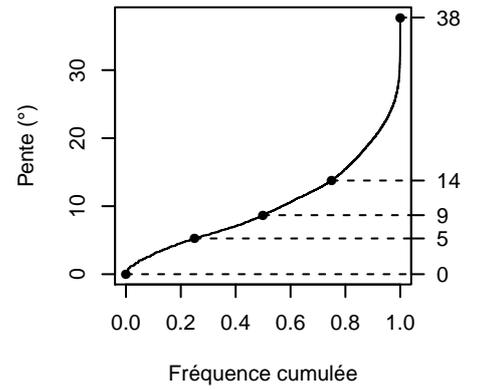
Le Verderet à Eybens



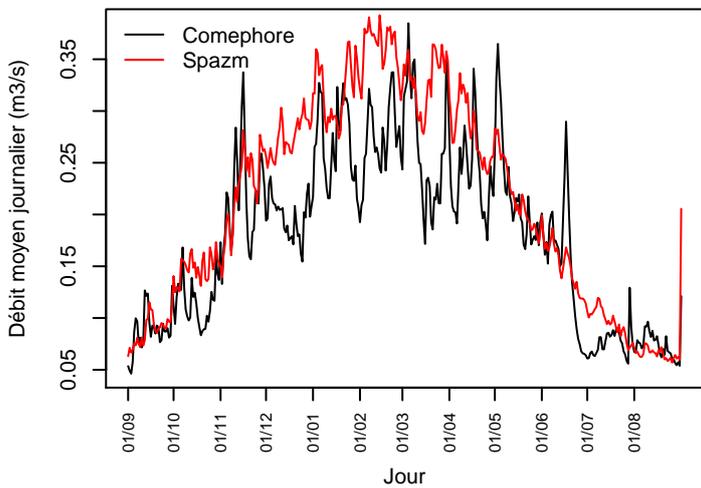
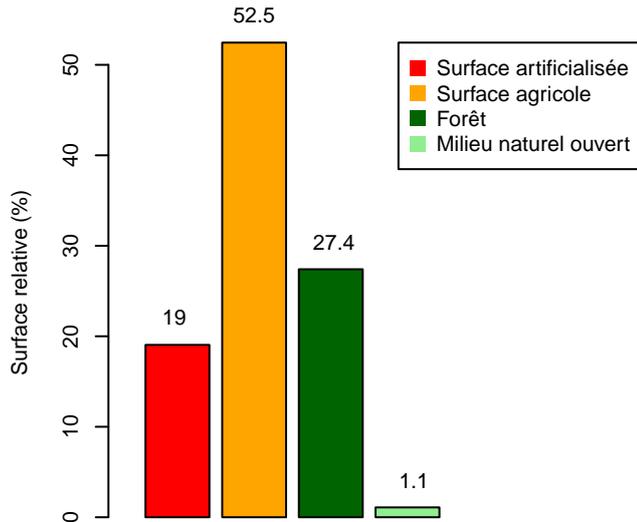
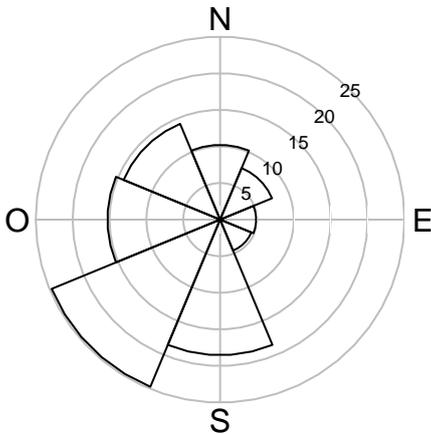
Hypsométrie



Pentes



Orientation

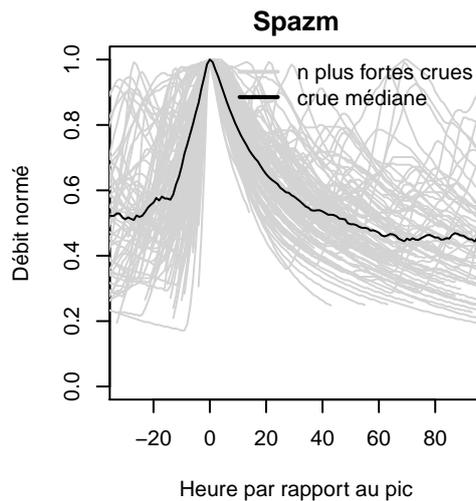
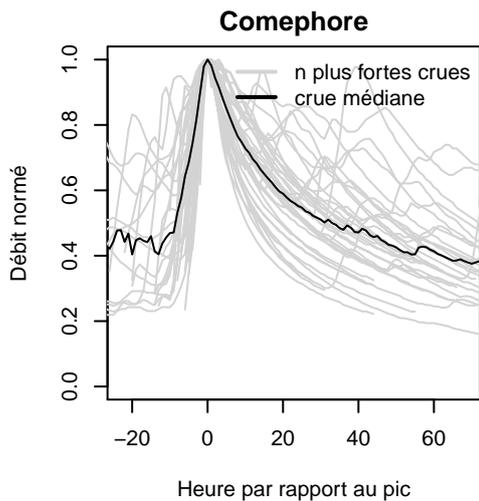


Cumuls mensuels moyens (mm)

	09	10	11	12	01	02	03	04	05	06	07	08	An
Ps	95	103	107	98	92	83	91	89	101	93	81	88	1126
Pc	96	95	113	81	88	70	81	87	111	90	89	101	1108
Qs	15	26	38	49	57	59	59	49	39	26	17	11	452
Qc	15	20	37	35	48	44	47	41	40	27	13	13	386

Intensités max

	2h	4h	6h	12h	24h	36h	48h
Ps (mm/h)	11.2	11.2	11.2	7.01	4	3.17	2.78
Pc (mm/h)	14.6	12.3	9.59	7.11	3.92	2.61	2.21
Qs (m3/s)	3.72	3.7	3.68	3.57	3.27	2.98	2.73
Qc (m3/s)	3.86	3.79	3.69	3.34	2.78	2.39	2.17



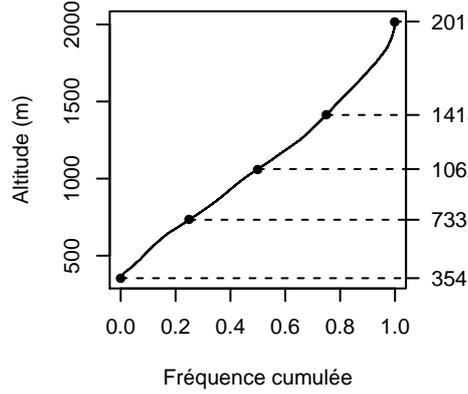
Quantiles (m3/s)

	M.c	M.sp	Sh
QP_2	2.15	2.09	2.5
QP_5	2.67	2.58	3.6
QP_10	3.03	2.91	4.6
QP_20	3.37	3.22	5.8
QP_50	3.78	3.57	8
QP_100	4.06	3.82	10.4

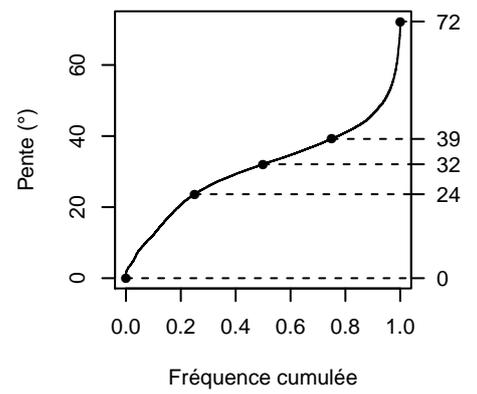
Le Lavanchon à Saint Paul de Varcès [Maubourg]



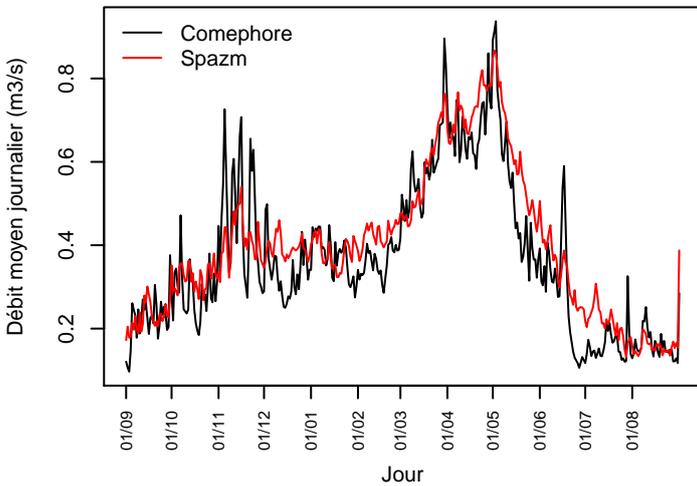
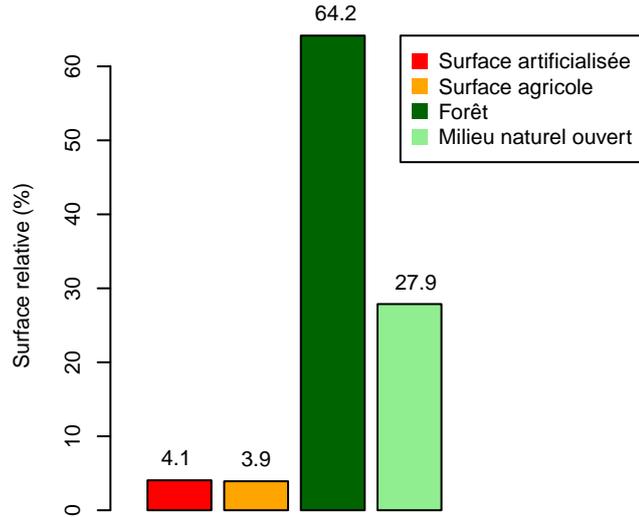
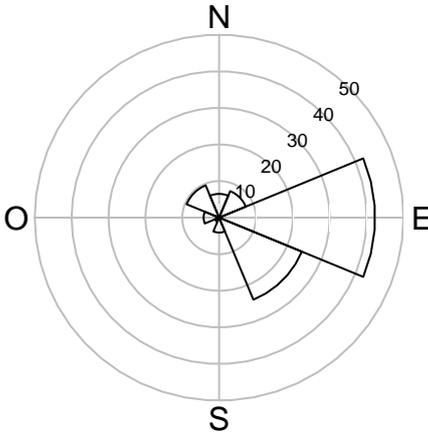
Hypsométrie



Pentes



Orientation

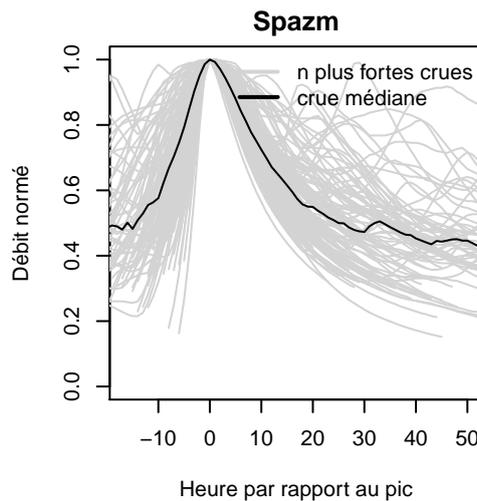
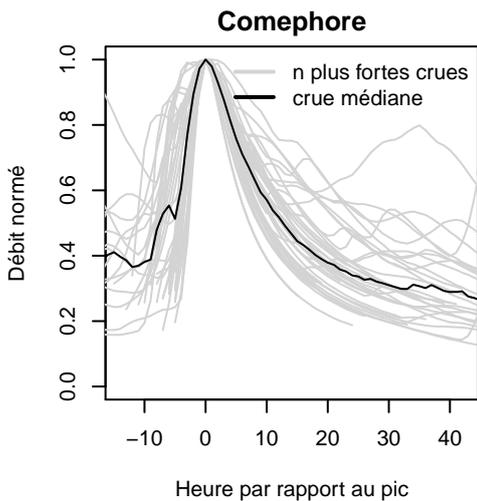


Cumuls mensuels moyens (mm)

	09	10	11	12	01	02	03	04	05	06	07	08	An
Ps	118	129	138	126	119	107	116	115	126	111	99	105	1416
Pc	101	100	127	90	97	76	86	90	106	80	82	92	1133
Qs	36	53	66	64	63	63	94	116	103	54	35	25	777
Qc	35	47	74	55	62	54	95	108	88	45	26	26	719

Intensités max

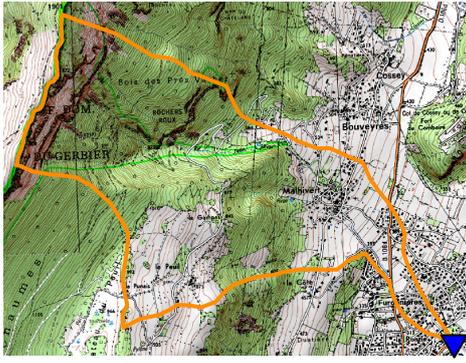
	2h	4h	6h	12h	24h	36h	48h
Ps (mm/h)	12.4	12.4	12.4	7.81	5.51	4.4	3.62
Pc (mm/h)	20.4	11.5	8.69	6.9	4.06	2.71	2.13
Qs (m3/s)	7.97	7.8	7.53	6.71	5.41	4.54	4.45
Qc (m3/s)	11.7	11.5	11.2	9.91	7.68	6.31	6.1



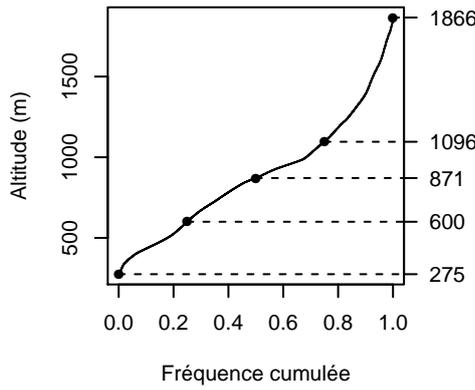
Quantiles (m3/s)

	M.c	M.sp	Sh
QP_2	5.48	3.83	2.5
QP_5	7.27	4.7	3.6
QP_10	8.9	5.33	4.6
QP_20	10.8	5.94	5.9
QP_50	13.8	6.71	8.1
QP_100	16.5	7.27	10.5

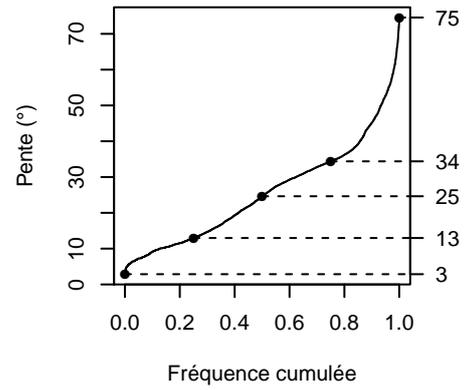
Le Rif Talon à Claix



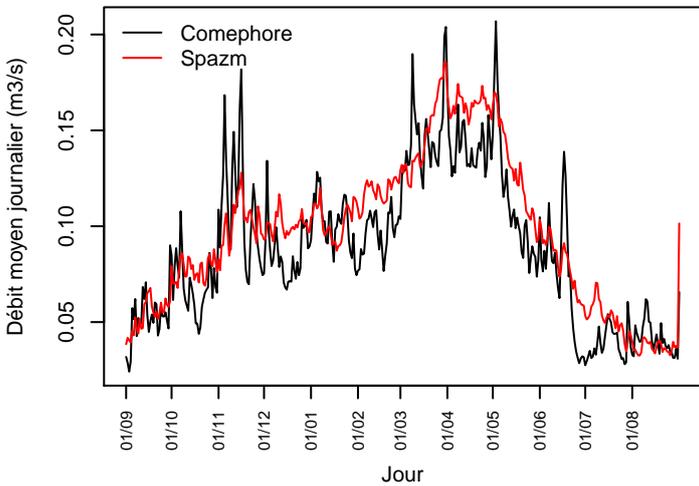
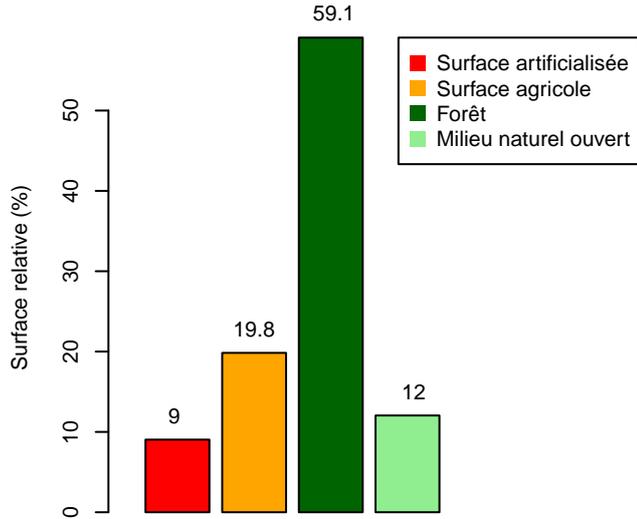
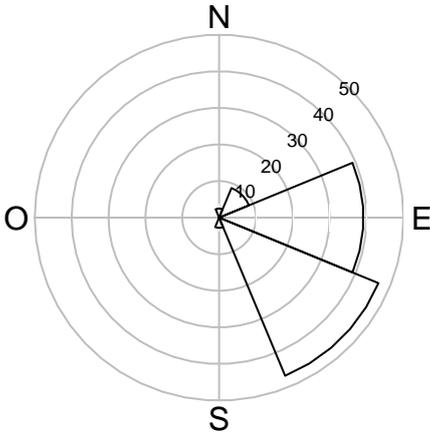
Hypsométrie



Pentes



Orientation

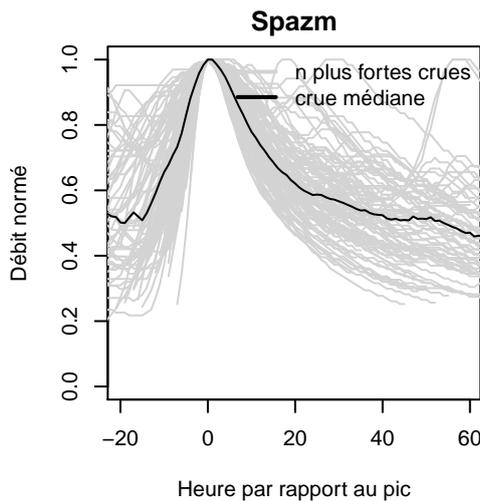
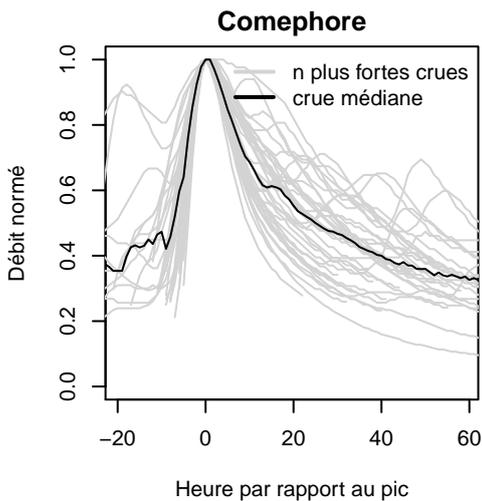


Cumuls mensuels moyens (mm)

	09	10	11	12	01	02	03	04	05	06	07	08	An
Ps	119	127	134	121	114	103	115	117	129	113	100	108	1405
Pc	97	96	119	85	91	72	82	88	104	84	83	96	1103
Qs	33	50	64	66	67	70	96	104	85	51	34	24	750
Qc	32	45	70	56	67	57	95	89	74	47	25	27	689

Intensités max

	2h	4h	6h	12h	24h	36h	48h
Ps (mm/h)	11.6	10.3	10.3	7.48	5.35	4.24	3.41
Pc (mm/h)	14.9	11.4	8.87	6.8	3.9	2.6	2.2
Qs (m3/s)	1.4	1.4	1.4	1.39	1.28	1.15	1.03
Qc (m3/s)	2.81	2.78	2.72	2.47	1.98	1.64	1.57



Quantiles (m3/s)

	M.c	M.sp	Sh
QP_2	1.11	0.85	0.5
QP_5	1.42	1.02	0.7
QP_10	1.67	1.12	0.9
QP_20	1.94	1.21	1.2
QP_50	2.34	1.31	1.8
QP_100	2.67	1.37	2.5

Bassin	Surface (km ²)	Shyreg	Mordor (Comephore)	Mordor (Spazm)	Crupedix (Comephore)	Crupedix (Spazm)	Valeur/plage litt.
Lanfrey	6.4	5.2	3.6	2.2	6.2	3.7	6.6 - 9 ¹
Charmeyran	4.4	4.8	1.9	1.4	2.3	1.8	
Torrent de Jaillères	0.88	0.4	0.49	0.37	0.65	0.58	
Ruisseau de Laval	31.7	16	20.5	17.2	11.9	20.5	20 ²
Vorz	32	16	20.4	16.7	15.7	22.6	17.5 ²
Ruisseau de Lancey	16.9	7.8	11.3	8.9	9.3	12.6	15 ²
Domeynon	46.2	17.5	29.9	23.4	22.7	28.9	30 ²
Sonnant	25.8	8.8	7.7	7.4	7.6	8.7	16 ³
Vernon	6.1	2.7	3.8	3	5.2	5.4	4 ³
Premol	11.6	3.2	6.3	5.1	7.2	7.1	7.0 ³
Verderet	14.8	4.6	3	2.9	4	4.1	9.2 - 10.5 ⁴
Lavanchon	16.2	4.6	8.9	5.3	7.8	8.6	
Rif Talon	4.1	0.9	1.7	1.1	2.3	2.3	

TABLE 2 – Estimations du débit de pointe de temps de retour 10 ans (en m³/s) avec Shyreg, MORDOR-SD et Crupedix et valeurs trouvées dans la littérature. Les exposants renvoient aux références bibliographiques (¹Hydretudes (2012a); ²Alp'Géorisques (2007); ³TEREO - Hydretudes (2013); ⁴Hydretudes (2012c)).

4 Analyse des résultats

4.1 Régimes d'écoulement

Les bassins de l'échantillon sont représentatifs de deux grands types de régime d'écoulement. Le Lanfrey, le Charmeyran, le torrent de Jaillères, le Sonnant, et le Verderet sont caractérisés par un régime pluvial à pluvio-nival avec en moyenne une période de hautes eaux de novembre à mai et une période de basses eaux de juin à octobre. Les plus hautes eaux sont généralement atteintes entre mars et avril, leur occurrence pouvant être retardée par l'éventuelle contribution de la fonte de la neige sur les parties les plus élevées des bassins.

Les autres bassins sont caractérisés par un régime pluvio-nival à nival avec deux périodes de hautes eaux. La première, relativement courte, au mois de novembre, est liée aux précipitations de début d'hiver encore majoritairement sous forme liquide. La deuxième, plus longue, a lieu d'avril à juin et correspond à la période de fonte du manteau neigeux. L'occurrence plus ou moins tard dans l'année des plus hautes eaux est lié au stock de neige disponible et donc à l'hypsométrie du bassin. Entre ces deux périodes le débit des cours d'eaux est relativement faible.

4.2 Quantiles de débits

Les débits de pointe de période de retour 10 ans estimés avec plusieurs approches sont présentés dans le tableau 2. Leur analyse fait ressortir un certain nombre de points d'intérêt détaillés ci-après.

1. Pour le Charmeyran, le ruisseau de Jaillères, le Lavanchon et le Rif Talon, aucune estimation du Q₁₀ n'a pu être trouvée dans la littérature. Pour le Charmeyran, les débits de pointe de crue de projet utilisées pour la modélisation hydraulique sont entre 6 et 11 m³/s (Alp'Géorisques, 2018), mais la période de retour n'est pas précisée. Pour le ruisseau de Jaillères, le Q₁₀ en aval de notre point de modélisation (bassin de 1.2 km²) est estimé entre 1.4 et 3 m³/s (Hydretudes, 2012b).
2. Sur les bassins nivaux, les Q₂ à Q₁₀ (voir Q₂₀) estimés avec MORDOR-SD sont supérieurs à Shyreg. Sur les autres bassins, c'est l'inverse. On atteint probablement ici une des limites de

Shyreg qui ne prend pas en compte l'influence de la neige et peut donc sous-estimer les débits sur ces bassins.

3. Les Q50 et Q100 maximaux sont toujours fournis par Shyreg sauf pour le Premol, le Lavanchon et le Rif Talon où les simulations avec MORDOR-SD et Comephore donnent les débits les plus forts. De manière générale, les Q50 et Q100 calculés à partir des simulations de MORDOR-SD sont à considérer avec précaution car ils se situent dans la zone d'extrapolation de l'ajustement statistique où les incertitudes peuvent être importantes. Le fait que l'on travaille sur des chroniques courtes explique en partie pourquoi nos ajustements de quantiles sont "plats", i.e. généralement $QT_{SHYREG} < QT_{MORDOR}$ pour $T = 2$ ans, 5 ans et 10 ans, et $QT_{SHYREG} > QT_{MORDOR}$ pour $T = 50$ ans et 100 ans.
4. Le ratio $\frac{Q_{100}}{Q_{10}} = 2$ qu'on trouve fréquemment dans les rapports d'ingénierie (Alp'Géorisques, 2007) est très majorée par Shyreg (où le rapport est plutôt de 2.5 à 3) et minoré par MORDOR-SD (1.5 en moyenne) sauf sur le Premol, le Lavanchon et le Lanfrey où on retrouve le rapport 2. Encore une fois, l'extrapolation du Q100 avec nos données est questionnable.
5. les valeurs du Q10 spécifiques (i.e. rapporté à la surface du bassin) sont entre $0.55 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ et $0.65 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ pour 9 bassins, soit autour de la valeur de $0.6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ mentionnée dans TERE0 - Hydretudes (2013). Pour le Charmeyran et le Rif Talon, le débit spécifique décennal vaut $0.42 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$. Les valeurs pour le Sonnant et le Verderet sont nettement plus faibles avec respectivement $0.3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ et $0.2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$. Sur ces deux bassins, les Q10 calculés avec MORDOR et Shyreg sont très inférieurs (la moitié voir le tiers) aux estimations de la littérature. Le Sonnant et le Verderet ont comme caractéristiques communes une moyenne des pentes assez faible et une superficie relative en surface agricole élevée, qui peuvent à la fois retarder et ralentir les écoulements superficiels. Ces bassins présentent peut être donc un fonctionnement hydrologique différent du reste de l'échantillon qui n'est pas bien reproduit par la paramétrisation des modèles de transformation pluie-débit. De plus sur ces bassins, la méthode Crupedix donne des valeurs similaires à Shyreg et MORDOR, alors qu'elle ne tient pas compte du fonctionnement hydrologique du bassin mais uniquement de l'information sur la pluie PJ10. Il est donc également possible qu'il y ait des écarts entre l'information pluviométrique fournie par Spazm et Comephore et celle utilisée pour les estimations trouvées dans la littérature, et que ces différences sur les précipitations se traduisent par des écarts entre les Q10.
6. Sur les bassins qui ont une part importante de leur superficie en haute montagne, à savoir le Vorz, le Domeynon, le ruisseau de Laval et le ruisseau de Lancey, on constate que les Q10 simulés avec Mordor-Comephore sont supérieurs à ceux simulés avec Mordor-Spazm, tandis que les Q10 Crupedix-Spazm sont supérieurs aux Crupedix-Comephore. En effet, Crupedix utilise la pluie journalière (de période de retour 10 ans) et les cumuls journaliers sont sous-estimés avec Comephore par rapport à Spazm. En revanche, l'information de précipitation horaire est moins bonne avec Spazm désagrégé et la transformation pluie-débit du modèle engendre une sous-estimation des débits.

4.3 Analyse événementielle

Les crues du 22 et 23 août 2005 sur le massif de Belledonne sont représentatives des événements que le projet HYDRODEMO vise à mieux caractériser. Ces crues ont été caractérisées par :

- Une situation météorologique particulière, avec des précipitations intenses et continues sur 48 heures et un fort gradient altitudinal.
- Un transport solide important qui a généré de nombreux dégâts.

Ces deux points sont les principales limites mises en avant pour expliquer les incertitudes entourant les estimations quantitatives de débit proposées dans la majorité des études menées après les

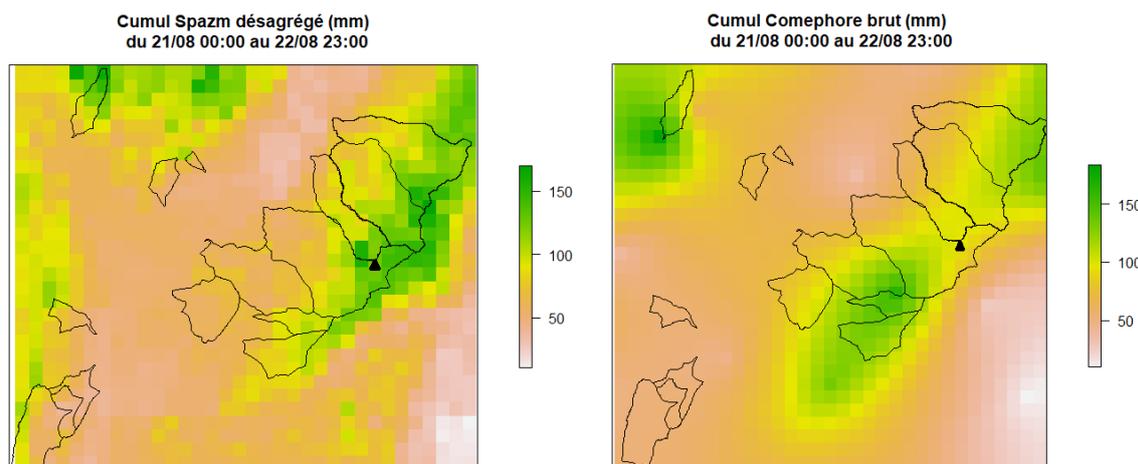


FIGURE 2 – Cumul de précipitation Spazm désagrégé et Comephore lors de l'évènement d'août 2005 sur le massif de Belledonne. Les contours noirs représentent les bassins cibles de ce travail. Le triangle noir indique le refuge de la Pra.

crues. La méconnaissance des précipitations en montagne, là où elles ont été les plus intenses, limite les possibilités d'estimer précisément les volumes précipités. L'exploitation des hauteurs d'écoulement dans un modèle hydraulique pour estimer les débits est rendu incertain par l'engravement parfois important des sections de cours d'eau.

Les cumuls de précipitation Spazm et Comephore lors de l'évènement sont présentés sur la figure 2. Avec Comephore, les cumuls sur l'extrême sud du massif de Belledonne sont bien reproduits. La valeur à proximité de la station météorologique de Chamrousse (163 mm) est proche du cumul mesuré à cette station (159 mm). Les cumuls sont en revanche largement sous-estimés sur la partie amont des bassins du Domeynon, du Vorz et du ruisseau de Laval, le cumul au refuge de la Pra (localisé sur la figure 2) ayant été estimé à 300 mm (Obled *et al.*, 2006). Le forçage Spazm désagrégé rend mieux compte du gradient orographique et identifie mieux la localisation des zones de plus fort cumul, à l'amont des bassins du Domeynon et du Vorz. Les cumuls sur l'épisode sont cependant largement sous-estimés, avec 82 mm à proximité de la station météorologique de Chamrousse.

Les simulations de débit sur cet évènement sont présentées dans la figure 3 et font largement ressortir les constats effectués sur les précipitations. Sur le Sonnant, le Vernon et le Premol, les écarts importants de cumuls entre Comephore et Spazm expliquent les différences très marquées entre les hydrogrammes. L'utilisation de coefficients de correction des précipitations (voir rapport calage et régionalisation de MORDOR) exacerbe ces écarts. Sur le Domeynon, le ruisseau de Lancey, le Vorz et le ruisseau de Laval, les cumuls de précipitation avant correction sont supérieurs avec Spazm. Après correction, ils sont supérieurs d'environ 20 % avec Comephore. Les différences de répartition horaire des précipitations, de paramétrage du modèle selon le forçage utilisé et d'état antérieur du bassin permettent d'expliquer les écarts observés à la fois sur les débits de pointe et sur les volumes, qui sont systématiquement supérieurs avec Comephore.

En conséquence, les débits de pointe sont très inférieurs aux estimations avancées dans la littérature sur l'ensemble des bassins comme présenté dans le tableau 3. On note que sur le Premol, l'écart relatif entre la valeur simulée avec Comephore et la valeur estimée est beaucoup plus restreint, ce qui peut être expliqué par la bonne représentativité de la précipitation Comephore sur ce bassin.

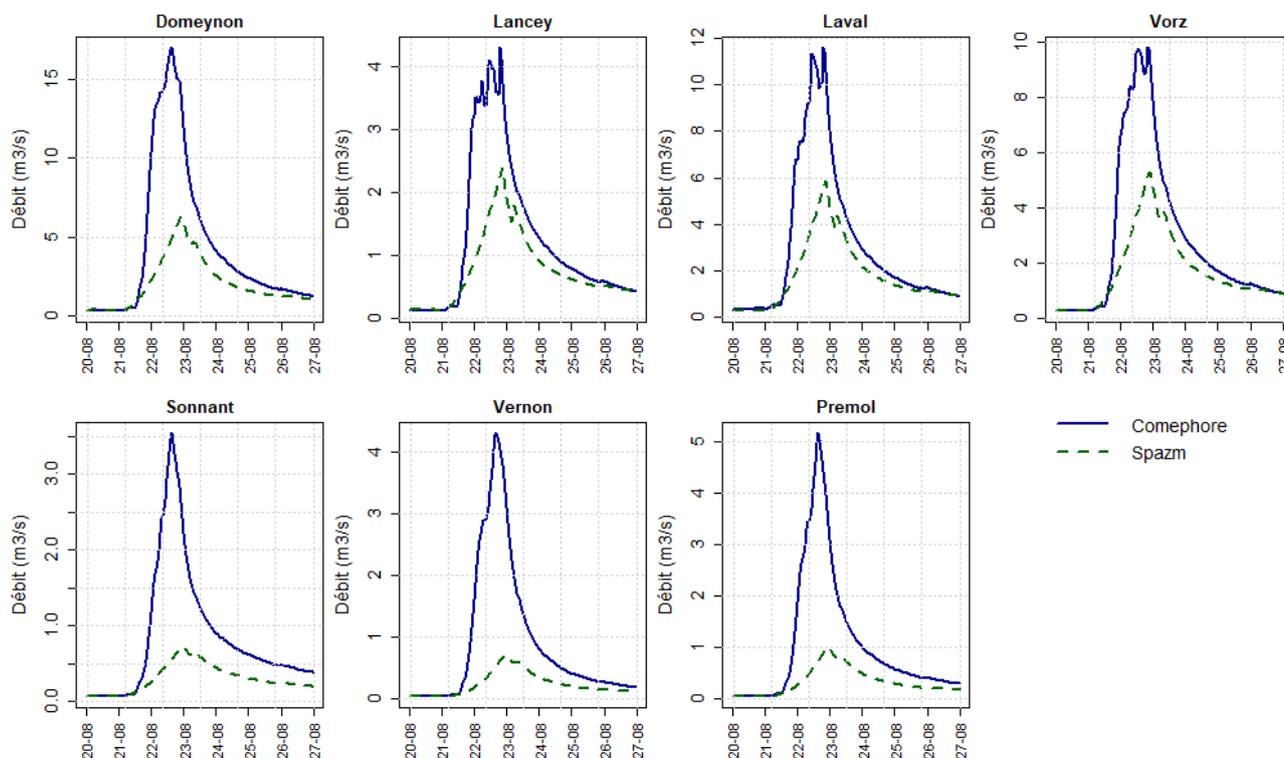


FIGURE 3 – Hydrogrammes simulés avec MORDOR-SD pour l'évènement d'août 2005.

Bassin	Mordor (Comephore)	Mordor (Spazm)	Valeur/plage litt.
Ruisseau de Laval	11.6	5.9	20 ¹
Vorz	9.8	5.3	20 - 28 ^{1,2}
Ruisseau de Lancey	4.3	2.4	14 ¹
Domeynon	17	6.2	25 - 37 ^{1,3}
Sonnant	3.5	0.7	
Vernon	4.3	0.7	
Premol	5.2	1	7 - 8 ¹

 TABLE 3 – Débits de pointe (en m³/s) simulés avec MORDOR-SD lors de l'évènement d'août 2005 sur le massif de Belledonne et comparaison aux estimations de la littérature. Les exposants renvoient aux références bibliographiques (¹Alp'Géorisques (2007); ²Obled *et al.* (2006); ³de Becdelièvre (2005)).

4.4 Impact des forçages

Les limites associées aux forçages de précipitation utilisés dans le cadre du projet sont documentées dans les rapports Mas et Evin (2021a) et Mas et Evin (2021b). Les constats effectués sur les 15 bassins sont en accord avec ces limites, à savoir :

- Une variabilité du signal haute fréquence du régime hydrologique plus modérée avec Spazm qu’avec Comephore.
- Des crues moins “pointues” avec Spazm.
- Des quantiles de débit de pointe inférieurs avec Spazm, tous temps de retour confondus.

On rappelle également que des incertitudes importantes existent sur les cumuls événementiels de précipitation comme on l’a montré en analysant les crues d’août 2005. Ces incertitudes peuvent expliquer en partie les écarts entre les débits simulés et des débits de référence.

5 Conclusions

Le projet HYDRODEMO a permis de mettre en place une approche de simulation sur bassins non jaugés avec le modèle hydrologique MORDOR-SD. Une analyse détaillée sur un échantillon de 13 bassins versants de la métropole Grenobloise a montré que les résultats étaient parfois relativement éloignés des estimations fournies par d’autres méthodes de calcul concernant la prédétermination des débits de crue.

La comparaison aux données Shyreg est limitée par le domaine de validité de cette méthode, à savoir des bassins suffisamment grands (surface supérieure à 5 km²) et dont le fonctionnement n’est pas influencé par la neige, ce qui est le cas d’une partie de notre échantillon. La comparaison aux données de la littérature pour le débit de pointe de temps de retour 10 ans a montré des écarts parfois importants avec nos résultats, en particulier sur les bassins du Sonnant et du Verderet.

L’analyse détaillée des forçages de précipitation et des sorties du modèle lors des crues d’août 2005 montre que la mauvaise connaissance des pluies est le premier facteur explicatif des écarts entre nos simulations et les estimations par d’autres méthodes. Les incertitudes liées à la paramétrisation du modèle en régionalisation sont difficiles à estimer.

Malgré ces limites, le cadre de modélisation hydrologique développé dans HYDRODEMO est une base intéressante pour étudier les bassins non jaugés puisqu’elle permet d’obtenir un aperçu complet de leur fonctionnement. Son utilisation pour diverses études peut s’avérer pertinente si l’on dispose de forçages météorologiques fiables.

Références

- ALP'GÉORISQUES (2007). Etude d'un schéma de réhabilitation et de sécurisation des torrents de Belledonne suite aux crues des 22 et 23 août 2005. Rapport d'étude.
- ALP'GÉORISQUES (2018). Plan de Prévention des Risques Naturels. Commune de La Tronche. Note de présentation. Rapport d'étude.
- de BECDELIÈVRE, A. (2005). Etat des lieux du Doménon après les inondations du 21 et 22 août 2005. Rapport de stage master 1, Laboratoire d'études des Transferts en Hydrologie et Environnement.
- GARAVAGLIA, F., LE LAY, M., GOTTARDI, F., GARÇON, R., GAILHARD, J., PAQUET, E. et MATHEVET, T. (2017). Impact of model structure on flow simulation and hydrological realism : from a lumped to a semi-distributed approach. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(8) :3937–3952.
- GARÇON, R. (1996). Prévision opérationnelle des apports de la Durance à Serre-Ponçon à l'aide du modèle MORDOR. *La Houille Blanche*, 5 :71–76.
- HYDRETTUDES (2012a). Plage du Lanfrey sur la commune de Fontanil-Cornillon. Dossier de gestion, d'entretien et de suivi de la plage. Rapport d'étude.
- HYDRETTUDES (2012b). Plage du ruisseau de Jaillères sur la commune de Meylan. Dossier de gestion, d'entretien et de suivi de la plage. Rapport d'étude.
- HYDRETTUDES (2012c). Plage du Verderet sur la commune d'Eybens. Dossier de gestion, d'entretien et de suivi de la plage. Rapport d'étude.
- MAS, A. et EVIN, G. (2021a). HYDRODEMO - Action 4 : Calibration du modèle mordor-sd et exercice de régionalisation sur bassins non-jaugés. Rapport technique, INRAE - UR ETNA, Grenoble, France.
- MAS, A. et EVIN, G. (2021b). HYDRODEMO - Action 4 : Désagrégation temporelle des réanalyses SPAZM. Rapport technique, INRAE - UR ETNA.
- MAS, A., EVIN, G., MOREL, M., PITON, G. et REVERDY, A. (2021). HYDRODEMO - Action 1 : État des lieux et recueil de l'information disponible concernant l'aléa torrentiel. Rapport technique, INRAE, Grenoble, France.
- OBLED, C., ZIN, I., FINET, M. T. et MARTY, R. (2006). Etude de la réponse hydrologique du Sonnant d'Uriage : Essai de transfert à des bassins voisins. Diagnostic et proposition de réseau pluviométrique sur le massif de Belledonne. Rapport technique, LTHER, Pole grenoblois de Recherche sur les Risques Naturels.
- ORGANDE, D., ARNAUD, P., FINE, J.-A., FOUCHIER, C., FOLTON, N. et LAVABRE, J. (2013). Régionalisation d'une méthode de prédétermination de crue sur l'ensemble du territoire français : la méthode SHYREG. *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, 26(1) :65–78.
- TEREO - HYDRETTUDES (2013). Ruisseau du Vernon et affluents. Étude hydraulique et écologique. Rapport d'étude.



Centre Center Lyon-Grenoble - Auvergne-Rhône-Alpes
2 rue de la Papeterie BP 76,
38 402 St-Martin-d'Hères - France

Rejoignez-nous sur :



<https://www.inrae.fr/centres/lyon-grenoble-auvergne-rhone-alpes>