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

Maxime Morel, Guillaume Piton, Guillaume Evin, Caroline Le Bouteiller

▶ **To cite this version:**

Maxime Morel, Guillaume Piton, Guillaume Evin, Caroline Le Bouteiller. Projet HYDRODEMO : Évaluation de l'aléa torrentiel dans les petits bassins versants des Alpes du Nord : Action 3 : Caractériser la production sédimentaire. [Rapport de recherche] INRAE. 2022. hal-03549827

HAL Id: hal-03549827
https://hal.science/hal-03549827

Submitted on 1 Feb 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

INRAE

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
Liberté
Égalité
Fraternité

Projet HYDRODEMO

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

Action 3 : Caractériser la production sédimentaire

HYDRODEMO

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

Action 3 : Caractériser la production sédimentaire

Maxime MOREL[1], Guillaume PITON[1], Guillaume EVIN[1], and Caroline LE BOUTEILLER[1]

[1] *Univ. Grenoble Alpes, INRAE, UR ETNA, 3800, Grenoble, France*

1er février 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.

Ce rapport est publié sous Licence Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).

Citation : Morel, M., Piton, G., Evin, G., Le Bouteiller, C. 2022. *Projet HYDRODEMO : Évaluation de l'aléa torrentiel dans les petits bassins versants des Alpes du Nord - Action 3 : Caractériser la production sédimentaire.* [Rapport de Recherche] INRAE - Version 2, 95 p. + annexes. `https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03549827`

Résumé

En zone de montagne, la connaissance de la capacité de production sédimentaire événementielle et annuelle est essentielle dans le diagnostic des aléas torrentiels et la gestion des bassins versants. L'objectif de cette Action est de progresser dans les méthodes de prédiction de cette production solide. L'objet principal de ce rapport est de présenter une nouvelle approche de prédiction basée sur des modèles statistiques multivariés calibrés à partir d'un jeu de données original couvrant 120 bassins versants torrentiels dans les Alpes françaises du Nord.

Les données sur la production sédimentaire et l'occurrence d'événements torrentiels ont été collectées sur ces bassins versants grâce aux registres des plages de dépôt et aux archives historiques des gestionnaires des bassins versants. Ces données ont permis d'estimer des volumes de production annuelle moyenne, des volumes décennaux et de référence ainsi que des fréquences d'occurrences d'évènements torrentiels.

Sur ces bassins versants, plusieurs caractéristiques morphologiques et hydrométéorologiques ont été calculées (par exemple, les indices de connectivité géologique et sédimentaire, la proportion de zones de productions sédimentaires dans le bassin versant, l'indice de Melton, la pente du cône de déjection, etc.) afin de les relier à la production sédimentaire et à la fréquence d'occurrence des événements torrentiels en utilisant des régressions puissances multivariées et des *random forests*.

Les analyses statistiques montrent que la proportion de zone de production sédimentaire dans les bassins versants est le paramètre principal pour la prédiction des volumes de production et de fréquence d'occurrence d'évènement torrentiel. Dans une moindre mesure, d'autres paramètres tels que l'indice de connectivité sédimentaire, la pente du cours d'eau, l'indice de Melton ou la surface du bassin versant sont corrélés aux volumes de productions sédimentaires et plusieurs formulations de modèles de prédictions ont été développés dans cette étude.

Ces modèles se basent sur des indicateurs géomorphologiques relativement simples à caractériser. Ils sont donc rapides et faciles d'utilisation. Leur simplicité les rend aussi simplistes face à la complexité de la nature. Malgré les incertitudes associées aux durées limitées des observations et à la parcimonie des approches retenues, les modèles de prédiction des volumes solides, testés sur quelques torrents situés autour de la région Grenobloise fournissent des résultats dont les ordres de grandeur semblent satisfaisants. Les modèles de prédictions des fréquences d'occurrences des évènements torrentiels sont moins performants que ces derniers, certainement à cause des limites d'estimation de cette variable.

Ces modèles complètent les approches existantes et peuvent être utiles pour évaluer la production sédimentaire et l'occurrence des événements torrentiels sur des bassins versants non équipés de plages de dépôt. Des exemples d'application de ces modèles sur des torrents de la métropole de Grenoble sont présentés dans cette étude.

Nous profitons de ce rapport pour présenter une des méthodes complémentaires pour étudier le transport solide dans les cours d'eau. On fait le point sur la façon dont nous recommandons d'utiliser les méthodes d'estimation du transport par charriage sur la base d'hydrogrammes et de formules de transport dans le cas des cours d'eau de montagne.

Remerciements

Ces travaux n'auraient pu être menés sans des données d'observation de terrain inlassablement rassemblés par les gestionnaires des torrents et cours d'eau.

Nous tenons donc à remercier très sincèrement :

- **Les agents de l'ONF-RTM** pour nous avoir fournis les données de curages des plages de dépôts ainsi que l'accès aux données brutes de la BD-RTM. Des échanges avec Damien KUSS en particulier ont permis d'affiner le présent travail et de prendre du recul sur nos recommandations et interprétations ;
- **Les agents du SM3A (Syndicat Mixte d'Aménagement de l'Arve et de ses Affluents)** pour nous avoir aussi fournis les données de curage et les coûts associés à des opérations ;
- **Les agents des AS (Associations Syndicales de gestion de cours d'eau en Isère)** qui ont, eux aussi, partagé leurs données de curages et de nombreux rapports ayant permis d'étayer notre connaissance des bassins versants de la région Grenobloise ;
- **Les agents de la Métropole de Grenoble** qui ont complété le jeu de données de curage sur les secteurs sous leur responsabilité depuis peu.
- Marc Bonnefoi-Calmels a réalisé son stage de fin d'étude au **SYMBHI (Syndicat Mixte des Bassins Hydrauliques de l'Isère)** sur la caractérisation de l'activité torrentielle de petits torrents du Grésivaudan. Il a ainsi été "Beta-testeur" de nos approches et ses remarques ont été utiles à l'amélioration de ce rapport.

Table des matières

Résumé ii

Remerciements iii

Notations vii

1 Introduction 1
1.1 Le projet HYDRODEMO . . . 1
1.2 Pourquoi l'Action 3 : Caractériser la production sédimentaire ? . . . 2

2 Matériels et Méthodes 5
2.1 Méthode de sélection des sites HYDRODEMO . . . 5
2.1.1 Liste complète des ouvrages de sédimentation . . . 5
2.1.2 Rattachement des ouvrages plages de dépôts à la BD-RTM . . . 6
2.2 Méthodes de calculs des variables explicatives . . . 10
2.2.1 Données cartographiques . . . 10
2.2.2 Calcul de l'indice de connectivité sédimentaire . . . 10
2.2.3 Délimitation et calcul des surfaces de bassins versants . . . 13
2.2.4 Délimitation et calcul des surfaces en érosion . . . 13
2.2.5 Extraction des valeurs de connectivité sédimentaire et d'altitude . . . 16
2.2.6 Indices géologiques . . . 16
2.2.7 Pente du cours d'eau . . . 19
2.2.8 Pente du cône de déjection . . . 20
2.2.9 Indice de Melton . . . 21
2.2.10 Données de précipitations . . . 21
2.2.11 Classification des bassins versants selon les phénomènes torrentiels . . . 22
2.2.12 Synthèse des variables explicatives étudiées . . . 25
2.3 Méthodes d'estimation des productions sédimentaires des bassins versants . . . 28
2.3.1 Estimations des productions solides annuelles moyennes . . . 28
2.3.2 Estimations des productions solides événementielles décennales et de référence 29
2.3.3 Caractérisation de la fréquence d'occurrence annuelle des évènements . . . 33
2.4 Régionalisation . . . 35
2.4.1 Les *random forests* . . . 35
2.4.2 Lois de puissances . . . 36
2.4.3 Évaluation des performances des modèles . . . 36

3 Résultats 37
3.1 Analyse des coûts de curages . . . 37
3.2 Analyse des capacités de stockage des ouvrages . . . 38
3.3 Variabilité des paramètres descripteurs principaux . . . 39
3.4 Variabilité de l'activité torrentielle et de la production sédimentaire . . . 40
3.4.1 Sélection des paramètres explicatifs . . . 40
3.4.2 Variabilité observée de la production annuelle moyenne . . . 41
3.4.3 Prédiction de la production annuelle moyenne . . . 42
3.4.4 Prédiction de la production décennale . . . 44
3.4.5 Prédiction de la production de référence . . . 46
3.4.6 Prédiction de la fréquence d'occurrence d'évènements (BD-RTM) . . . 48
3.4.7 Analyse critique de la performance des modèles . . . 48

4 Application des méthodes : les torrents «METRO» 53
4.1 Choix de l'échantillon étudié . . . 53
4.2 Etat des connaissances avant HYDRODEMO . . . 55
4.2.1 Le Lanfrey (METRO1) . . . 55
4.2.2 Le Charmeyran (METRO2) . . . 55
4.2.3 Les Jaillières (METRO3) . . . 56
4.2.4 Le Domeynon (METRO4) . . . 57
4.2.5 Le Verderet (METRO5) . . . 57
4.2.6 Le Vernon (METRO6) . . . 57
4.2.7 Le Prémol (METRO7) . . . 58
4.2.8 Le Lavanchon (METRO8) . . . 58
4.2.9 Le Rif Talon (METRO9) . . . 58
4.3 Observations de terrain complémentaires . . . 59
4.3.1 Le Lanfrey (METRO1) . . . 59
4.3.2 Le Charmeyran (METRO2) . . . 60
4.3.3 Les Jaillières (METRO3) . . . 61
4.3.4 Le Domeynon (METRO4) . . . 61
4.3.5 Le Verderet (METRO5) . . . 62
4.3.6 Le Vernon (METRO6) . . . 62
4.3.7 Le Prémol (METRO7) . . . 62
4.3.8 Le Lavanchon (METRO8) . . . 63
4.3.9 Le Rif Talon (METRO9) . . . 63
4.4 Descripteurs morphologiques principaux . . . 63
4.5 Prédiction de l'activité torrentielle par approche géomorphologique . . . 64
4.6 Prédiction des volumes événementiels par calculs de transport par charriage . . . 69
4.6.1 Comment appliquer les formules d'estimation du transport solide par charriage ? 69
4.6.2 Estimation de la capacité de transport par charriage . . . 71
4.6.3 Estimation du volume de transport événementiel . . . 75
4.6.4 Exemple d'application : Le Sonnant à Gières . . . 75
4.6.5 Application aux torrents METRO . . . 79

5 Discussion 83
5.1 Réflexions sur la typologie des torrents . . . 83
5.2 Réflexions sur les paramètres des méthodes . . . 83
5.3 Réflexions sur les modèles prédictifs . . . 85

6 Conclusion 88

7 Perspectives 88

Références 90

ANNEXES

A Cartes des bassins versants

B Classement géologique

C Pentes des cours d'eau

D Pentes des cônes de déjection

E Précipitations COMEPHORE

F Données d'apports sédimentaires

G Données : Paramètres géomorphologiques et productions sédimentaires

H Historique de la BD-RTM pour les torrents de la METRO

I Confrontation des observations aux prédictions des modèles empiriques

J Hydrogrammes des bassins versants METRO

Notations

ρ	Densité de l'eau [-]
ρ_{rock}	Densité du rocher ≈ 2.65 [-]
ρ_{sed}	Densité apparente des sédiments ≈ 2.0 [-]
τ^*	Nombre de Shields [-]
τ^*_m	Paramètre de calibration de l'équation de Recking, marque la transition entre transport partiel et transport total [-]
A	Superficie du bassin versant [km²]
A_{nv}	Superficie non végétalisée du bassin versant [km²]
A_{ZP}	Surface de la zone de production [km²]
D_{50}	Quantile 50 % de la granulométrie [m]
D_{84}	Quantile 84 % de la granulométrie [m]
D_z	Dénivelée entre les altitudes extrêmes du bassin versant [m]
g	Accélération de la gravité [9.81 m^{-2}]
h	Hauteur d'écoulement moyenne [m]
$IC50$	Indice de connectivité median [-]
$IC50_{ZP}$	Indice de connectivité median dans les zones de production [-]
$IC95$	Indice de connectivité au quantile 95 [-]
$IC95_{ZP}$	Indice de connectivité au quantile 95 dans les zones de production [-]
IG	Indice géologique du bassin versant, méthode de D'Agostino [-]
IG_{ZP}	Indice géologique des zones de production [-]
IGM	Indice géologique du bassin versant, méthode de Robert Marie [-]
L_{CE}	Longueur du cours d'eau principal [km]
M	Indice de Melton [-]
$P1h_{10}$	Pluie de durée d'une heures et de période de retour 10 ans [mm]
$P24h_{10}$	Pluie de durée de 24 heures et de période de retour 10 ans [mm]
$P6h_{10}$	Pluie de durée de six heures et de période de retour 10 ans [mm]
P_{LT}	Probabilité d'un torrent à être un torrent à laves torrentielles [-]
Q	Débit liquide [m^3/s]
Q_s	Débit solide apparent par charriage [m^3/s]
R	Rayon hydraulique [m]
R_{IC95}	Rapport de $IC95$ sur $IC95_{ZP}$ [-]
R_{ICm}	Rapport de l'IC moyen du bassin sur l'IC moyen des zones de production [-]
R_{ZP}	Proportion de zones de production dans le bassin versant [%]
S_{CE}	Pente du cours d'eau droit de l'exutoire du bassin versant [m/m]
S_C	Pente du cône de déjection [m/m]
V_{100}	Volume de production sédimentaire de période de retour centennal [m^3]
V_{10}	Valeur absolue du volume de production sédimentaire de période de retour décennal [m^3]
V_{10}/A	Volume de production sédimentaire spécifique de période de retour 10 ans [m^3/km^2]
V_{max}	Volume de production sédimentaire maximal [m^3]
V_m	Valeur absolue du volume de production sédimentaire moyen annuel [m^3/an]
V_m/A	Volume de production sédimentaire moyen annuel spécifique [m^3/an/km²]
V_{ref}	Valeur absolue du volume de production sédimentaire de référence [m^3]
V_{ref}/A	Volume de production sédimentaire spécifique de référence [m^3/km^2]
W	Largeur du lit actif [m]
W_{pb}	Largeur à plein bord du cours d'eau [m]
Z_{max}	Altitude maximale du bassin versant [m]
Z_{min}	Altitude de l'exutoire du bassin versant [m]

1 Introduction

1.1 Le projet HYDRODEMO

Le projet HYDRODEMO a pour objectif de mieux connaître les aléas et risques liés aux crues torrentielles dans les Alpes du Nord pour pouvoir *in fine* mieux s'en prémunir. L'occurrence et la concomitance d'épisodes pluvieux intenses sur des sols plus ou moins pré-saturés génèrent, dans les Alpes du Nord comme ailleurs, des crues des cours d'eau. Dans les zones montagneuses, le relief donne aux écoulements l'énergie pour éroder, transporter et déposer des matériaux sédimentaires. Ces processus aggravent régulièrement les dommages associés aux inondations. 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. Le projet est organisé en cinq actions (Figure 1).

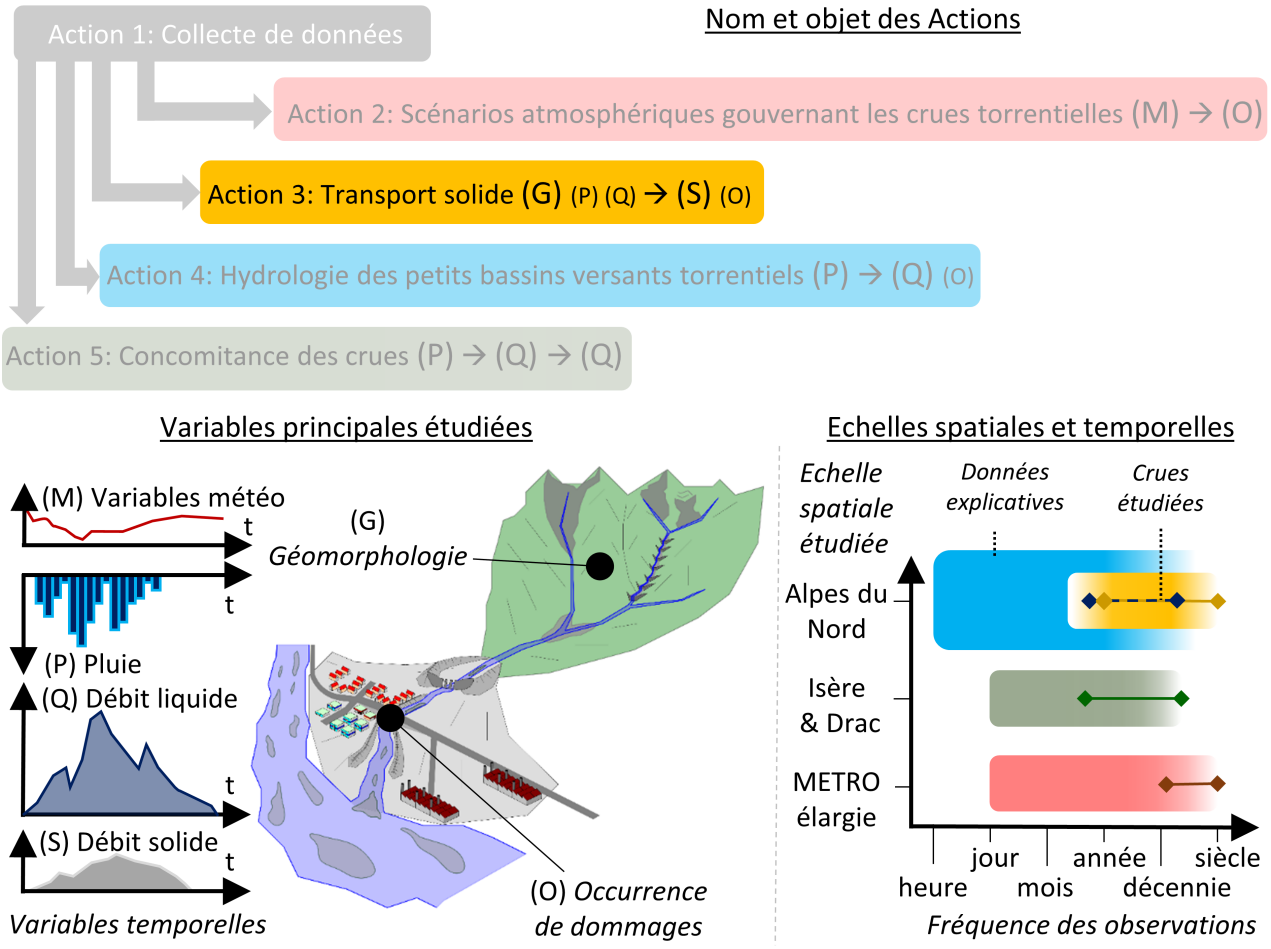


FIGURE 1 – Organisation générale des Actions du projet HYDRODEMO

- **L'Action 1** vise à faire la synthèse des données mobilisées par l'ensemble des autres Actions ;
- **L'Action 2** vise à caractériser les scénarios atmosphériques gouvernant les crues torrentielles qui ont sévi historiquement dans la région Grenobloise ;
- **L'Action 3**, objet du présent rapport, vise à caractériser l'activité de transport solide associée aux crues torrentielles via les données de curage des plages de dépôt équipant les torrents des

Alpes du Nord ;
— **L'Action 4**, vise à développer un cadre de modélisation hydrologique pour les bassins versants torrentiels des Alpes du Nord ;
— **L'Action 5**, utilise des outils de modélisation hydrologique pour l'analyse des concomitances de crues torrentielles sur les bassins versants et sous-bassins versants de l'Isère et du Drac.

Cette nouvelle connaissance scientifique permettra à l'avenir de mieux comprendre les phénomènes associés aux aléas torrentiels, de mieux les prévenir et d'améliorer l'alerte à la population.

1.2 Pourquoi l'Action 3 : Caractériser la production sédimentaire ?

En montagne, la connaissance de la capacité de production sédimentaire des torrents est un élément essentiel pour le diagnostic d'un bassin versant. Plusieurs méthodes ont été développées pour prédire des volumes de production sédimentaire dans les torrents, généralement pour des scénarios de référence (crue centennale ou maximum observé). Par exemple, la méthode ECsTREM (Peteuil et Liébault, 2011) a été développée à partir de plus d'une trentaine de bassins versants dans les Alpes pour prédire les productions sédimentaires centennales et décennales. Entre autres, des approches comparables ont été réalisées par D'Agostino et Marchi (2001) dans les Alpes italiennes et par Rickenmann (2016) dans les Alpes suisses (Tableau 1). Cependant, ces approches ont généralement été calées sur un nombre restreint de torrents et avec de faibles durées d'observations. Certaines de ces approches sont spécifiquement dédiées aux laves torrentielles et/ou ont été calées sur des torrents «problématiques» (c.-à-d. des torrents particuliers produisant de grande quantité de matériaux). L'application de résultats obtenus sur ces échantillons est toujours quelque peu incertaine. Il est donc d'usage d'appliquer de multiples méthodes puis de mener une analyse critique des résultats, les spécialistes connaissant le caractère plus ou moins sécuritaire des approches existantes (voir par exemple Brochot et collab., 2002).

Depuis l'établissement de la plupart de ces méthodes, d'autres outils d'analyse ont émergé. Récemment, des outils ont été développés pour caractériser la connectivité sédimentaire des bassins versants de montagne (Cavalli et collab., 2013). Heckmann et collab. (2018) définissent la connectivité hydrologique et sédimentaire comme *«le degré auquel un système facilite le transfert d'eau et de sédiments à travers lui-même, grâce aux relations de couplage entre ses composants.»* En d'autres termes, analyser la connectivité hydrologique et sédimentaire vise à comprendre la dynamique des flux d'un bassin versant donné. Ces outils permettent notamment de définir des indicateurs de connectivité. A ce jour, peu d'études ont évalué l'aptitude des approches de connectivité à affiner la prédiction des productions sédimentaires des torrents. Ce type d'indicateur peut présenter un grand intérêt dans de telles méthodes car son estimation ne souffre pas d'une part de subjectivité comme c'est le cas de certains indicateurs géomorphologiques en montagne.

Les méthodes de prédiction de volumes de production sédimentaire listées dans le Tableau 1 ont principalement été calées à partir de régression linéaire mutivariées, généralement sous forme de lois de puissance. De tels modèles ne sont pas en mesure de décrire des formes de réponse flexibles, en raison des contraintes associées à la linéarité mathématique. De plus, ces modèles peuvent être sensibles aux valeurs aberrantes et font des hypothèses implicites sur les distributions des données qui ne sont pas toujours vérifiées. Elles sont enfin de nature diverses étant calées soit sous forme de courbes enveloppes (maximisant la production sédimentaire) ou sous forme de courbes moyennes, ceci pour des périodes de retours fréquentes à rares. L'utilisation d'approches récentes d'apprentissage automatique (*machine learning*) telles que les *random forests* (ou forêts aléatoires, voir Breiman, 2001) peut fournir des modèles prédictifs plus flexibles avec de bonnes performances prédictives. La méthode

des *random forests* a été appliquée avec succès pour des études de classification et de régression dans des domaines différents, par exemple pour prédire la granulométrie moyenne dans les rivières (Snelder et collab., 2011) ou les caractéristiques hydrauliques moyennes des cours d'eau (Morel et collab., 2020). En complément, cette méthode fournit une mesure de l'importance relative de chaque variable explicative.

Dans cette étude, nous analysons un nombre important de torrents présentant des données de production sédimentaire dans les Alpes du Nord. Le jeu de données de la méthode ECsTREM développée par Peteuil et Liébault (2011) a ainsi été enrichi d'une dizaine d'année d'observations. L'échantillon de bassins versants à été diversifié et élargi. Enfin les indicateurs explicatifs et les analyses statistiques des productions sédimentaire ont été affinées. Les torrents analysés sont relativement hétérogènes en terme d'activité torrentielle. L'objectif de cette présente étude est de fournir des méthodes de prédiction des productions sédimentaires annuelles et événementielles ainsi qu'un indice de la fréquence d'occurrence d'évènement torrentiels. Pour ce faire, nous mettons en relations les volumes de productions et les fréquences d'occurrence d'évènements des bassins étudiés avec de plusieurs variables explicatives. Ces variables sont des indicateurs géomorphologiques, hydro-climatiques, géologiques ou de connectivité sédimentaire qui ont été caractérisés pour l'ensemble des bassins versants d'étude. Des approches statistiques de type *random forest* et régressions en lois puissances mono- ou multi-variées sont utilisées pour une usage simple basé sur les indicateurs les plus significatifs.

Le rapport est organisé en quatre sections principales. La section 2 détaille les méthodes d'analyses utilisées. La section 3 montre les résultats obtenus sur les bassins versants de l'échantillon des Alpes du Nord. La section 4 fournit une application des méthodes développées à un échantillon de torrents situé sur le territoire de la métropole de Grenoble. Finalement, la section 5 discute et commente les potentiels et limitations de ce travail.

TABLE 1 – Synthèse et typologie des principales méthodes de prédictions des volumes de productions sédimentaires V (m^3). K est un facteur de torrentialité variant de 250 (pour les bassins à faibles processus érosifs) à 1750 (pour les bassins avec d'importantes sources de sédiments). A est la superficie du bassin versant (km^2), A_{ZP} est la superficie des zones de production (km^2), A_{nv} est la superficie non végétalisée du bassin versant (km^2), A_i est l'indice de des surfaces en érosion active, M est l'indice de Melton, S_{CE} et S_C sont les pentes du cours d'eau et du cône de déjection (m/m), respectivement, D_z est la dénivelée entre les altitudes extrêmes du bassin versant (m), IG et IGM sont des indices géologiques de l'intégralité du bassin versant selon la méthode de D'Agostino et Robert Marie, respectivement (voir section 2.2.6).

Équation	Données de calage	Source	Classe
$V = K \cdot A \cdot 100 \cdot S_{CE}$	1420 évènements de forte intensité - Alpes autrichiennes (torrents à laves et/ou à charriages)	Kronfellner-Kraus (1985) dans Brochot et collab. (2002)	$V \gg V_{100}$
$V = 29\ 100 \cdot A^{0.67}$	62 laves torrentielles (Alpes italiennes)	D'Agostino (1996) dans Brochot et collab. (2002)	$V \geq V_{100}$
$V = 45\ 000 \cdot A^{0.9} \cdot S_{CE}^{1.5} \cdot IG$	idem	D'Agostino et al. (1996) dans Marchi et D'Agostino (2004)	
$V = 65\ 000 \cdot A^{1.35} \cdot S_{CE}^{1.7}$	86 laves torrentielles (Alpes italiennes)	Marchi et D'Agostino (2004)	
$V = L_{CE} \cdot (6.4 \cdot S_c - 23)$	82 volumes maximaux (Alpes suisses)	Rickenmann (1997) dans Brochot et collab. (2002)	$V \gg V_{100}$
$V = 0.013 \cdot A_{ZP}^{0.47} \cdot D_z^{2.11}$	16 volumes maximaux de laves torrentielles - Alpes françaises	Méthode ECsTREM de Peteuil et Liébault (2011)	$V \gg V_{100}$
$V_{10} = 0.46 \cdot A_{ZP}^{0.65} \cdot D_z^{1.40}$			V_{10}
$V_{100} = 0.40 \cdot A_{ZP}^{0.60} \cdot D_z^{1.55}$	28 torrents à laves torrentielles - Alpes françaises		V_{100}
$V_{10} = 24\ 000 \cdot A_{ZP}^{0.82} \cdot S_{CE}^{0.50}$			V_{10}
$V_{100} = 112\ 700 \cdot A_{ZP}^{0.93} \cdot S_{CE}^{0.75}$	33 torrents - Alpes françaises (torrents à laves torrentielles et/ou à charriages)		V_{100}
$V = 13\ 600 \cdot A^{0.61}$	551 laves torrentielles au Japon	Takei (1984) dans Rickenmann (2016)	$V \approx V_{100}$
$V_{100} = 0.49 \cdot A \cdot (100M)^{1.6} \cdot IGM \cdot (A_{nv} + 2)^{0.2}$	12 laves torrentielles - Alpes françaises	Bianco et al. (2001) dans Brochot et collab. (2002)	V_{100}
$V = cd \cdot 755.1 \cdot A^{0.782}$	16 laves torrentielles - Alpes suisses	Zeller (1976) dans Brochot et collab. (2002)	
$2 < cd < 50$			$V > V_{100}$
$6 < cd < 20$			$V \approx V_{100}$
$V = 800 \cdot D_z^{2.38} \cdot A_i^{1.15}$	33 torrents - Canada (Colombie Britannique)	Bovis et Jakob (1999)	$V \approx V_{100}$
$V = 150 \cdot A \cdot (S_C - 3)^{2.3}$	15 torrents - Autriche	Hampel (1977) dans Remaître (2006)	$V \approx V_{100}$

2 Matériels et Méthodes

2.1 Méthode de sélection des sites HYDRODEMO

2.1.1 Liste complète des ouvrages de sédimentation

Afin d'avoir des données relatives aux apports sédimentaires des torrents des Alpes du Nord, nous avons exploité différentes sources provenant des travaux antécédents :

- L'exploitation des enquêtes RTM de 1997 (Gruffaz, 1996) et de 2018 (Carladous et Piton, 2019) ainsi que les travaux de Peteuil et Liébault (2011) ont permis de rassembler un important échantillon de torrents présentant des ouvrages de sédimentation pour lesquelles des données de productions sédimentaires sont disponibles. Ces ouvrages sont essentiellement gérés par les services de l'ONF-RTM (où ces derniers disposaient d'information sur la gestion de ces ouvrages parce qu'ils avaient participé à leur conception et/ou à leur suivi). L'échantillon comprenait 44 plages de dépôts domaniales et 26 plages de dépôts non domaniales (communes ou Société Française du Tunnel Routier du Fréjus : SFTRF).
- A cela s'ajoutent 31 plages de dépôts gérées par les Associations Syndicales (AS). Les caractéristiques de ces ouvrages (localisation, historique des curages) ont été collectées dans les rapports d'études fournis par les AS (nombreux rapports réalisés par le bureau d'étude HYDRETUDES en 2012, les références détaillées sont fournies dans le texte). Ces rapports fournissent des données de curages depuis le début des années 2000 jusqu'en 2011-2012. Nous avons pu bénéficier des informations quant aux curages plus récents de ces ouvrages grâces aux échanges avec les responsables techniques des AS qui nous ont également fournis des informations pour trois autres ouvrages qui n'ont pas fait l'objet d'études en 2012.
- L'enquête de 1997 de Gruffaz (1996) ainsi qu'un rapport d'étude EGIS Eau et CIDEE (2013) ont permis de recenser plusieurs torrents présentant des ouvrages de sédimentation gérés par les communes, qui ne faisaient pas partie de l'échantillon de Peteuil et Liébault (2011). Ces ouvrages sont généralement peu documentés et ne disposent pas d'informations quant aux curages/apports solides. Des enquêtes directes auprès des gestionnaires (principalement les services techniques communaux ainsi que ceux de Grenoble-Alpes Métropole pour les ouvrages qui leurs ont été transférés) ont permis d'obtenir des données de curages/apports solides pour cinq plages de dépôts communales (les communes de La Tronche, Domène, Vaulnavey-le-Haut, Eybens et Gières). Les autres communes sollicitées n'ont pas répondu.
- En complément, des échanges avec le Syndicat Mixte de l'Arve et de ses affluents (SM3A) a également permis d'ajouter une nouvelle plage de dépôt ou de compléter des historiques de curages pour 11 ouvrages déjà existants dans la base de données.

Au total, la compilation de ces différentes sources a permis de rassembler 120 plages de dépôts présentant des données d'apports sédimentaires (Tableau 2 et Figure 2). Les registres de suivi de ces plages de dépôts couvrent généralement plus de 20 années d'observations (Figure 3).

Les données de curage sont généralement issues de comptages du nombre de camions évacués lors des opérations de curage. Depuis quelques années, il est devenu commun d'estimer les volumes curés par levé topographique mais cela concerne une minorité de données. Par ailleurs, on dispose rarement d'un levé topographique récent de l'état *ante*-crue. Dans l'ensemble, il faut donc reconnaître que les données sources sont entachées d'une certaine incertitude qu'il est difficile d'estimer. Ces données restent toutefois précieuses puisqu'elles constituent une des seules mesures du transport solide des torrents.

Nous avons identifié 15 ouvrages se trouvant en aval d'autres ouvrages de sédimentation. Ce type de

Table 2 – Tableau de synthèse du nombre d'ouvrages inventoriés.

Gestionnaire	Nombre de plages de dépôt
AS (Associations Syndicales)	31
Métropole de Grenoble	4
RTM (domanial)	44
RTM (communal)	26
SFTRF	1
SM3A	14

configuration peut potentiellement affecter les estimations de productions sédimentaires et le calcul des variables explicatives. Dans ce cas, nous avons hiérarchisé les ouvrages lorsqu'ils étaient dans des bassins versants composés. Nous avons établi la hiérarchie selon l'ordre de l'exutoire depuis l'amont vers l'aval (c.-à-d. l'ordre 1 correspond à l'ouvrage le plus amont dans le bassin versant, l'ordre 2 est premier en aval de l'ordre 1, etc.).

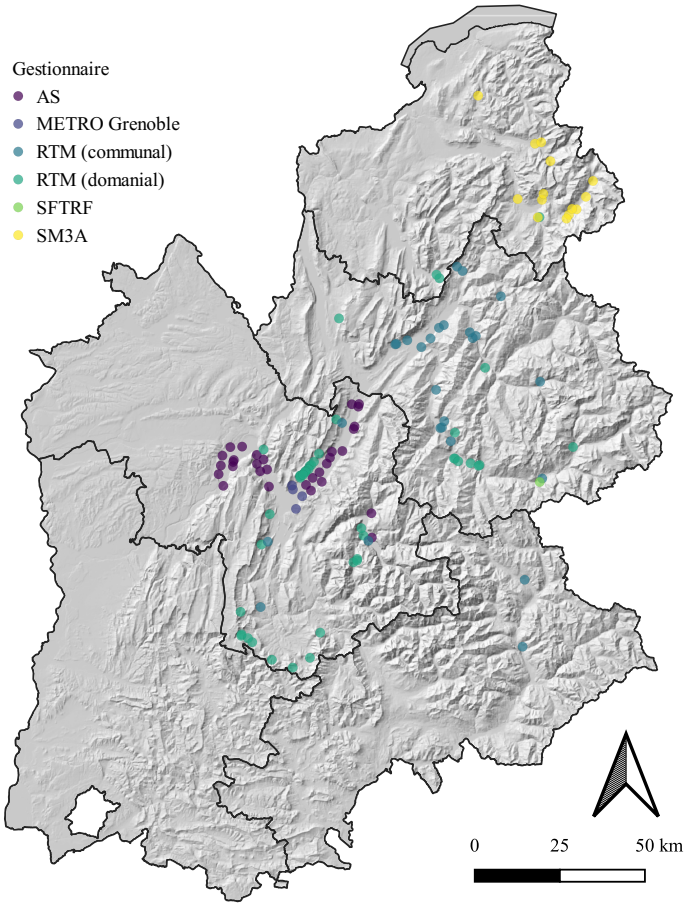


Figure 2 – Distribution spatiale des plages de dépôts.

2.1.2 Rattachement des ouvrages plages de dépôts à la BD-RTM

Les archives historiques des évènements de la base de données RTM (BD-RTM) offrent des informations complémentaires aux données de gestion des ouvrages de sédimentation (accessible au lien suivant : `https://rtm-onf.ign.fr`). La BD-RTM est, par exemple, renseignée sur des périodes beaucoup plus

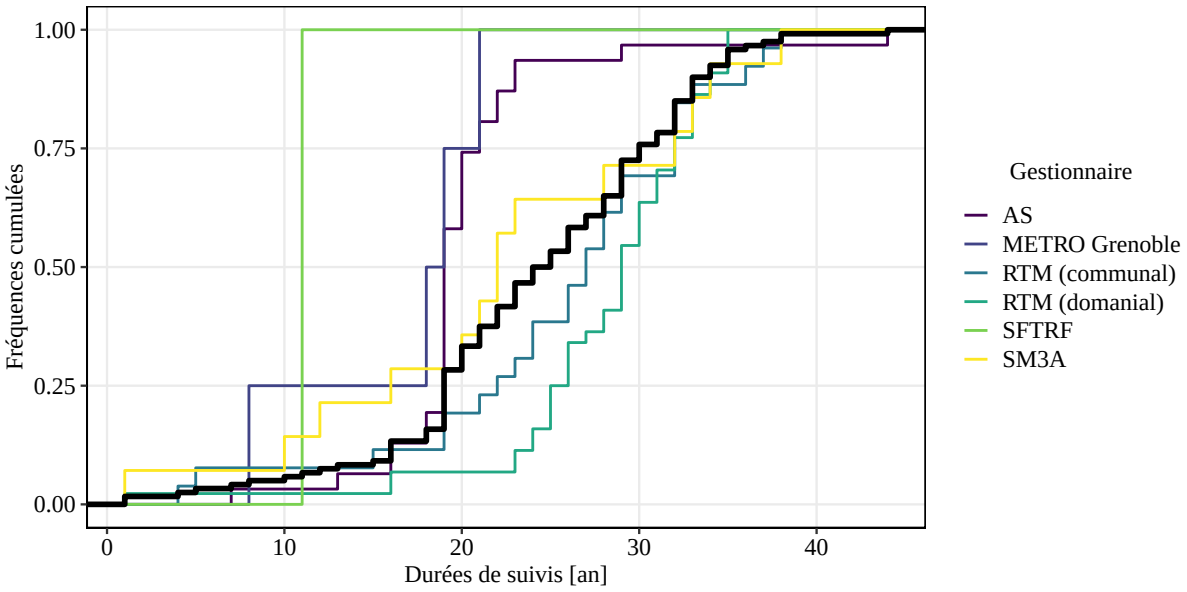
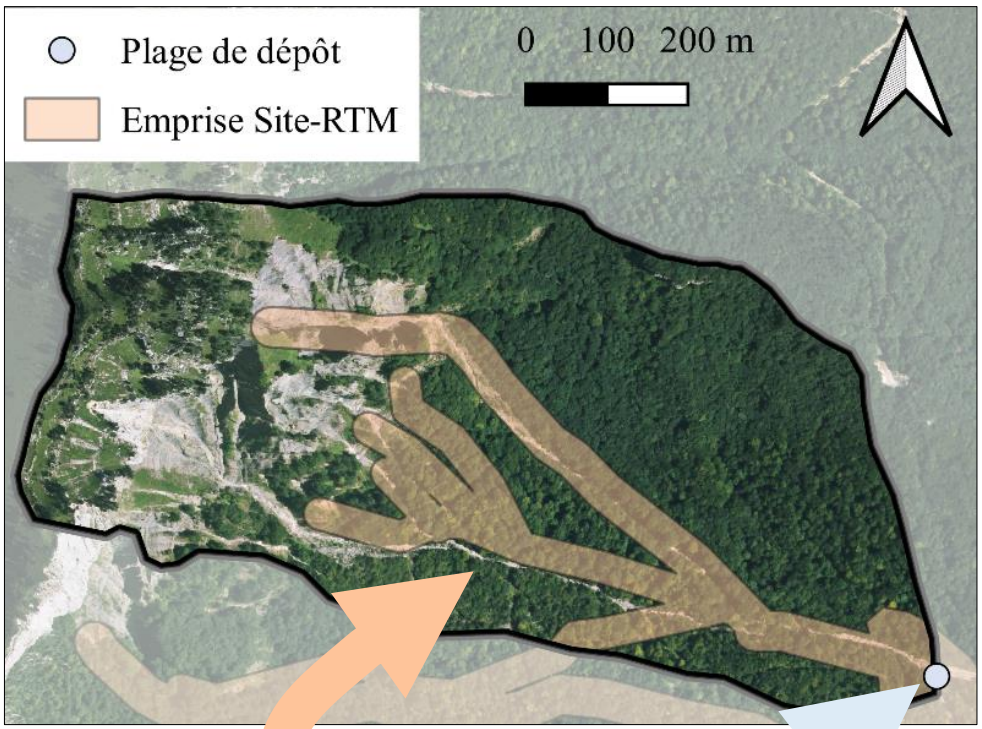


FIGURE 3 – Courbe cumulative des fréquences de durées de suivis des plages de dépôts. Le trait noir représente le jeu de données total. On constate que 75% des observations font plus que 19 ans, 50% des observations sont supérieures à environ 25 ans et que 25% des observations sont supérieures à 30 ans. Les bassins versants suivis par le RTM (communaux et domaniaux) étant ceux dont les séries temporelles sont les plus longues.

longues que les registres de suivi de curages. Cela permet d'évaluer l'occurrence d'évènements plus anciens sur un torrent dont la nature du phénomène (crue ou lave torrentielle, par exemple) et la magnitude (grâce au paramètre d'intensité et/ou les volumes transportés renseignés dans les champs des Évènements-RTM) sont parfois connues. Enfin, les dates des Évènements-RTM sont généralement renseignées dans la BD-RTM tandis que seule l'année est renseignée dans les relevés de curage.

Afin de compiler les archives historiques de la BD-RTM pour l'ensemble des torrents étudiés, les plages de dépôts ont été manuellement rattachées aux Sites-RTM de la BD-RTM en utilisant un système d'information géographique (SIG), l'emprise géographique des différents Sites-RTM ayant pu être extraite via les données sources de la BD-RTM (Figure 4). Le rattachement manuel a permis d'identifier et de corriger les cas particuliers tels que des ouvrages sans Site-RTM ou des ouvrages localisés à la confluence de deux Sites-RTM (Figure 5).



Archives historiques « évènements »

Date	Vol. m³	Intensité
16/06/1819	?	3
…		
02/07/1987	700	2
…		
30/06/1990	1000	2
…		
03/08/1998	?	1
…		
10/08/2002	?	2
…		
10/08/2004	?	2
…		
01/06/2008	1500	2
…		
01/07/2016	?	2
…		

Chronique de curage

Année	Volume m³
1987	5700
…	
1994	1500
…	
1998	3000
1999	3000
…	
2002	2000
…	
2004	800
2005	3000
…	
2008	1500
…	
2015	700
…	

FIGURE 4 – Exemple du torrent du Bresson : localisation de la plage de dépôts du torrent et du Site-RTM associé ; les données de production sédimentaire disponible pour le torrent (en bleu : les données de suivi de curage ; en rouge : les données provenant des Évènements-RTM de la BD-RTM).

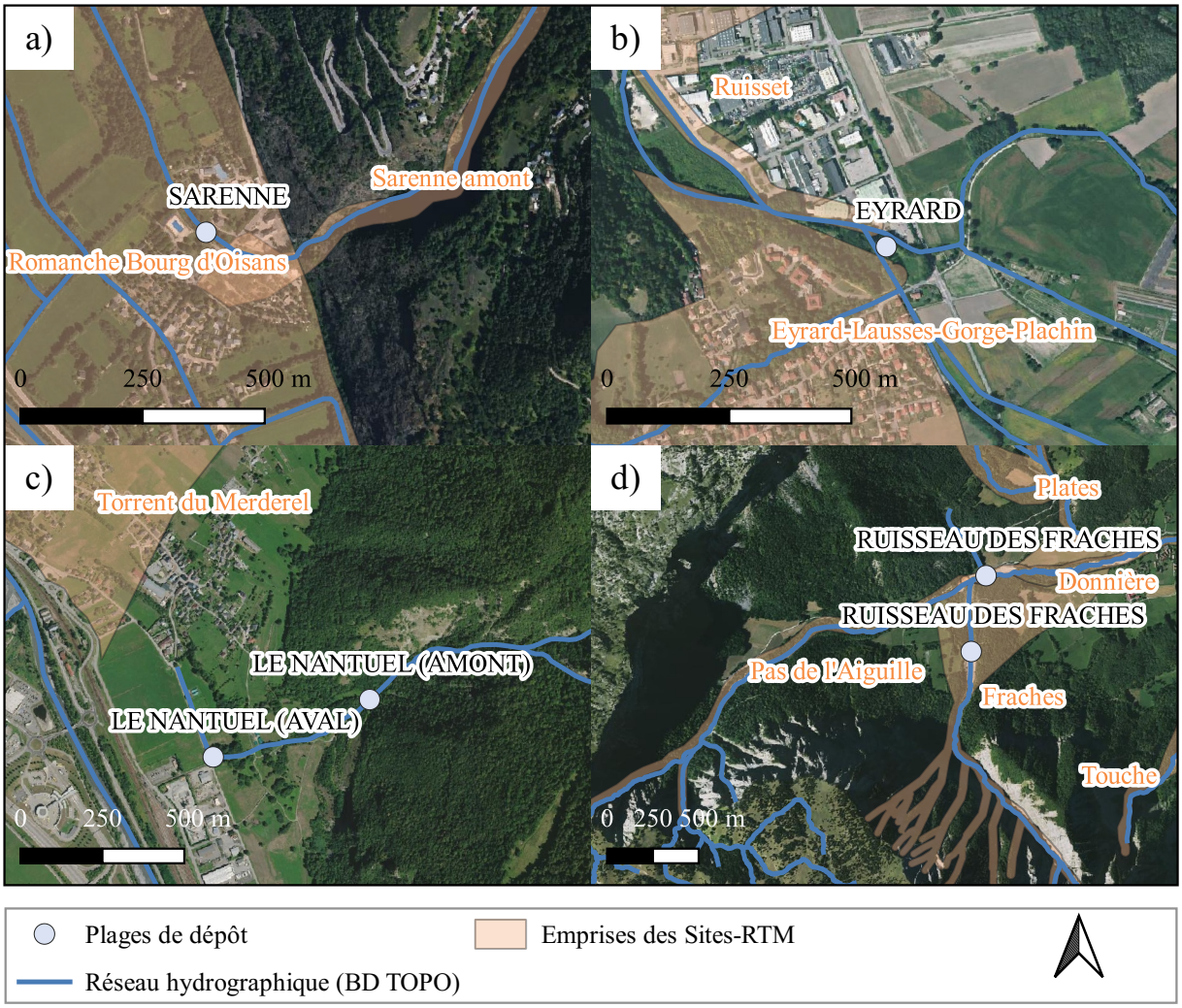


FIGURE 5 – Exemples de cas particuliers de rattachement des ouvrages de plages de dépôts avec les Sites-RTM : a) La plage de dépôts du torrent de Sarenne est localisée sur deux Sites-RTM qui se superposent (les sites du torrents de Sarenne et de la Romanche Bourg d'Oisans). Dans ce cas précis, l'ouvrage doit être associé au Site-RTM du torrent de Sarenne. b) La plage dépôt de torrent de l'Eyrard se trouve en dehors de l'emprise du Site-RTM associé (Site-RTM Eyrard-Lausses-Gorge-Plachin). c) La plage de dépôts du torrent du Nantuel ne possède pas de Site-RTM associé. d) La plage de dépôts des Fraches a été conçue à la confluence du torrent des Fraches et du Pas de l'Aiguille. Dans ce cas, l'ouvrage est associé aux deux Sites-RTM.

2.2 Méthodes de calculs des variables explicatives

2.2.1 Données cartographiques

Comme indiqué dans le rapport de l'Action 1 du projet HYDRODEMO, les indicateurs géomorphologiques descripteurs des bassins versants étudiés dans le cadre du projet ont été extraits d'un certain nombre de bases de données auxquelles INRAE a accès via ses conventions, notamment :

- La BD Alti®[1] (résolution à 25 m) pour l'altitude ;
- La BD Corine Land Cover[2] (CLC, version de 2018) pour l'occupation des sols ;
- La BD Forêt® version 2[3] pour l'identification des sols nus ;
- La BD TOPO® (version 2018)[4] pour le tracé du réseau hydrographique et du réseau routier ;
- La BD CARTO®[5] pour la délimitation des lacs et glaciers ;
- La BD Charm-50 du BRGM[6] pour la géologie ;
- Les orthophotos.

2.2.2 Calcul de l'indice de connectivité sédimentaire

Le concept de connectivité a été développé récemment pour décrire l'efficacité du transferts des sédiments depuis leurs sources jusqu'au réseau hydrographique et les liens entre les sources et les puits de sédiments tel que les lacs dans les zones amont des bassins versants (Fryirs, 2013). La connectivité et la dé-connectivité des sources de sédiments aux réseaux hydrographiques dans les bassins jouent un rôle essentiel dans les flux de sédiments et donc sur l'exportation de sédiments à l'exutoire des bassins. Plusieurs indices ont été développés afin de quantifier ce phénomène dans les bassins versants (Heckmann et collab., 2018).

Nous avons ici caractérisé la connectivité sédimentaire à partir de l'indice de connectivité (IC) introduit par Borselli et collab. (2008) pour les zones agricoles puis ajusté aux bassins versants alpins par Cavalli et collab. (2013). Cet indice est largement utilisé dans les études de bassins torrentiels (par ex. Micheletti et Lane, 2016 ; Schopper et collab., 2019 ; Blanpied et collab., 2018). L'IC est d'autant plus facile à utiliser qu'il peut être calculé à l'aide du logiciel autonome et gratuit «SedInConnect»[7] (Crema et Cavalli, 2018). En bref, ce logiciel calcule la connectivité struturelle en chaque point du bassin se basant essentiellement sur des paramètres topographiques (pente, surface drainée, facteur de pondération lié à la rugosité) en amont et en aval du point. SedInConnect nécessite plusieurs objets en entrée afin de calculer l'IC dans les bassins versants :

- **Le raster d'entrée : le modèle numérique de terrain (MNT).** Le MNT d'entrée doit être un MNT « hydrologiquement corrigé » (c.-à-d. sans cuvettes ou contre-pentes). Pour cela, nous avons utilisé un MNT issu de la BD ALTI de l'IGN (de résolution 25 m)[8], découpé à partir de l'emprise du territoire HYDRODEMO, sur lequel nous avons réalisé un prétraitement qui consiste à remplir les cuvettes grâce à l'outil «Fill sinks (Wand Liu)» de la boîte à outils

1. Voir site internet : `https://geo.data.gouv.fr/fr/datasets/22355590527b92116abf42a509b6defdbf4c0e33`
2. Voir site internet : `https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover`
3. Voir site internet : `https://inventaire-forestier.ign.fr/spip.php?article646`
4. Voir site internet : `https://artificialisation.biodiversitetousvivants.fr/bases-donnees/bd-topo`
5. Voir site internet : `https://geo.data.gouv.fr/fr/datasets/926e7908be05110468140c93f773e06e9317a438`
6. Voir site internet : `http://www.geocatalogue.fr/Detail.do?fileIdentifier=94636790-8615-11dc-9e02-0050568151b7`
7. Téléchargeable au lien suivant : `https://github.com/HydrogeomorphologyTools/SedInConnect_2.3`
8. Cette résolution a été utilisée parce qu'elle était disponible sur l'ensemble de la zone d'étude avec une qualité homogène et qu'elle était relativement facile d'accès. Des analyses du IC à une résolution plus fine, 5 m par exemple, permettent de mettre en lumière plus de détails. Nos essais sur des MNT à résolution encore plus fine, 1 m par exemple, montrent que cette résolution est trop détaillée pour étudier les phénomènes torrentiels et est plutôt adaptée aux études de phénomènes de ruissellement.

SAGA de QGIS.

— **Les cibles : les exutoires des bassins versants.** Le logiciel SedInConnect calcule l'IC pour des cibles données. Celles-ci doivent être une couche shapefile de type polygone référencée dans le même système que celui du MNT (les systèmes mondiaux WSG semblent poser moins de problème à l'outil que des référentiels nationaux tel que Lambert93). Lors du calcul de l'IC, le logiciel va générer plusieurs traitements du MNT pour calculer le réseau hydrographique (par ex. calculs des directions et de l'accumulation des flux). Les polygones cibles ont été dessinés manuellement autour des emplacements des ouvrages de sédimentation. La localisation des cibles doit être réalisée avec précaution. En effet, le polygone cible doit capturer le cours d'eau principal prédit par les traitements du MNT, mais avec un MNT de résolution 25 m, l'estimation de l'écoulement des flux et donc de la position des cours d'eau peut différer de leur position réelle représentée dans la BD TOPO®. La qualité du MNT peut générer des résultats aberrants particulièrement dans les zones où le cours d'eau n'est pas confiné comme sur les cônes de déjection. Le traitement préalable du MNT avec les outils hydrologiques SIG à partir de GRASS ou SAGA dans QGIS [9] ou avec TauDEM [10] sur R ou Python permet d'obtenir la carte des accumulations des flux telles qu'elles sont estimées par le MNT d'étude. Il convient de noter que SedInConnect utilise la méthode « D-Infinity » (Tarboton, 1997) pour le calcul des directions de flux, c'est-à-dire qu'il disperse le flux sur plusieurs pixels aval si leur différentiel d'altitude est limité. Cette option permet de mieux représenter les zones où l'écoulement est peu confiné ce qui diminue la connectivité sédimentaire. Le raster d'accumulation des flux permet ainsi de corriger l'emplacement des exutoires des bassins versants et les contraignant à se situer dans les zones où les flux sont concentrés (Figure 6). A cause de l'effet de résolution, il est préférable de transformer les valeurs du raster d'accumulation des flux en logarithme (avec la calculatrice raster) ou de mettre un seuil dans l'onglet de symbologie afin de mieux distinguer les zones d'accumulation des flux dans les petits bassins versants (Figure 6). Il a été observé des cas où la résolution à 25 m de la BD Alti ne permettait pas de cartographier le bassin versant correctement : des défluences sur les bords du bassin versant "capturaient" une partie de la surface drainée dont les flux n'aboutissaient jamais à l'exutoire. Il est important que l'index de connectivité sédimentaire à l'exutoire soit calculé avec l'ensemble du bassin versant, il faut donc corriger le MNT manuellement de manière à empêcher ce genre de fuite. Une astuce possible est de forcer une altitude supérieure à l'ensemble des pixels situés hors du bassin versant et à maintenir l'exutoire comme un point bas drainant la zone qui garde sa topographie telle que représentée par la BD Alti 25m.

— **Les puits.** Certains éléments tels que les lacs sont des pièges naturels ou artificiels de sédiments. Les flux hydrologiques traversent ces derniers mais pas la charge grossière, objet de cette étude. SedInConnect permet de prendre en considération ces puits à sédiments (*sinks*) qui doivent être une couche shapefile de type polygone. Dans notre cas, nous avons importé les délimitations de glaciers et des lacs de la BD TOPO® pour définir ces puits à sédiments (version de 2019).

— **Le facteur de pondération W : la rugosité topographique.** Le logiciel SedInConnect permet également l'utilisation d'un facteur de pondération. Par défaut, le logiciel propose de calculer la rugosité topographique à partir du MNT d'entrée, hydrologiquement non-corrigé, la rugosité topographique étant une variable clé contrôlant l'acheminement des sédiments (Cavalli et Marchi, 2008). C'est l'option qui a été retenue dans notre cas. D'autres formulations ont été testées dans la littérature tel que coefficient de Manning par exemple (Heckmann et collab., 2018). Ce coefficient de pondération doit être adapté au processus que l'utilisateur vise à étudier. Le calcul de la rugosité topographique est dépendant du MNT utilisé en entrée. Par

9. Voir site internet : `https://desktop.arcgis.com/fr/arcmap/latest/tools/spatial-analyst-toolbox/how-sink-works.htm`

10. Voir site internet : `https://hydrology.usu.edu/taudem/taudem5/documentation.html`

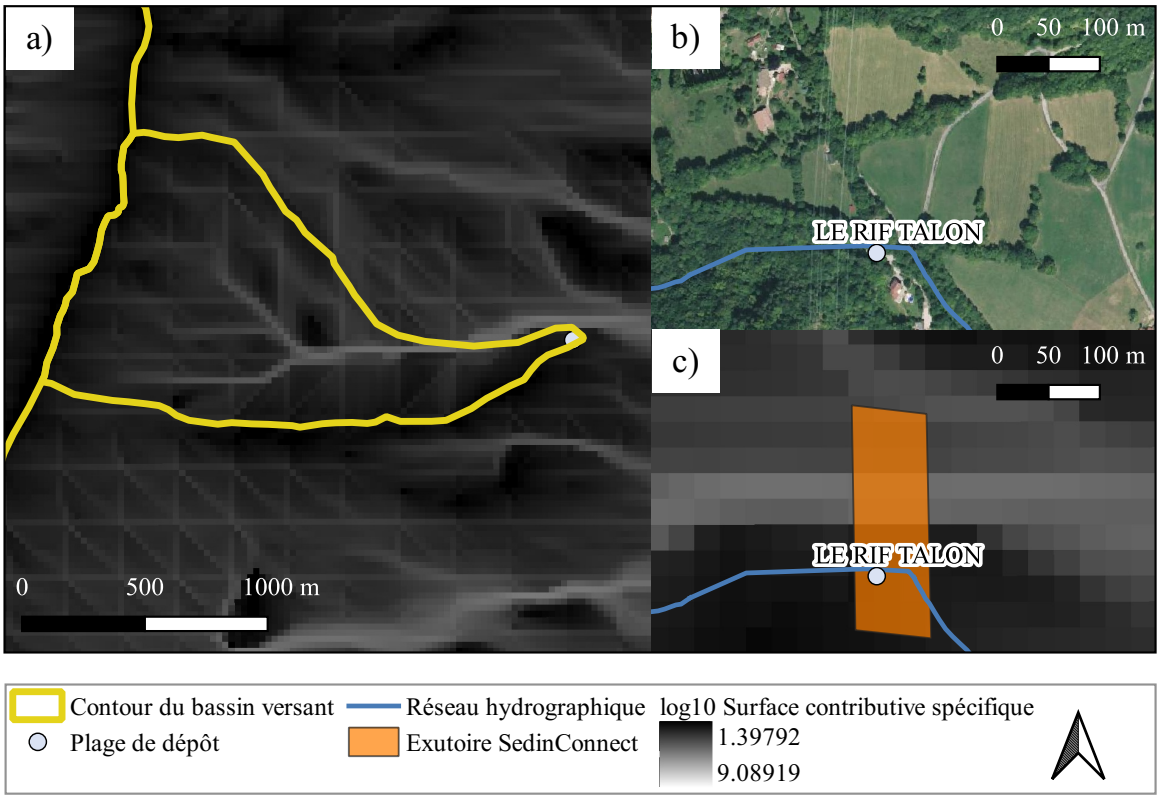


FIGURE 6 – a) Exemple de calcul de surface contributive dans le bassin du Rif Talon. Due à la résolution grossière du MNT, les écoulements des flux calculés peuvent différer du tracé réel du cours d'eau (b). Par conséquent, l'emprise de l'exutoire utilisé dans SedInConnect doit être corrigée pour capter les écoulements calculés (c).

conséquent, pour permettre la reproductibilité de notre méthode à d'autres bassins versants, nous avons mis à disposition le raster contenant le facteur de pondération W utilisé [11]. Le calcul de la rugosité topographique se fait sur une fenêtre glissante centrée sur le pixel analysé. Nous avons utilisé une fenêtre glissante minimale de 2 pixels de large : l'objectif était de calculer une approximation grossière de la rugosité à l'échelle du chenal torrentiel : la rugosité à plus large échelle n'a pas d'intérêt majeur dans l'analyse de l'indice de connectivité que nous cherchons à qualifier.

Le logiciel SedInConnect fonctionne essentiellement avec des objets d'entrée dans un système de coordonnées mondial (c.-à-d. le système WGS84 / UTM zone 31N pour la France métropolitaine).
Autre point pratique, SedInConnect n'est pas adapté aux bassins versants composés (c.-à-d. plusieurs exutoires dans un même bassin versant). Dans ce cas, le logiciel donne des valeurs de IC pour l'exutoire en aval du bassin versant qui sont erronées et dépendent des exutoires en amont. Quand plusieurs ouvrages de sédimentation étaient localisés dans un bassin versant, un ordre croissant vers l'aval a été assigné à chaque ouvrage et un calcul indépendant de l'IC a été mené pour chaque ouvrage.

En sortie, SedInConnect présente un raster (raster au format GeoTIFF) des valeurs de IC. L'IC est défini dans la gamme de [-∞, +∞], le résultat est présenté en terme d'indice élevé ou faible, où les valeurs élevées représentent une meilleure connectivité. Il est important de noter que l'IC est adimen-

11. Fichier disponible dans le lien : `https://doi.org/10.15454/75PGC6`

sionnel, toutefois sa valeur dépend de la résolution. On ne peut donc pas comparer directement des valeurs IC calculées dans des résolutions différentes. Il faut en conséquence utiliser la même résolution que celle utilisée dans ce rapport pour alimenter les méthodes faisant appel à l'IC comme paramètre d'entrée. Sur les sites disposant de données topographiques plus précises, nous recommandons en parallèle de mener une analyse d'IC à une résolution de 5 m pour analyser la répartition spatiale de cet indice au sein du bassin versant (Torresani et collab., 2021 ; Torresani, 2021). Par ailleurs, dans l'option par défaut de SedInConnect, le facteur de pondération W est normalisé par la rugosité la plus forte de la zone d'étude (dans notre cas 75.4 m sur l'ensemble de la zone étudiée). Donc même à résolution identique, il n'est pas trivial de comparer des IC calculés indépendamment dans deux bassins différents. L'intérêt principal de cet outil est en premier lieu de donner une cartographie des zones relativement plus ou moins connectées à l'intérieur du bassin versant. A condition d'utiliser le même facteur de pondération W, les valeurs absolues des IC sont comparables aux valeurs estimées sur les bassins versants étudiés et peuvent être réutilisées dans des équations comme proposé plus loin.

2.2.3 Délimitation et calcul des surfaces de bassins versants

Nous avons ensuite délimité les bassins versants en créant une couche shapefile de type polygone qui correspond aux emprises des bassins versants d'étude. Le travail de délimitation des bassins versants s'est en partie basé sur les sorties de SedInConnect, corrigées éventuellement manuellement sur la base des cartes SCAN 25 de l'IGN. En effet, SedInConnect fournit une délimitation de bassin versant pour chaque exutoire auquel il calcule l'IC. Le logiciel fournit une délimitation du bassin versant sédimentaire (c.-à-d. la partie du bassin versant connectée à l'exutoire après prise en compte des puits à sédiments) qui peut être étendue à l'ensemble du bassin versant hydrologique en relançant le logiciel sans les puits à sédiments. Ainsi, malgré les limites du MNT d'étude (par ex. la modification de l'emplacement des exutoires, la résolution grossière du MNT, etc.), les délimitations de bassins versants fournies par le logiciel facilitent le travail de délimitation des bassins versants en offrant une première cartographie automatique. Pour chaque ouvrage de sédimentation, nous avons extrait la surface du bassin versant A.

2.2.4 Délimitation et calcul des surfaces en érosion

La recharge sédimentaire des torrents par les versants est réalisée par des processus d'érosion complexes et variés. Les sources sédimentaires sont généralement définies comme localisées, telles que des éboulements rocheux, ou diffuses, telles que le ravinement (Liebault et collab., 2013). Leur production sédimentaire et leur connectivité avec le torrent fluctuent naturellement dans le temps (Fryirs, 2013).

Le concept de «zone de production» ou «*effective catchment area*» (également appelé «*contributive catchment area*» en anglais ; Harvey, 2002 ; Fryirs, 2013 ; Altmann et collab., 2021) a récemment été introduit pour distinguer la surface qui contribue à la fourniture sédimentaire par rapport à la surface totale du bassin versant. Toutes les surfaces en érosion ne contribuent pas à la recharge sédimentaire du torrent et plusieurs études ont cherché à délimiter les zones de production en considérant l'état de connectivité des surfaces en érosion avec le lit du torrent. Certaines d'entre elles sont principalement basées sur le traitement d'un MNT. Par exemple, Fryirs et collab. (2007) délimitent les surfaces de zones de production à partir de l'analyse de la topographie du bassin et fixent une valeur seuil de pente pour distinguer les surfaces connectées et non connectées. De la même manière, Altmann et collab. (2021) utilisent un ensemble de règles basé sur la pente, la distance au cours d'eau et ajoutent un facteur de pondération pour la couverture végétale. A l'inverse des méthodes précédentes, Peteuil et Liébault (2011) cartographient par photo-interprétation des photographies aériennes les zones de production, c.-à-d. sans couverture végétale. L'assignation du caractère connecté ou non à chaque zone est décidée dans un second temps par expertise de l'opérateur sur la base des photographies aériennes

(existence d'une connexion visible entre la zone et le lit du torrent) et des cartes TOPO (apparition d'un trait bleu continu ou tireté sur le SCAN 25 indiquant un talweg présentant des écoulements pérennes ou éphémères).

Le concept de zone de production est donc intimement lié à celui de la connectivité sédimentaire d'un bassin versant. La méthode par délimitation des zones en érosion permet de quantifier et de cartographier les sources de sédiments. Peteuil et Liébault (2011) ainsi que Altmann et collab. (2021) ont montré que la surface de ces zones de production est une variable clé pour la prédiction du volume d'apport sédimentaire à l'exutoire des bassins.

Pour la délimitation des zones de production pour l'ensemble des bassins d'études, nous avons choisi d'utiliser une méthode inspirée de Peteuil et Liébault (2011). Ce choix a été guidé par plusieurs raisons : (1) l'utilisation des méthodes basées sur un MNT (cf. Altmann et collab., 2021) n'est pas adapté à notre cas d'études à cause de la résolution de notre MNT de projet (les études citées précédemment utilisent généralement des MNT à des résolutions variant de 1 à 5 m). (2) L'indice de connectivité de Cavalli et collab. (2013) est probablement très corrélé aux zones de production. Si nous utilisons une méthode basée sur un MNT, nous définirions l'IC et les zones de production en utilisant la même variable d'entrée (c.-à-d. le MNT à 25 m). Le fait d'utiliser la méthode inspirée de Peteuil et Liébault (2011) permet de créer une variable indépendante de l'IC. (3) Une méthode basée exclusivement sur les photos aériennes est par ailleurs potentiellement plus aisée à appliquer dans un cadre opérationnel. Des discussions avec les utilisateurs de la méthode ECsTREM laissent toutefois penser que la digitalisation manuelle des zones en érosion est très dépendante de l'opérateur. Nous avons donc testé une méthode alternative basée sur une base de données d'occupation des sols SIG pré-existante.

Nous avons réalisé la délimitation des surfaces en érosion à partir de la BD Forêt® (une couche shapefile est disponible pour chaque département) et de la cartographie d'occupation des sols Corine Land Cover (CLC). La BD Forêt® offre une meilleure précision que CLC dans la délimitation des différentes entités du paysage, mais ne rend compte que de certaines de ces entités. Elle se focalise sur les couvertures forestières et comprend aussi des polygones de «formations herbacées» et «landes». Dans cette BD Forêt®, les autres types d'occupation du sol sont considérés comme «nuls» (par ex. zones agricoles, urbanisées). Les contours «nuls» de la BD Forêt peuvent aussi bien présenter des sols nus en tête de bassin versant, qui nous intéressent en tant que zones de production, que des prairies et zones urbaines peu productives en terme de transport solide. Par ailleurs les formations de type «landes» peuvent parfois être des zones ravinées potentiellement productrices de sédiments, ce qui peut être vérifié, ou exclu, par une vérification visuelle rapide des images aériennes sur ces polygones.

Dans un premier temps, nous avons réalisé une «union» des contours des bassins avec les BD Forêt® dans QGIS afin de garder seulement les entités de la BD Forêt® inclues dans les bassins d'études et que celles-ci soient assignées à leur bassin respectif. De cette union, nous avons sélectionné les surfaces potentiellement en érosion, il s'agit principalement des surfaces «nulles» et des entités de type «Landes» (sélection attributaire réalisée dans QGIS : "TFV" IS NULL OR "TFV" = 'Lande').

Ensuite, une sélection par localisation sur la base de la couche CLC permet de filtrer une partie des géométries de la BD Forêt®. L'objectif est par exemple de filtrer dans les surfaces «nulles» de la BD Forêt® celles qui pourraient correspondre à des zones urbaines ou agricoles. La sélection comprend les géométries de la BD Forêt® qui intersectent les entités de la couche CLC qui ont les codes '332' (*Bare rocks*), '333' (*Sparsely vegetated areas*), '312' (*Coniferous forest*), '311' (*Broad-leaved forest*), '322' (*Moors and heathland*) ou '313' (*Mixed forest*). On note que la sélection de catégories choisies dans CLC surestime largement les surfaces en érosion mais permet de ne pas laisser de côté les nombreuses

surfaces en érosion qui se trouvent en zones recensées comme forestières dans CLC.

Les réseaux routiers agissent comme des frontières entre les différentes entités de la BD Forêt®. L'utilisation de la couche du réseau routier de la BD CARTO (IGN) permet de supprimer les surfaces nulles de la BD Forêt® qui correspondent à l'emprise des routes et de fragmenter les surfaces sans avoir recours et des délimitations manuelles. Pour cela, une zone tampon a été réalisée en prenant en compte la largeur de la route (à laquelle on rajoute 3 mètres car la BD Forêt® surestime la largeur du réseau). L'action «différence» dans QGIS, entre la zone tampon et la sélection de la BD Forêt®, permet de retirer des surfaces d'érosion la surface correspondant aux réseaux routiers. Les pertes sont assez faibles (marginales selon les incertitudes qu'on a sur la délimitation des surfaces en érosion) mais cette action permet aussi de mieux identifier les différentes entités.

Nous avons ensuite caractérisé l'état de connexion des différentes surfaces en érosion avec le réseau hydrographique. Pour cela, en cohérence avec l'approche retenue par Peteuil et Liébault (2011), nous avons considéré comme connectées les surfaces en érosion pour lesquelles le lien entre le versant et cours d'eau est directement visible sur l'orthophoto, et les surfaces qui sont reliées au cours d'eau principal par le réseau hydrographique représenté par la BD TOPO®. On note la présence de quelques bassins versants, généralement situés en altitude, drainant de grandes zones de pâturages et de sol (quasi-nu) [12]. Notre protocole amène une surestimation des surfaces en érosion dans ces bassins versants : une large partie de ces zones à faible couvert végétal est en réalité peu productive ou déconnectée.

Nous avons ensuite réalisé une extraction des emprises des zones de productions en faisant une «jointure par attribut» avec les points des bassins versants. La méthode décrite ci-dessus considère les surfaces de glaciers comme des zones de production. Les seuls bassins versants partiellement englacés dans notre échantillon sont situés dans la vallée de Chamonix. La question de la connectivité sédimentaire au droit des glaciers est complexe (Berthet, 2016). Nous n'avions pas les moyens d'étudier en détail l'existence de potentiels réseaux sous-glaciaires. Nous avons donc négligé les apports sédimentaires provenant des glaciers et fait le choix, très simplificateur, de considérer les glaciers comme des puits à sédiment. Les zones de production sédimentaire prises en compte pour ces bassins versants englacés sont donc exclusivement en aval des glaciers. L'emprise des glaciers a été basée sur les données vectorielles fournies par la BD TOPO®. La jointure par localisation nous a permis de déterminer pour chaque point s'il est dans l'emprise d'un glacier ou non. Ainsi, lors des traitements des données, chaque point positionné à la fois sur une zone de production et un glacier est systématiquement considéré comme appartenant à une zone de production déconnectée.

Le traitement des données nous a permis de calculer les surfaces des zones de production pour chaque bassin versant. On s'intéresse par la suite à la proportion de zone de production dans le bassin. Nous avons donc calculé la fraction de surface en érosion connectée sur la superficie du bassin versant hydrologique R_{ZP}.

Nous avons identifié 37 bassins versants pour lesquels aucune surface de zone de production n'a été délimitée avec notre protocole. Après analyse des images aériennes, ces bassins versants ne présentent pas de zones d'érosion clairement visibles, à l'exception de deux bassins versants pour lesquels la BD Forêt ne détecte pas les zones en érosion [13]. Pour ces bassins, nous avons fait l'hypothèse que les sources de sédiments, très réduites, correspondent essentiellement à la remobilisation des sédiments du lit du cours d'eau. Nous avons réalisé une approximation des largeurs des cours d'eau à partir des relations de géométrie hydraulique qui relient la largeur à plein bord à la surface du bassin versant

12. Il s'agit des bassins de la Lignarre (ID123), du Treuil (ID98) et de Sarenne (AS26)
13. Il s'agit des deux bassins du torrent de Piézan (ordre 1 et 2, ID286 et ID287)

(Leopold et Maddock, 1953). Des modèles de géométrie hydraulique ont été développés en France à l'échelle nationale et régionales dans le cadre du projet CARHYCE (Gob et collab., 2014). Dans notre cas, nous avons estimé la largeur à plein bord W_{pb} pour l'ensemble des sites d'études en utilisant le modèle régional CARHYCE construit à partir d'observations dans les Alpes internes [14] :

$$W_{pb} = 5.06 \times A^{0.27}. \quad (1)$$

La surface du lit a été estimée par le produit de $W_{pb} \times L_{CE}$, où L_{CE} est la longueur du cours d'eau principal dans le bassin versant [15], et a été additionnée à la surface de la zone de production de chaque bassin.

2.2.5 Extraction des valeurs de connectivité sédimentaire et d'altitude

Afin d'extraire les valeurs brutes de connectivité sédimentaire provenant des rasters de sortie de SedInConnect et de les assigner spécifiquement à chaque bassin versant d'étude, nous avons transformé les pixels des rasters de sortie en points au utilisant la fonction «Pixels de raster en points» dans la boîte à outils de traitement QGIS. Cette procédure permet de convertir un raster en vecteur tout en gardant l'information des pixels (valeur de l'IC) dans les points. La fonction «joindre les attributs par localisation» a ensuite été réalisée afin que tous les points soient associés au bassin versant dans lequel ils sont contenus. Notez que cette étape n'existe pas si l'étude porte sur un seul bassin versant. Cette méthode a été répétée pour les différents ordres de bassins versants (Figure 7). De la même manière, l'altitude de chaque pixel du MNT et l'emprise des zones de production ont été également été extraits sur les couches couches de points et pour chaque bassin versant d'étude. De manière générale, l'utilisation des points sert de base pour l'extraction des attributs des différentes données vectorielles et raster dans les section suivantes.

Ces couches de points ont ensuite été sauvegardées en tableaux (c.-à-d. en fichiers «.csv» pour chaque bassin versant) permettant ainsi d'effectuer un traitement des données sous le logiciel R (R Core Team, 2020). Cela permet notamment d'estimer la valeur médiane ou le quantile 95 de l'IC ($IC50$ et $IC95$, respectivement) pour chaque bassin versant. La connaissance de l'emprise des zones en érosion sur les couches de points nous a également permis de calculer la médiane et le quantile 95 de l'IC spécifiques aux zones en érosion ($IC50_{ZP}$ et $IC95_{ZP}$, respectivement). Nous avons également calculé le rapport entre la valeur moyenne de IC du bassin versant sur la valeur moyenne des zones de production R_{ICm}. De manière comparable, nous avons calculé le rapport entre la valeur du quantile 95 de IC du bassin versant sur la valeur du quantile 95 des zones de production R_{IC95}. Pour les bassins n'ayant pas de zone de production délimitée, nous avons analysé les valeurs de $IC95_{ZP}$ et les valeurs moyennes de l'IC du bassin ICm (Figure 8). L'analyse montre que le rapport entre $IC95_{ZP}$ et ICm est généralement inférieur à 1 sauf dans quelques bassins où le rapport avoisine 1.1. Nous avons assigné arbitrairement aux bassins sans zone de production des valeurs de $IC95_{ZP}$ égales à 1.1 fois la valeur de ICm. L'idée générale est qu'il faut que ce paramètre ait une valeur puisqu'il est utilisé par la suite dans nos analyses. Nous avons forcé une valeur cohérente avec la valeur des IC du bassin versant mais représentative des connectivité les plus faibles du jeu de données étudié.

2.2.6 Indices géologiques

Certaines formations géologiques sont plus favorables que d'autres à la production de matériaux mobilisables. Nous avons recensé deux indices géologiques permettant de décrire l'érodibilité de la géologie dans les bassins torrentiels : l'indice géologique développé par D'Agostino et Marchi (2001) et l'indice IGM (Indice Géologique de Montagne) développé par les services de l'ONF-RTM et basé sur

14. voir site de CARHYCE : http ://194.57.254.11/IED/
15. voir section 2.2.7 ci-après pour les détails concernant l'estimation de L_{CE}.

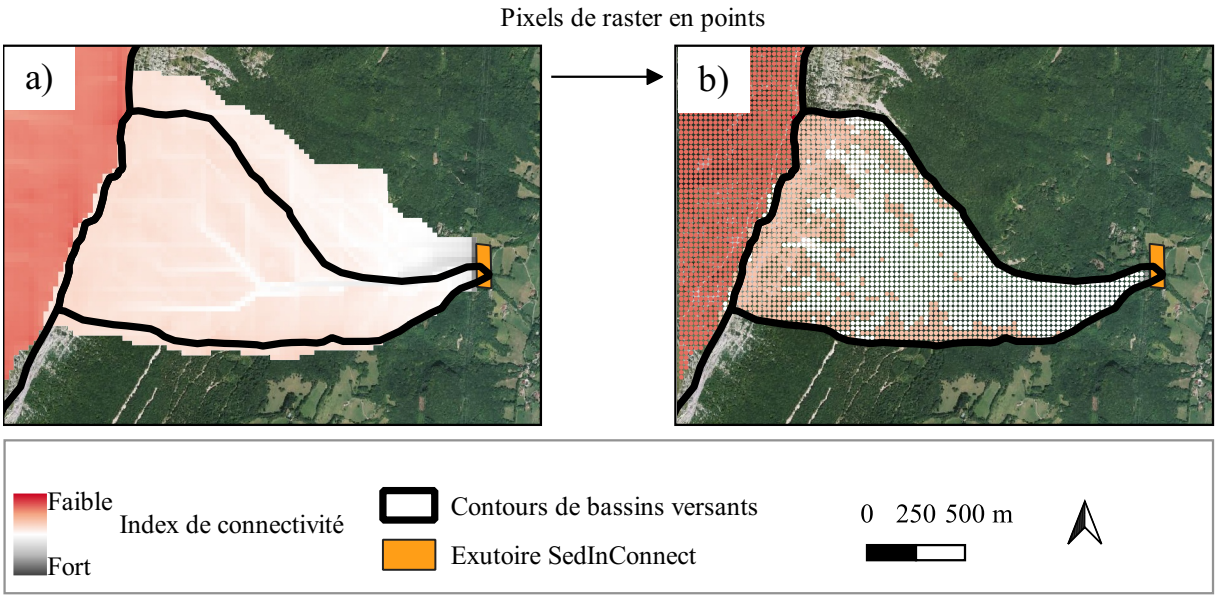


FIGURE 7 – a) Sortie du logiciel SedInConnect pour le bassin du Rif Talon. b) Extraction des valeurs d'IC contenu dans le bassin versant.

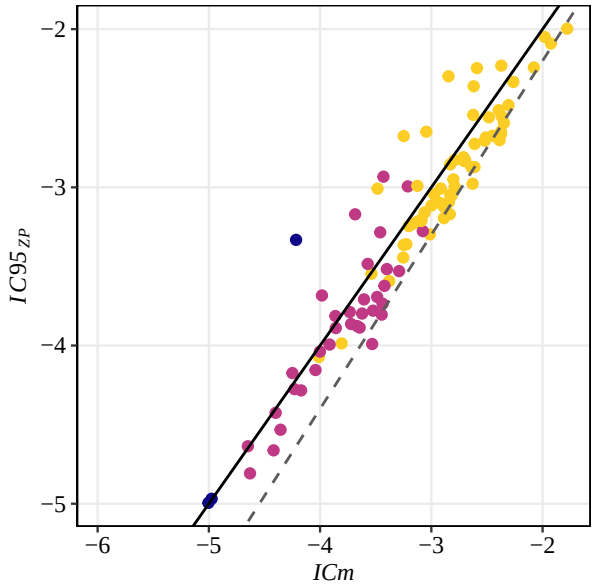


FIGURE 8 – Relation entre $IC95_{ZP}$ et ICm. Le trait plein indique la ligne de parfaite égalité (pente : 1 : 1). Le trait discontinu gris indique la ligne de pente 1 : 1.1. Le code couleur correspond au type de transport solide dominant : jaune = *debris flow*, rose = *debris flood* et violet = *bedload*. Voir ci-après, section 2.2.11, pour les détails concernant la classification des bassins versants.

la classification développée par Robert Marie (Cemagref, 1984 ; Brochot et collab., 2002) [16]. L'indice

16. Les classes sont les suivantes : (1) Formations rocheuses cohérentes : écroulements ou éboulisation à gros blocs. (1a) Granites/roches volcaniques : diorites, microdiorites, roches vertes. (1b) Molasse/calcaires massifs/grès type Annot ; (1c) Gneiss/certains micaschistes. (2) Formations rocheuses fracturées : éboulisation avec blocs décimétriques (2a) Dolomies, quartzites/brèches et conglomérats, certains grès, cargneules/calcaires marneux (2b) Calcschistes et schistes, certains micaschistes. (3) Formations rocheuses peu cohérentes : teneur importante en argile (3a) Marnes, schistes et grès en association (type Houiller) schistes argileux. (3b) Certains flyschs. (4) Formations meubles cohérentes : terrains facilement

de D'Agostino et Marchi (2001) (voir également Marchi et D'Agostino, 2004) a été développé pour prédire la magnitude des laves torrentielles dans les Alpes Italiennes. Cet indice exprime l'érodibilité moyenne de la géologie d'un bassin et se calcule à partir des scores de pondérations attribuées aux différentes classes lithologiques, selon leur résistance à l'érosion (Tableau 3), et de la proportion des surfaces couvertes par ces classes. L'indice se calcule selon l'équation suivante :

$$IG = \frac{\sum_i Score_i \cdot A_i}{A}, \tag{2}$$

où IG est l'indice géologique, A l'aire totale, A_i l'aire associée à la classe de lithologie i et $Score_i$ le score de pondération du Tableau 3 pour la classe de lithologie i. Dans la mesure où les scores $\in [0;5]$, IG évolue dans la même gamme.

Table 3 – Classes lithologiques et scores géologiques associés (d'après D'Agostino et Marchi, 2001). *Suivant les auteurs, pour les bassins entièrement ou presque entièrement constitués de cette lithologie, une valeur de précaution de 0.5 est choisie plutôt que 0.

Description	Score
Dépôts Quaternaire	5
Schistes et phyllites	4
Marnes, calcaires marneux, siltite, etc.	3
Roches volcaniques	2
Dolomite et roches calcaires	1
Les roches ignées et métamorphiques massives*	0 (0.5)

L'indice géologique IGM repose sur la classification géologique de R. Marie (Cemagref, 1984). Cette classification est notamment utilisée par les services de l'ONF-RTM pour renseigner les fiches ouvrages. L'IGM se calcule également à partir de scores de pondérations attribuées à chaque classe lithologique et en fonction de proportion des surfaces couvertes par ces classes. La classification de R. Marie (1984) repose principalement sur le degré d'altération des formations rocheuses. Cette information est difficile à obtenir à l'échelle du territoire HYDRODEMO car elle nécessite une analyse des cartes géologiques locales et des visites de terrain sur chaque bassin. Pour cette raison, nous avons choisi de caractériser la géologie selon l'indice de D'Agostino et Marchi (2001) qui se base sur la nature lithologique principalement. Par ailleurs, nous avons choisi de calculer l'indice géologique uniquement sur les surfaces en érosion connectées au réseau hydrographique (i.e. les zones de production définies plus haut). En effet, l'équation (2) peut avoir tendance à surestimer le potentiel productif de certains bassins. Par exemple, de nombreux bassins ont d'importantes surfaces de dépôts morainiques ou fluvio-glaciaires mais présentent un potentiel productif faible car ces dépôts sont difficilement mobilisables, particulièrement sous couvert végétal. Ainsi l'équation (2) de D'Agostino et Marchi (2001) a été ré-écrite de la façon suivante :

$$IG_{ZP} = \frac{\sum_i Score_i \cdot A_{ZP,i}}{A_{ZP}}, \tag{3}$$

où IG_{ZP} est l'indice géologique des zones de production, A_{ZP} est la surface totale des zones de production et A_{ZPi} la surface respective de chaque classe lithologique i en zone de production.

Pour calculer l'indice géologique, nous avons dans un premier temps extrait les données de la BD BRGM Charm-50 pour chacun de nos bassins versants (une couche shapefile est disponible pour

mobilisables avec infiltrations possibles Moraines, fluvio-glaciaire, alluvions, éboulis, produits d'altération. (5) Formations meubles peu cohérentes : ayant subi un mouvement actuel ou ancien Eboulements, terrains glissés, coulées boueuses. (6) Roches solubles type Gypse.

chaque département). L'outil «Joindre les attributs par localisation» de QGIS a permis d'assigner la notation et la catégorie géologique selon la terminologie BRGM pour chaque pixel (Figure 9). Toutes les catégories extraites de la BD BRGM Charm-50 ont ensuite été classifiées pour associer chacune de ces catégories BRGM à une des classes lithologiques du tableau 3. Toutes les catégories géologiques présentes dans le territoire HYDRODEMO ne sont pas mentionnées dans le tableau et nous avons réalisé un travail de correspondance des catégories géologiques avec les classes de D'Agostino et Marchi (2001) en se basant sur les similarités du comportement des formations géologiques à l'érosion (cf. Annexe B). Nous avons ensuite calculé l'IG_{ZP} pour chaque bassin selon l'équation (4). Pour les bassins n'ayant pas de zones en érosion connectées, l'IG_{ZP} est égal à 0.5.

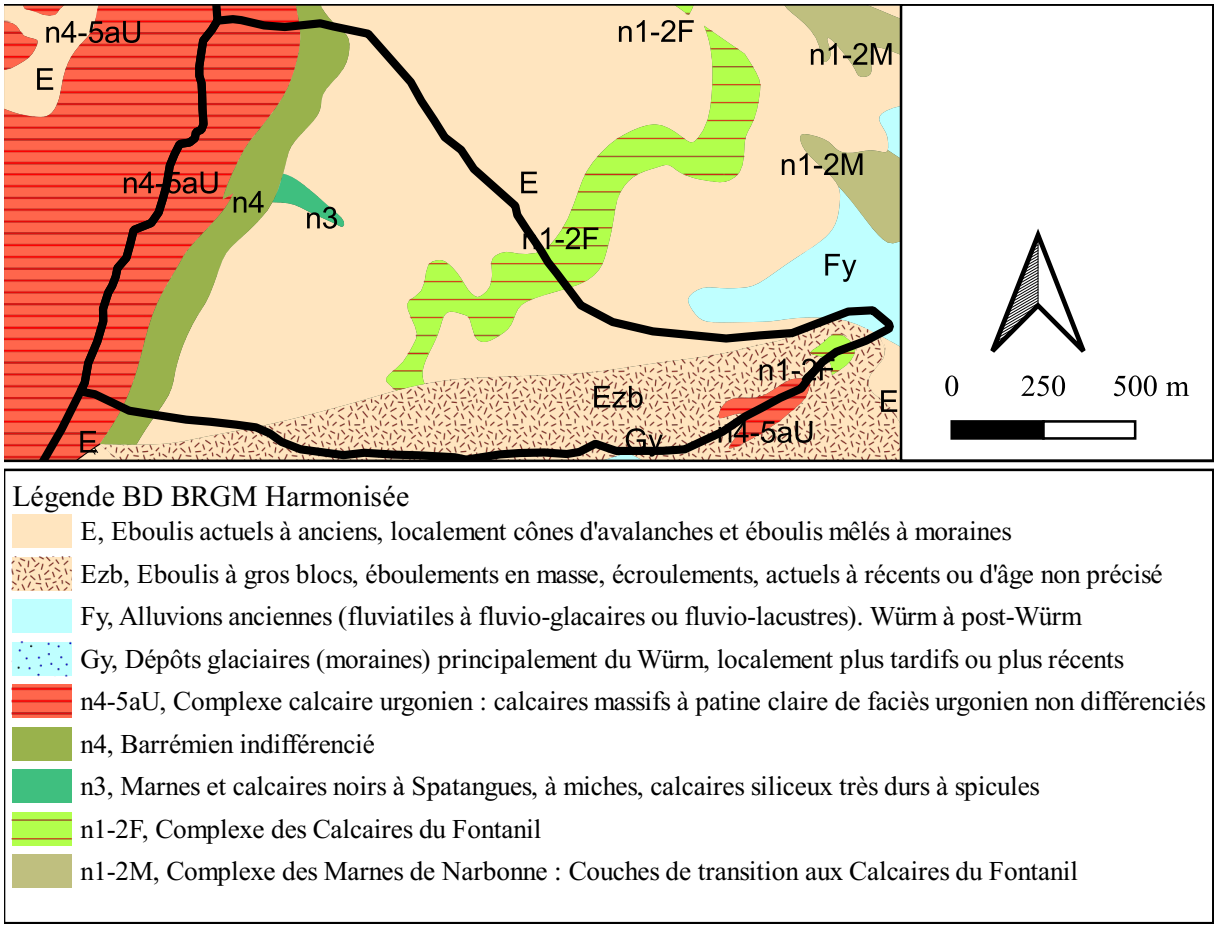


FIGURE 9 – Exemple de la carte géologique de la BD Charm-50, cas du bassin du Rif Talon.

2.2.7 Pente du cours d'eau

La pente du cours d'eau est un paramètre clé qui conditionne en grande partie la capacité de transport des sédiments. Afin d'estimer le profil en long du cours d'eau de chaque bassin versant étudié, nous avons extrait le cours d'eau principal en une couche shapefile de type polylignes en se basant sur le tracé existant de la BD TOPO (couche «RESEAU HYDROGRAPHIQUE», disponible pour chaque département) et sans faire la distinction entre les cours d'eau permanents et intermittents. Dans le cas où le bassin versant se divise en plusieurs branches, nous avons digitalisé le cours d'eau de la branche principale que nous avons considéré comme la branche drainant la plus grande surface du bassin ou, le cas échéant, la branche drainant la plus grande superficie de zone en érosion selon le délimitation réalisée précédemment. L'ensemble des tracés de cours d'eau sont disponible dans l'Annexe A.

Nous avons ensuite utilisé l'outil «profile tool» de l'extension QGIS du même nom qui produit les profils en long des cours d'eau en se basant sur le MNT du projet. L'outil fournit notamment un tableau de valeurs du profil en long qui a pu être copié dans un fichier «.csv» pour chaque bassin. Nous avons ainsi pu analyser les profils en long de chaque bassin et extraire la pente moyenne S_{CE} le long du tronçon qui est considéré comme conditionnant le transport solide à l'exutoire (Figure 10). La pente est estimée via l'ajustement d'un modèle linéaire entre l'ensemble des altitudes des points du profil et leur abscisse. L'ensemble des profils en long et des pentes calculées sont disponibles dans l'Annexe C. Nous avons également extrait la longueur du cours d'eau principal L_{CE} de chaque bassin à partir de ces profils en long.

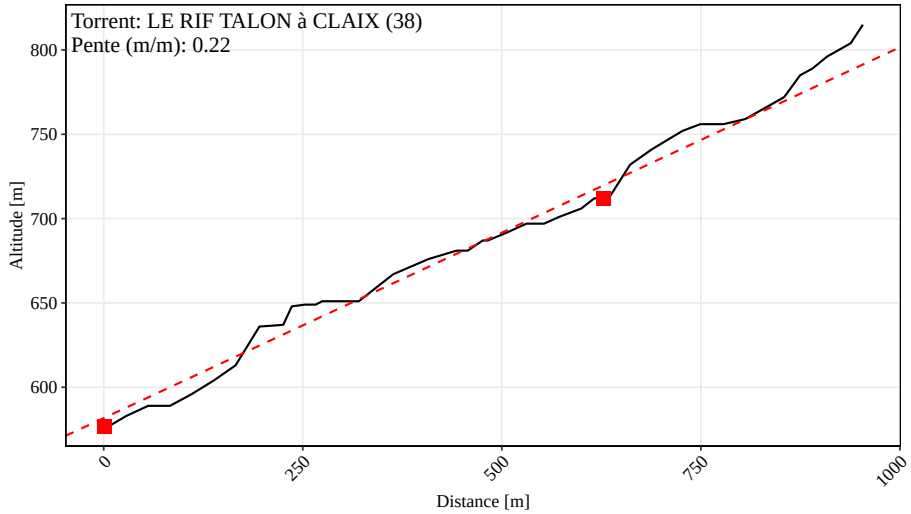


FIGURE 10 – Profil en long du Rif Talon. Les deux points en rouge délimitent la partie du profil en long considérée pour le calcul de la pente : il s'agit de la partie homogène du profil en long au droit de l'exutoire. La droite rouge en pointillée représente la pente calculée.

Plusieurs sources de données topographiques peuvent être mises à contribution pour ce genre d'analyse. *Afin de disposer d'un jeux de données homogène, nous avons malheureusement dû utiliser la BD Alti 25m de l'IGN : la BD Alti 5m était de qualité inégale sur le secteur d'étude. Il en suit que les profils en long sont très grossiers* (Annexe C). Ils ne saisissent ainsi pas la présence d'ouvrages ou de points durs naturels et lissent des profils en long en réalité plus subtils. Les pentes estimées ignorent ainsi les sites équipés de barrages et seuils de correction torrentielle et n'intègrent pas les incisions locales associées à des pentes alluviales plus faibles que les pentes du terrain présentent à large échelle. Les pentes estimées dans le jeu de données peuvent ainsi avoir des valeurs différentes, normalement supérieures, des pentes réelles analysées à plus fine échelle dans toute étude approfondie d'un système torrentiel. Si le travail d'HydroDemo est mis à jour à l'avenir, il semblerait prioritaire de mener une mise à jour des valeurs de pentes sur la base de futures données LiDAR disponibles sur l'ensemble du territoire. Dans la mesure où l'ensemble de l'approche HydroDemo est calée avec les pentes estimées sur la BD Alti 25m, il faut utiliser la même source de données si l'on veut utiliser les modèles HydroDemo.

2.2.8 Pente du cône de déjection

Les caractéristiques morphologiques d'un cône de déjection et particulièrement la pente de celui-ci peuvent potentiellement refléter l'activité du bassin versant en terme de production sédimentaire. Par exemple, plusieurs études observent que des cônes de grandes surfaces et volumes normalisés ou avec

de fortes pentes traduisent des bassins avec une forte production sédimentaire souvent sous la forme de laves torrentielles (Bertrand et collab., 2013 ; Jakob et collab., 2020). Nous avons cherché à calculer la pente du cône de déjection de chaque bassin versant en utilisant une méthodologie proche de Bertrand et collab. (2013). De la même manière que pour la pente du cours d'eau, nous avons digitalisé le cours d'eau au niveau de l'apex du cône de déjection jusqu'à la limite aval du cône en se basant sur le tracé du cours d'eau de la BD TOPO. L'emprise du cône de déjection a pu être expertisé à partir des couches «L_DIVERS» de la BD BRGM Charm-50 qui décrivent, entre autres, les directions d'écoulement par gravité dans les cônes de déjection. Dans les cas où le bassin ne semble pas avoir de cône de déjection et/ou que celui-ci n'a pas été digitalisé dans la BD BRGM Charm-50, nous avons digitalisé le cours d'eau sur un tronçon d'une centaine de mètres en amont et en aval de la plage dépôt correspondante, en faisant l'hypothèse que la plage de dépôt se situe vers l'apex du cône de déjection associé au bassin.

Comme décrit dans la section précédente, l'outil «profile tool» a été utilisé dans QGIS afin d'obtenir les profils en long des cônes de déjection. Nous avons extrait la pente moyenne du cône S_C au niveau de l'apex pour chaque bassin. L'ensemble des profils en long et des pentes calculées sont disponibles dans l'Annexe D.

2.2.9 Indice de Melton

L'indice de Melton (Melton, 1965), ou dénivelé spécifique, est un indice largement utilisé dans la littérature pour caractériser les bassins à laves torrentielles (Bovis et Jakob, 1999 ; Wilford et collab., 2004 ; Bertrand et collab., 2013). Il s'agit du rapport entre la dénivelée du bassin-versant, et la racine carrée de la superficie du même bassin-versant :

$$M = \frac{Z_{max} - Z_{min}}{A^{0,5}}, \tag{4}$$

où M est l'indice de Melton, Z_{max} et Z_{min} sont, respectivement, l'altitude maximale et celle de l'exutoire du bassin versant, et A est la surface du bassin versant. Nous avons calculé cet indice pour chaque bassin versant, leurs valeurs sont indiquées dans l'Annexe A.

2.2.10 Données de précipitations

Afin d'avoir des valeurs des quantiles de précipitation pour l'ensemble des bassins étudiés, une analyse des chroniques de précipitation a été réalisée pour chaque bassin. Pour cela, nous avons analysé les données pluviométriques provenant des réanalyses COMEPHORE (cf. rapports des Actions HYDRODEMO 1 et 4). Ces données fournissent des valeurs de précipitation à un pas de temps horaire, sur un maillage de résolution de 1 km² et sur la période 1997-2017.

Afin d'avoir une valeur horaire unique dans chaque bassin, nous avons réalisé une moyenne pondérée de l'ensemble de mailles COMEPHORE selon l'emprise du bassin dans chaque maille.

Les trois évènements maximum annuels pour une pluie de durée d'1 heure, 6 heures et 24 heures ont été extrait des séries temporelles. Les valeurs ont été triées par ordre croissant, leur rang étant noté r. La probabilité empirique d'occurrence P est estimée selon la formule :

$$P = \frac{r - 0,5}{n}, \tag{5}$$

où n est le nombre de valeurs de pluies extraites. La période de retour T est estimé par la formulation :

$$T = \frac{1}{\lambda \cdot P}, \tag{6}$$

où λ est le nombre d'occurrences par année. Les analyses de pluies rares sont régulièrement réalisées via des ajustements dits de «Gumbel». Ces ajustements correspondent, quand l'hypothèse est raisonnable, à un ajustement linéaire après changement de variable consistant à transformer la probabilité d'occurrence P en une variable réduite u avec :

$$u = -\ln(-\ln(P)) = -\ln(-\ln(1-\frac{1}{T})). \tag{7}$$

Dans le cas des séries temporelles comprenant un plus grand nombre d'observation que d'années (c.-à.-d. $\lambda > 1$), ici nous avons trois observations par année, une modification de la variable réduite est appliquée suivant le nombre d'observations dans le même intervalle (Mazas, 2019) :

$$u = -\ln(-\ln(1-\frac{1}{T})) + \ln(-\ln(1-\frac{1}{\lambda})). \tag{8}$$

Des ajustement linéaires des valeurs de pluies observées après changement de variable de Gumbel se sont avérés raisonnables afin d'extraire les estimations de valeurs de pluies d'1 heure, 6 heures et 24 heures pour une période de retour de 10 ans ($P1h_{10}$, $P6h_{10}$ et $P24h_{10}$, respectivement). Les séries de données et droites d'ajustement sont illustrées dans des graphiques fournis en Annexe E pour chaque bassin versant.

2.2.11 Classification des bassins versants selon les phénomènes torrentiels

Le type de transport solide dominant d'un torrent peut avoir une influence importante sur le volume de production de sédiment. Par exemple, pour des évènements de période de retour comparables, Mao et collab. (2009) observent des volumes de production de deux à trois ordre de grandeur supérieurs dans les torrent à laves torrentielles par rapport à des torrents à crue avec charriage. Dans cette étude, nous avons classifié les bassins versants selon le type d'écoulement dominant à l'exutoire en se basant sur deux méthodes géomorphologiques développées dans la littérature (Wilford et collab., 2004 ; Bertrand et collab., 2013 ; Church et Jakob, 2020).

La méthode de Bertrand et collab. (2013) permet de définir si le type d'écoulement dominant est la lave torrentielle ou la crue avec charriage. Cette méthode s'appuie sur la compilation d'un jeu de données intercontinental de 620 bassins. Elle est basée sur deux indicateurs qui sont l'indice de Melton et la pente du cône de déjection. L'analyse de ces bassins a permis à Bertrand et collab. (2013) de définir un seuil :

$$S_c = 1,26 \cdot M^{-0,85}, \tag{9}$$

où $S_c < 1,26 \cdot M^{-0,85}$ correspond à des torrents à charriage et $S_c > 1,26 \cdot M^{-0,85}$ correspond à des torrents à laves torrentielles [17].

Les travaux de Wilford et collab. (2004) ont également cherché a discriminer les différents types d'écoulement dans les bassins torrentiels en analysant 65 bassins en Colombie Britannique. Contrairement à Bertrand et collab. (2013), Wilford et collab. (2004) distinguent trois types d'écoulements : les écoulements de type laves torrentielles («*debris flows*» en anglais), de type crues de charriage («*floods*» en anglais) et les écoulements transitionnels de charriage torrentiel (ou charriage hyper-concentré, «*debris floods*» en anglais). Les auteurs ont aussi développé un diagramme de discrimination des types d'écoulement selon deux indicateurs qui sont l'indice de Melton et la longueur du cours d'eau principal.

17. Des méthodes plus sophistiquées ont aussi été proposée par les mêmes auteurs, notamment une fonction logistique qui prédit la probabilité d'être à torrent à laves torrentielles sur la base de ces deux variables. Ceci permet un diagnostic plus fin puisque le résultat est une probabilité plutôt qu'une variable binaire. L'équation de la probabilité d'être un torrent à lave torrentielle s'écrit $P_{LT} = \frac{e^{-0.65} \cdot M^{1.66} \cdot S_C^2}{1+e^{-0.65} \cdot M^{1.66} \cdot S_C^2}$.

Church et Jakob (2020), ont ré-analysé le diagramme de Wilford et collab. (2004) en le complétant avec d'autres jeu de données. Wilford et collab. (2004) proposent des frontières nettes entre les types de torrents : torrent à charriage si $M < 0.3$, torrent à laves torrentielle si $M > 0.6$ *et* $L_{CE} < 2.7$ km, torrent à «*debris flood*» dans la zone intermédiaire. Intentionnellement, Church et Jakob (2020) préfèrent ne pas en donner mais proposent plutôt des zones où la classe est incertaine (Figure 11), soulignant les limites de l'exercice de classification pour certains bassins (par ex. les bassins versants mixtes, ceux où la typologie de processus est influencée par une troisième variable telle que la connectivité sédimentaire, les précipitations ou une absence ou une présence anormalement haute de zone de production, ou ceux pour lesquels il est difficile de distinguer les types d'écoulement). Toutefois, le diagramme permet une première analyse rapide des phénomènes dominants de transport solide, qui doit être complétée par la consultation d'archives historiques et par des observations de terrain (D'Agostino, 2013 ; Kaitna et Hübl, 2012).

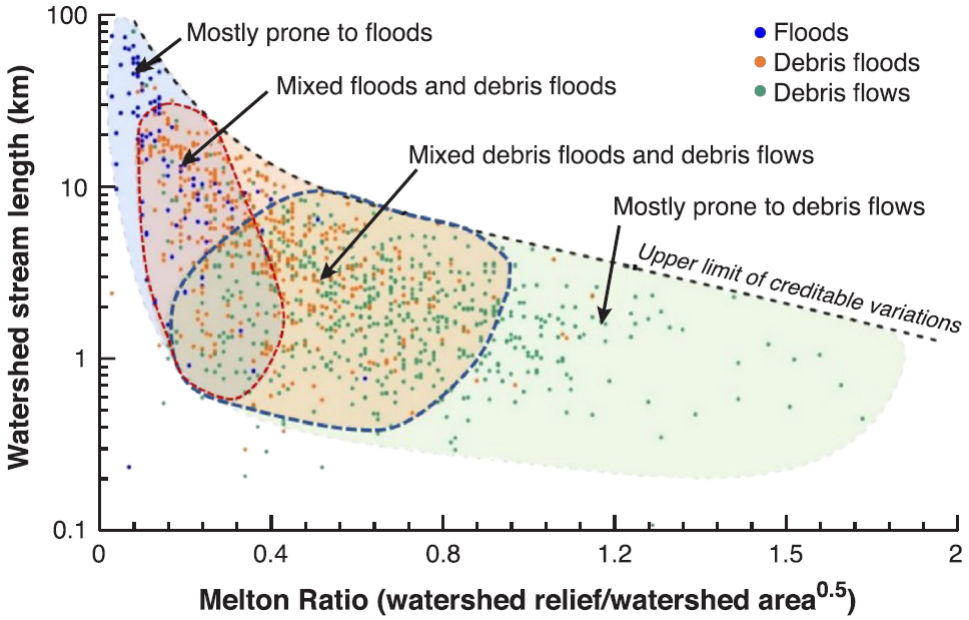


FIGURE 11 – Classification alternative de Church et Jakob (2020) des typologies de torrents illustrant les domaines d'incertitudes où le type de processus ne peut être déterminé seulement via les paramètres de l'indice de Melton et de la longueur du drain principal. Dans ces cas particulièrement, mais aussi de façon générale, c'est le croisement de plusieurs indicateurs cartographiques, de terrain et historiques qui permet de diminuer l'incertitude sur les processus en jeu.

Nous avons classifié les bassins d'études selon les deux méthodes présentées en utilisant le seuil de l'équation (4) pour la méthode de Bertrand et collab. (2013) et en utilisant les intervalles proposés par Wilford et collab. (2004) pour la seconde méthode. La Figure 12 et le Tableau 4 présentent les résultats des classifications selon les deux méthodes. Étonnamment, la classification selon la méthode de Bertrand et collab. (2013) montre que la majorité des bassins sont classés comme des bassins à laves torrentielles. Cela est possiblement lié au fait que la caractérisation de S_C est incertaine (1) à cause de la faible résolution du MNT de notre étude (certaines pentes présentent des irrégularités anormales, cf. Annexe D) (2) et aussi car certains bassins ne possèdent pas de cône de déjection ou alors il est très difficile de le délimiter. Pour ces raisons, nous avons choisi d'utiliser principalement la classification de Wilford et collab. (2004) pour les analyses car la caractérisation de la longueur du cours d'eau est moins incertaine que celle de S_C.

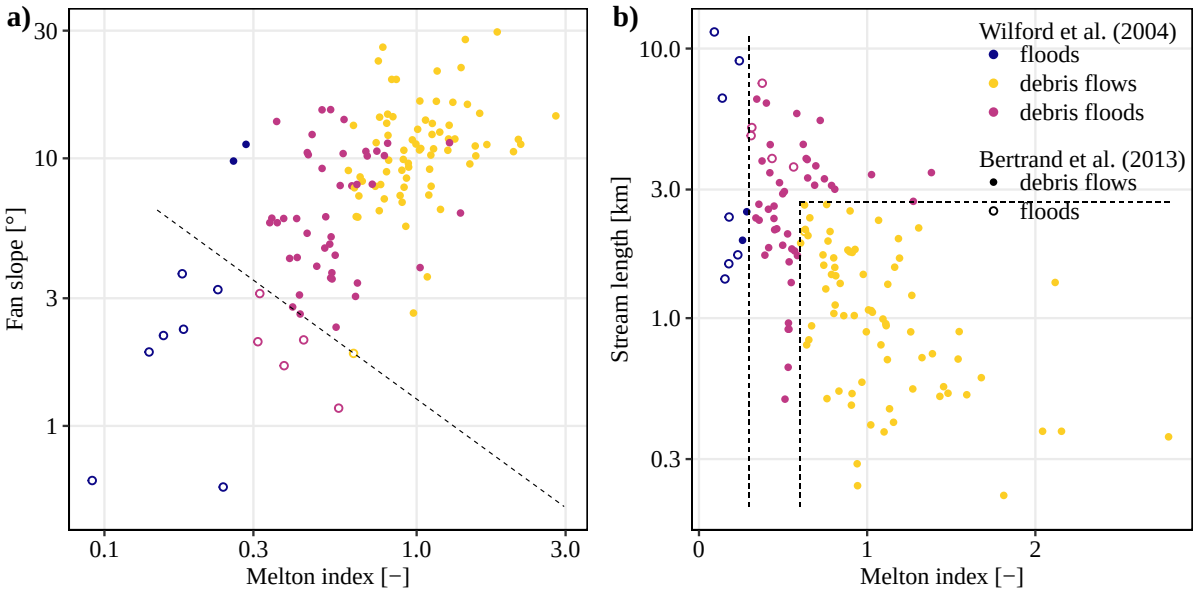


FIGURE 12 – Classifications des bassins versants selon a) la méthode de Bertrand et collab. (2013) et b) de Wilford et collab. (2004). La couleur des points dans les deux graphiques est associée à la typologie identifiée par Wilford et collab. (2004). Les traits discontinus indiquent les limites discriminants les différentes catégories selon les méthodes. On constate que la typologie de Bertrand et collab. (2013) semble en fait cohérente avec celle de Wilford et collab. (2004) à condition de classer à la fois les torrents à «*debris floods*» et les torrents à «*debris flows*» dans la typologie lave torrentielle de Bertrand et collab. (2013).

TABLE 4 – Typologies des bassins versants de l'échantillon (classification de Wilford et collab., 2004).

Typologie de l'écoulement dominant	Laves torrentielles	Charriage torrentiel	Charriage
Terminologie Anglaise	Debris flows	Debris floods	Floods
Echantillon HYDRODEMO	72	40	8

2.2.12 Synthèse des variables explicatives étudiées

Le Tableau 5 rassemble les variables clés estimées dans le cadre du projet et la gamme de variation ainsi que la valeur médiane de l'échantillon complet. La Figure 13 présente une analyse des sous-échantillons rassemblés par gestionnaires. L'ensemble du jeu de données est fourni dans l'Annexe G. On constate que le jeu de données complet correspond à des bassins versants globalement petits ($A_{50\%} \approx 3$ km^2), drainés par des talwegs de faible longueur ($L_{CE,50\%} \approx 1.7$ km), où les pentes sont souvent raides ($S_{CE,50\%} \approx 16$ %). Ces valeurs médianes donnent des indices mais nous avons fait de notre mieux pour intégrer une variabilité aussi large que possible de taux de zone de production ($0 < R_{ZP} < 98$ %) et de tailles de bassins versants torrentiels ($0.06 < A < 78$ km^2) tout en restant dans le territoire du projet.

Table 5 – Tableau de synthèse des variables calculées. (-) indique des variables sans unité.

Variable	Description	Unité	Min.	Médiane	Max.
A	Superficie du bassin versant	km²	0,06	2,7	77,8
$IC50$	Indice de connectivité médian	-	-5,5	-3,2	-1,9
$IC95$	Quantile 95 de l'indice de connectivité	-	-4,8	-2,4	-1,0
ICm	Valeur moyenne de l'indice de connectivité	-	-5,5	-3,1	-1,7
$IC50_{ZP}$	Indice de connectivité médian dans les zones de production	-	-7,2	-3,4	-1,9
$IC95_{ZP}$	Quantile 95 de l'indice de connectivité dans les zones de production	-	-6,0	-2,9	-1,5
ICm_{ZP}	Valeur moyenne de l'indice de connectivité dans les zones de production	-	-7,2	-3,4	-2,0
R_{ICm}	Ratio de de l'IC moyen du bassin hydrologique sur l'IC moyen des zones de production	-	0,79	1,05	1,30
R_{IC95}	Ratio de $IC95_{ZP}$ sur $IC95$	-	0,65	1,24	1,91
M	Indice de Melton	-	0,09	0,77	2,8
L_{CE}	Longueur du drain principal	km	0.22	1.7	11.5
R_{ZP}	Proportion de zones de production dans le bassin versant hydrologique	%	0.1	4	98
IG_{ZP}	Indice géologique des zones production	-	0,5	2,1	4.8
S_{CE}	Pente du cours d'eau au droit de l'exutoire	m/m	0,01	0,16	0,54
S_C	Pente du cône de déjection	m/m	0,01	0,17	0,57
$P1h_{10}$	Pluie de durée d'une heure et de période de retour 10 ans	mm	11	21	31
$P6h_{10}$	Pluie de durée de six heures et de période de retour 10 ans	mm	32	51	75
$P24h_{10}$	Pluie de durée de 24 heures et de période de retour 10 ans	mm	58	81	120

La Figure 13 montre les distributions des paramètres morphométriques principaux selon le gestionnaire de l'ouvrage. On note en premier lieu qu'aucune distribution n'est répartie de manière homogène selon les gestionnaires : les territoires et bassins versants concernés sont variables et ont des histoires différentes. Seuls les ouvrages disposant de suffisamment de données pour permettre au moins une estimation du volume de production sédimentaire annuel V_m sont intégrés dans la figure. La figure montre que les sous-échantillons issus des différents gestionnaires sont assez différents, en particulier :

- La distribution de la taille des bassins versants illustre que les bassins versants domaniaux gérés par le RTM sont généralement plus petits que ceux gérés par les autres gestionnaires (Fig. 13a). Les AS, la métropole de Grenoble et le SM3A, en charge des ouvrages de fond de vallée et donc des bassins versants les plus étendus. La même tendance est visible sur la longueur des drains principaux (Fig. 13b).
- Les surfaces de zones de production sédimentaires sont globalement plus importantes dans les bassins versants du SM3A dans la vallée de Chamonix, suivi par ceux du RTM, des communes puis de la Grenoble-Alpes Métropole et des AS (Fig. 13c).
- Les taux de surface en érosion sont toutefois plus forts dans les bassins versants gérés par le RTM, significativement plus petits que ceux du SM3A. Une certaine part des bassins versants gérés par les AS et la Grenoble-Alpes Métropole ainsi qu'une part de ceux gérés par les communes montrent des taux de surface en érosion marginales (de l'ordre ou inférieure à 1%).
- Les pentes de cours d'eau sont globalement raides à très raides, les sous-échantillons gérés par les communes et par le RTM, ainsi que celui des ouvrages du SM3A sont globalement plus raides que ceux gérés par les AS et par la Grenoble-Alpes Métropole (Fig. 13e).
- Les pentes des cônes de déjection sont par contre souvent plus raide que celles des cours d'eau montrant que les plages de dépôts sont siuées en aval, parfois assez loin, de l'apex du cône de déjection (Fig. 13f).
- Les indices de Melton des bassins versants gérés par le RTM sont les plus forts, en association avec ceux gérés par les communes, par la SFTRF et par le SM3A dans la vallée de Chamonix (Fig. 13g).
- Il en suit que les bassins versants catégorisés comme sujets aux laves torrentielles sont principalement gérés par le RTM, ainsi que plus marginalement par le SM3A et par les communes (Fig. 13h). Au contraire, les bassins versants sujets aux crues de charriage sont plutôt gérés par les AS et la Grenoble-Alpes Métropole.

En comparaison avec l'échantillon déjà analysé par Peteuil et Liébault (2011) dans le cadre du développement de la méthode ECsTREM, les bassins versants ajoutés dans le cadre de HydroDemo ont permis d'étendre la gamme vers des bassins versants un peu plus étendus mais surtout moins touchés par les érosions (Fig. 13i) et globalement moins raides (Fig. 13j).

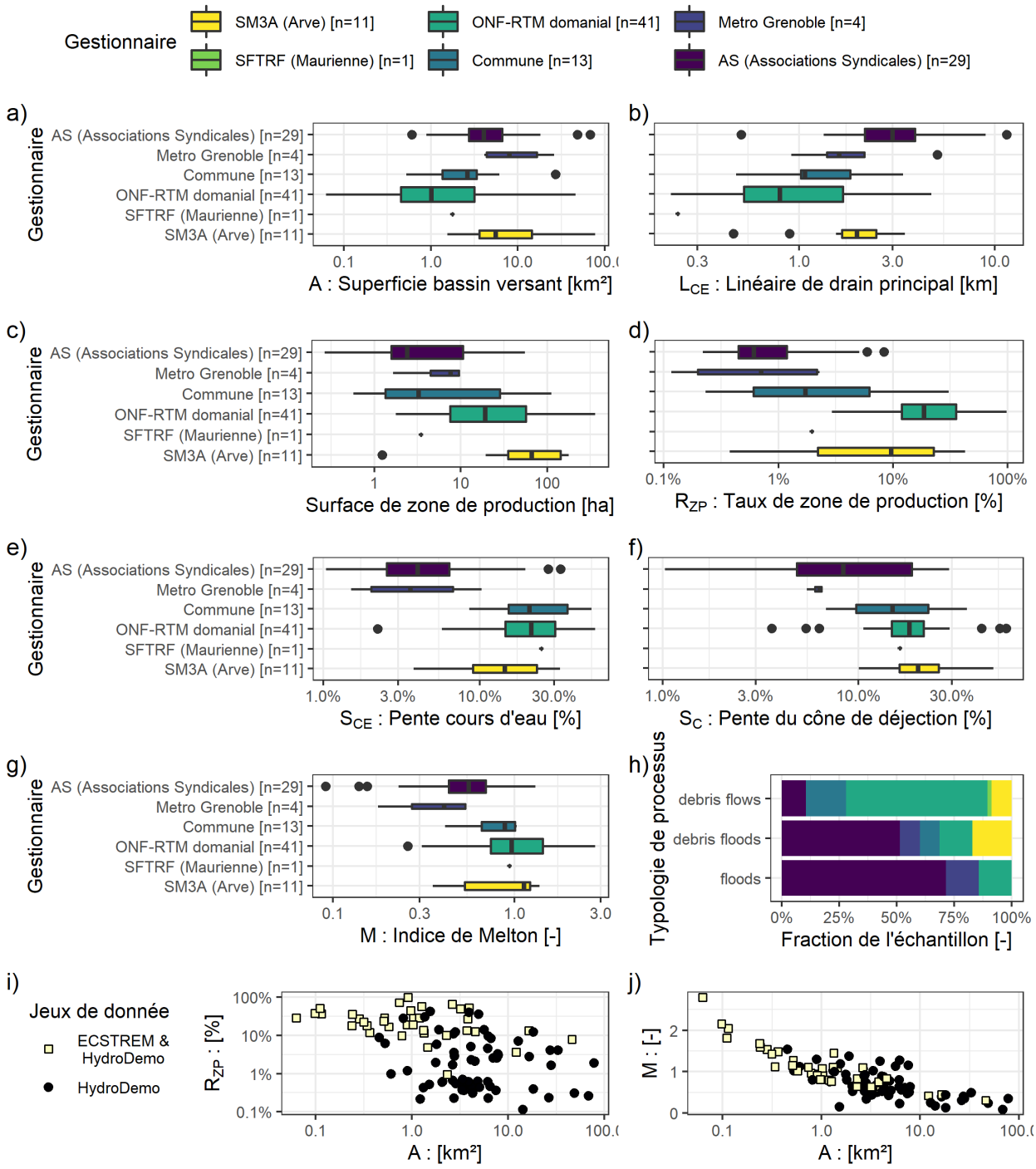


FIGURE 13 – Distributions des paramètres morphométriques principaux des bassins versants étudiés : a) superficie de bassin versant, b) linéaire de drain principal, c) Indice de Melton, d) fraction de l'échantillon classé selon les critères de Wilford et collab. (2004) en torrents à laves torrentielles (”debris flows”), à charriage torrentiel (”debris flood”) ou à charriage (”floods”), e) pente de contrôle du transport solide, f) pente du cône de déjection, g) superficie de zone de production, h) ratio de zone de production, et comparaison entre les sites déjà analysés dans la méthode ECsTREM (Peteuil et Liébault, 2011) et l'extension menée dans HydroDemo : i) comparaison des ratio de zone de production et taille de bassin versant et j) des indices de Melton et taille de bassin versant.

2.3 Méthodes d'estimation des productions sédimentaires des bassins versants

La compilation des données d'apports sédimentaires présentée dans la section 2.1 nous a permis d'établir des séries temporelles pour chaque bassin d'étude (Figure 16). Les graphiques présentant les séries temporelles d'apports sédimentaires de chaque bassin sont dans l'Annexe F sous forme graphique. Les résultats des ajustements sont compilés sous forme de tableau dans l'Annexe G.

La production sédimentaire des bassins versants est fortement corrélée à la taille du bassin versant (Peteuil et Liébault, 2011). Cette corrélation peut masquer d'éventuelles relations des productions sédimentaires avec d'autres caractéristiques morphométriques du bassin versant. Pour cette raison, nous avons choisi d'analyser la production sédimentaire des bassins versants en la normalisant par la taille du bassin versant (i.e. la production sédimentaire spécifique, unité m^3/km^2).

Comme spécifié dans la section 2.1, certains bassins étudiés (bassins d'ordre 2) sont des bassins composés de un ou plusieurs sous-bassins eux-même équipés de plages de dépôt (bassins d'ordre 1). Ce type de configuration peut avoir un impact important sur le transit sédimentaire dans le bassin. La prise en compte de cette configuration dans l'estimation des productions sédimentaires est détaillée dans les sections suivantes.

2.3.1 Estimations des productions solides annuelles moyennes

Les volumes moyens annuels spécifiques ont été estimés en analysant les données d'apports sédimentaires dans une fenêtre temporelle correspondant à la période de suivi des curages (c.-à-d. depuis l'année de la réalisation de la plage de dépôt jusqu'à l'année la plus récente pour laquelle les gestionnaires ont fourni les informations de curage). Il arrive que des événements de la base Évènements-RTM surviennent la même année qu'un curage de la plage de dépôt. En général, le volume estimé de l'évènement est cohérent avec le volume curé dans la plage de dépôt cette année-là (cf. graphiques en Annexe F). Toutefois, il arrive qu'il y ait des différences entre les volumes estimés des évènements et les volumes de curages survenus la même année. Ces différences peuvent être dues aux faits suivants :

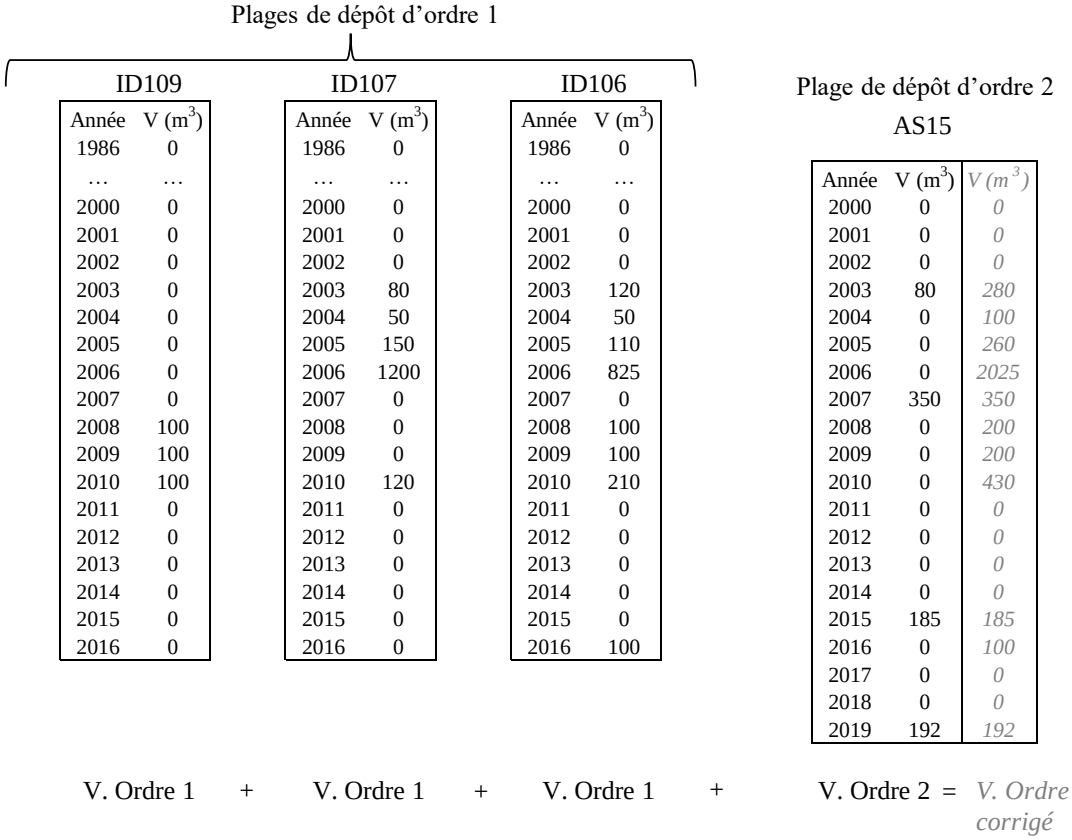
- le volume de l'évènement ne s'est pas déposé uniquement dans la plage de dépôt mais aussi dans le chenal (par conséquent le volume curé dans la plage de dépôt est plus faible que celui enregistré pour l'événement) ;
- selon la capacité de stockage des plages de dépôt, les évènements n'occasionnent pas un curage systématique si les gestionnaires jugent les capacités de stockage encore suffisantes ;
- les interventions des gestionnaires peuvent être retardées (par ex. à cause de la difficulté d'accessibilité de l'ouvrage, à cause de la durée des procédures administratives pour l'autorisation de curage ou par manque des fonds nécessaires au financement de l'opération) et les curages peuvent être partiels, avoir lieu l'année suivante ou plus tard.

Nous avons réalisé l'estimation de la production annuelle V_m en prenant en considération les volumes d'évènements et de curages (données des gestionnaires de l'ouvrage et des Évènements-RTM). Dans le cas où un curage et un évènement, avec volume connu, ont lieu la même année, le volume le plus important est choisi. Cette estimation permet d'estimer la production du bassin versant de façon sécuritaire.

Dans le cas des bassins d'ordre 2, la production annuelle moyenne a été estimée en sommant les curages réalisés dans l'ensemble des plages de dépôt du bassin versant (Figure 14).

Nous avons recensé 20 plages de dépôt pour lesquels les registres de suivi des curages indiquent la réalisation d'une seule opération de curage durant la période de suivi de l'ouvrage. Estimer une

moyenne sur une seule valeur non nulle est quelque peu douteux. Nous avons choisi de les écarter du jeu de données pour l'estimation de V_m. Au total, nous avons retenu les estimations de V_m sur 100 bassins versants, celles-ci sont renseignées dans l'Annexe F.



Année	V (m^3)
1986	0
…	…
2000	0
2001	0
2002	0
2003	0
2004	0
2005	0
2006	0
2007	0
2008	100
2009	100
2010	100
2011	0
2012	0
2013	0
2014	0
2015	0
2016	0

Année	V (m^3)
1986	0
…	…
2000	0
2001	0
2002	0
2003	80
2004	50
2005	150
2006	1200
2007	0
2008	0
2009	0
2010	120
2011	0
2012	0
2013	0
2014	0
2015	0
2016	0

Année	V (m^3)
1986	0
…	…
2000	0
2001	0
2002	0
2003	120
2004	50
2005	110
2006	825
2007	0
2008	100
2009	100
2010	210
2011	0
2012	0
2013	0
2014	0
2015	0
2016	100

Année	V (m^3)	*V (m^3)*
2000	0	*0*
2001	0	*0*
2002	0	*0*
2003	80	*280*
2004	0	*100*
2005	0	*260*
2006	0	*2025*
2007	350	*350*
2008	0	*200*
2009	0	*200*
2010	0	*430*
2011	0	*0*
2012	0	*0*
2013	0	*0*
2014	0	*0*
2015	185	*185*
2016	0	*100*
2017	0	*0*
2018	0	*0*
2019	192	*192*

FIGURE 14 – Schéma présentant l'estimation des volumes d'apport sédimentaire pour les bassins d'ordre 2. Exemple ici de la plage de dépôt du torrent de Jaillieres à Meylan (AS15) en amont duquel se trouvent les plages de dépôt du torrent de la Ruine (ID109) et des torrents de Bizenon (ID107 et ID106).

2.3.2 Estimations des productions solides événementielles décennales et de référence

Pour l'estimation des volumes décennaux et de référence, nous avons pris en considération les données de curage et des Évènements-RTM et gardé les valeurs maximums comme pour les volumes moyens annuels lorsque des années présentaient des différences (cf. § 2.3.1). En raison de la durée relativement réduite des chroniques exploitées et du faible nombre d'observations (il n'y a pas d'apport solide significatif chaque année), l'estimation d'un volume de production pour une période de retour donnée est sujette à incertitudes. Ces incertitudes peuvent être particulièrement importantes si on cherche à estimer un volume de production pour une période de retour beaucoup plus longue que la durée des observations, par exemple centennale. La Figure 15 montre que 75 % des bassins versants étudiés présentent moins de dix observations non-nulles dans leurs chroniques. Par ailleurs, les chroniques dépassent rarement 40 années de suivi (Figure 3).

Deux types d'estimations de production solide événementielle ont été réalisées :

— **Le volume solide décennal** a été interpolé au sein de la série de données puisque les observations dépassaient 10 ans de mesures sur tous les sites retenus à cette étape ;

— **Le volume solide de référence** a été estimé suivant les règles en vigueur en France [18] : *"L'aléa de référence est déterminé à partir de l'événement le plus important connu et documenté ou d'un événement théorique de fréquence centennale, si ce dernier est plus important."* (Graszk et collab., 1997, p. 63).

En d'autres termes nous avons extrait les volumes de période de retour décennal V_{10} et centennal V_{100} par ajustement d'une loi Exponentielle ou d'une loi de Pareto Généralisée (dites «GPD», voir paragraphes suivants sur le critère de choix entre les deux options). Si l'évènement maximal connu était supérieur à V_{100}, le maximum connu était retenu pour estimer V_{ref} ; le cas échéant V_{100} était utilisé pour estimer V_{ref}.

Nous avons distingué deux cas pour l'estimation des productions événementielles dans les bassins versants d'ordre 2 (c.-à-d. où plusieurs plages de dépôts sont présentes en séries) :

— Lorsque les types d'écoulements dominants (considéré sur la base de classification de Wilford et collab. (2004), cf. § 2.2.11) sont les mêmes pour les bassins d'ordre 1 et d'ordre 2, par exemple dans les cas où les laves torrentielles produites dans les bassins amont pourraient transiter jusqu'à l'aval en l'absence d'ouvrages intermédiaires : nous avons fait l'hypothèse que la production sédimentaire caractérisant le bassin d'ordre 2 est la somme de la production sédimentaire stoppée par les ouvrages amont et de celle recueillie par la plage de dépôt aval (même hypothèse que pour le volume moyen annuel). Nous avons donc pris comme volume exporté pour le bassin d'ordre 2 le cumul des volumes curés dans la ou les plages de dépôt en amont et aval (Figure 14). Ceci revient à faire l'hypothèse que si la ou les plages de dépôt situées sur les branches amont n'existaient pas, le volume qui y a été curé aurait transité jusqu'à l'ouvrage aval.
— Lorsque les types d'écoulement dominants sont différents entre le ou les bassins versants d'ordre 1 et le bassin versant d'ordre 2, l'hypothèse du transfert des matériaux devenait douteuse. Autrement dit, les laves torrentielles produites dans la partie amont, même en l'absence de plage de dépôt à l'amont, se seraient probablement partiellement arrêtées avant d'atteindre la plage de dépôt aval, notamment à cause de la diminution de la pente. A l'occasion d'une étude détaillée d'un bassin versant, cette hypothèse peut être étudiée puis retenue ou écartée. Nous n'avions pas les moyens temporels pour éclaircir ce point sur les quatre bassins versants [19] où cette situation a été rencontrée. Ces derniers ont été écartés du jeu de données visant à estimer les volumes événementiels.

L'utilisation de lois Exponentielle ou GPD relève de la statistique des extrêmes, une branche à part entière de la statistique qui s'intéresse aux valeurs exceptionnellement grandes ou petites (Coles, 2001). Les ajustements Exponentiels sont à deux paramètres tandis que les GPD ont trois paramètres. Les ajustements ont été réalisés avec le logiciel R en utilisant le package «extRemes».

L'échantillon a été séparé en trois sous-échantillons selon n le nombre d'observations non nulles et uniques (Figure 15) :

— Si $n < 5$ (50% de l'échantillon), on se refuse à réaliser une extrapolation. Ces bassins versants ne sont donc pas utilisés pour estimer V_{10} et V_{ref} ;
— Si $5 \leq n < 10$ (25% de l'échantillon), V_{10} et V_{100} sont estimés via un ajustement Exponentiel ;
— Si $10 \geq n$ (25% de l'échantillon), V_{10} et V_{100} sont estimés via un ajustement GPD.

Il a semblé douteux d'extrapoler jusqu'à la centennale une loi à deux paramètres calée sur moins de cinq observations. Dans le même esprit, nous n'avons utilisé de lois GPD à trois paramètres que si au moins

18. Règles fixées par la Circulaire du 24 janvier 1994 relative à la prévention des inondations et à la gestion des zones inondables, *JORF n°84 du 10 avril 1994*, accessible au lien suivant `https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000000181446`

19. ID74 - Craponoz, AS3 - Manival Aval, AS9 - Corbonne, AS8 - Gamond aval, AS15 - Jaillières aval

dix valeurs non-nulles permettaient de calibrer cette dernière. Le cas échéant, les lois GPD peuvent adopter un concavité ou une convexité forte ce qui aboutie à une augmentation très significative des valeurs extrêmes (ou à une diminution pour des convexités fortes). La mobilisation de lois GPD a été justifiée par l'observation de concavités et convexités dans les distributions de certains bassins versants où les données étaient suffisamment nombreuses pour que cette caractéristique apparaisse clairement. Sur ces sites, les analyses fréquentielles préalables ont montré que les distributions des volumes produits par les bassins ne suivaient pas systématiquement une distribution Exponentielle (cassure ou changement de régime dans les données ; cf. Annexe F).

Au final, nous avons réalisé une estimation de V_{10} et V_{ref} pour respectivement 70 bassins versants. Les valeurs des estimations et l'ajustement associé sont présentés dans l'Annexe F.

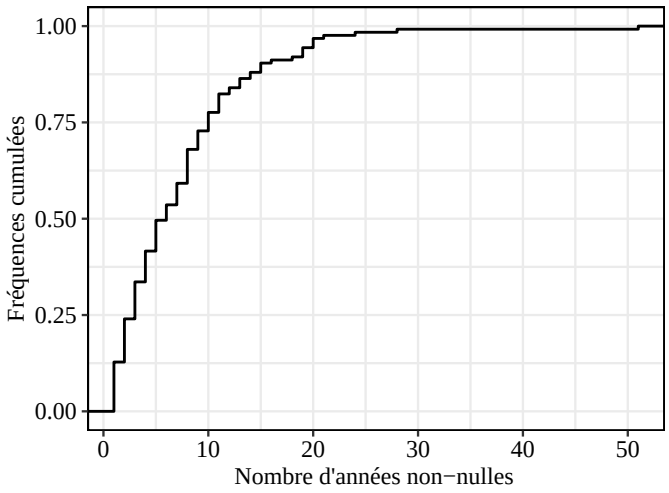


FIGURE 15 – Courbe cumulative des fréquences d'années non-nulles : 50% de l'échantillon comprend moins de 5 observations non-nulles, 25% entre 5 et 10 valeurs et 25% plus de 10 valeurs.

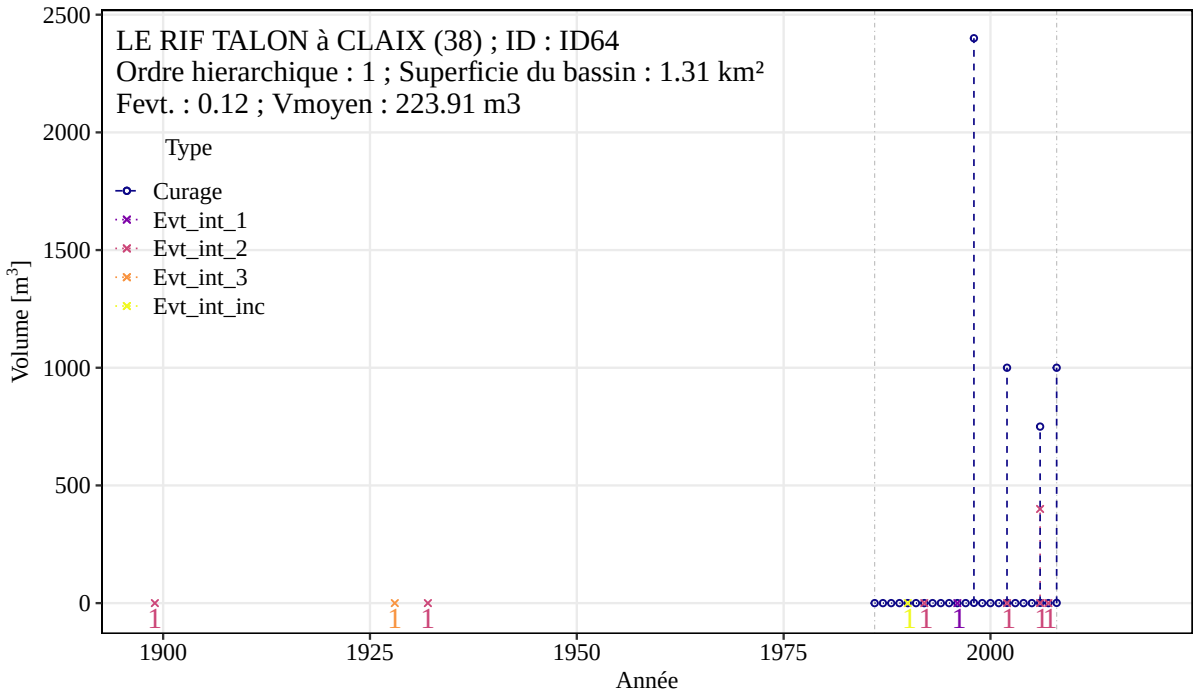


FIGURE 16 – Exemple de série temporelle d'apport solide reconstituée : cas du bassin du Rif Talon (n=4 valeurs non nulles donc on estime le volume annuel moyen mais aucun ajustement Exponentiel ou GPD n'est proposé). Le graphique représente les quantités de volume d'apport solide et les années d'occurrence des ces apports. Les types de points et de traits différencient le type de données d'apport (c.-à-d. données de curage ou évènement-RTM). La couleur des points et des traits informe de l'intensité associée à l'évènement («Evt_int_1», «Evt_int_2», «Evt_int_3», «Evt_int_inc» = Évènement-RTM d'intensité 1, 2, 3 et inconnue, respectivement). Le numéro en dessous indique le nombre d'évènement observé dans la même année. Les deux traits verticaux discontinus en gris délimitent la période de suivi de la plage de dépôt.

2.3.3 Caractérisation de la fréquence d'occurrence annuelle des évènements

Cette partie est plus exploratoire et n'était pas prévue initialement au projet. Elle explore le potentiel de la BD-RTM pour aider à prédire une prédisposition à générer des crues torrentielles (quel que soit leur volume solide associé mais de magnitude suffisamment importante pour générer des dommages et donc la rédaction d'une fiche évènement). En ce sens, cette exploration est complémentaire des travaux menés dans l'Action 2 d'HYDRODEMO qui vise à tester le potentiel des variables météorologiques pour anticiper l'occurrence de crues torrentielles ainsi que ceux de l'Action 4 d'HYDRODEMO qui teste la capacité des modèles hydrologiques à reproduire des crues fortes aux dates référencées comme des crues fortes d'après les fiches évènements de la BD-RTM. Tandis que l'ensemble du projet HYDRODEMO vise plutôt à mieux prédire l'aléa torrentiel, ces analyses portent plutôt sur les risques torrentiels puisque les fiches sont associées à des crues ayant causé des dommages (sur des enjeux ou sur des ouvrages de protection).

La fréquence des évènements F_{evt} a été estimée pour l'ensemble des bassins sur lesquels des évènements ont été inventoriés dans la BD-RTM. Pour ces bassins, nous avons estimé la fréquence d'occurrence d'évènement par année c'est-à-dire le nombre d'années sur la période d'observation où *au moins un* évènement torrentiel a justifié la rédaction d'une fiche évènement dans la BD-RTM. En d'autres termes, nous avons essayé de caractériser la tendance des bassins à produire au moins un évènement par année. Pour l'estimation de F_{evt}, nous avons pris en considération toutes les Évènements-RTM inventoriés comme crues torrentielles, sans faire de distinction sur la base de l'intensité de l'évènement.

L'estimation de F_{evt} est également sujette à caution. En effet, les Évènements-RTM n'ont pas été renseignés de manière parfaitement homogène dans l'espace (sur l'ensemble des bassins des Alpes du Nord) et dans le temps (la magnitude des évènements justifiant la rédaction d'une fiche évènement peut avoir varié en fonction de l'opérateur et en fonction de la vulnérabilité du territoire). La création d'une fiche Évènement-RTM est directement liée aux enjeux et aux dégâts occasionnés par l'évènement dans le bassin versant. Par exemple, un évènement de faible intensité dans un bassin versant avec de faibles enjeux ne fera pas systématiquement l'objet d'une fiche Évènement-RTM. Par ailleurs, les bassins versants ont été documentés de manière hétérogène selon les équipes des services ONF-RTM et selon les périodes. De plus, plusieurs Évènements-RTM n'ont pas d'informations quant à l'intensité de l'évènement, ce qui ajoute ainsi de l'incertitude sur ce dernier et ne permet pas de filtrer seulement les évènements d'intensités fortes pour nos analyses. La période retenue pour la constitution de l'échantillon est entre 1970 et 2019 (les périodes plus anciennes ont été jugées arbitrairement potentiellement lacunaires). En réalité, certains bassins présentent des informations fiables et exhaustives depuis le lancement de la politique de RTM en 1860. Mais ce point doit être vérifié dans chaque bassin versant. A l'échelle de travail du projet HYDRODEMO, nous présumons que les événements sont renseignés de manière homogène dans les Alpes du Nord seulement depuis les années 1970.

La Figure 17 compile ces données de fréquence d'occurrence sur l'ensemble de l'échantillon d'étude. En premier lieu, on note que F_{evt} varie sur deux ordres de grandeur : certains bassins versants extrêmement actifs subissent des évènements torrentiels tous les 3-5 ans. Tandis qu'on ne relève même pas un évènement par siècle dans d'autres bassins versants. L'échantillon semble relativement bien réparti entre ces deux tendances extrêmes.

La transparence de chaque pixel est relative à la fréquence de connaissance de l'intensité des évènements (plus transparent = intensité mieux connue). On constate que de nombreux pixels ne sont pas ou peu transparents : l'intensité est souvent non renseignée. La couleur s'assombrit quand les évènements sont d'intensité forte (>1) ou inconnu. La couleur aussi varie beaucoup ce qui montre que sur certains bassins versants la fréquence d'évènements d'intensité forte ou inconnue varie beaucoup dans

l'échantillon. La fréquence assez forte d'évènements d'intensité inconnue et la potentielle hétérogénéité dans la façon dont était qualifiée l'intensité nous a incité à ne pas tenter de sous-échantillonnage pour ne garder que les évènements forts. L'analyse de F_{evt} porte donc sur tous les évènements torrentiels justifiant l'édition d'une fiche évènement.

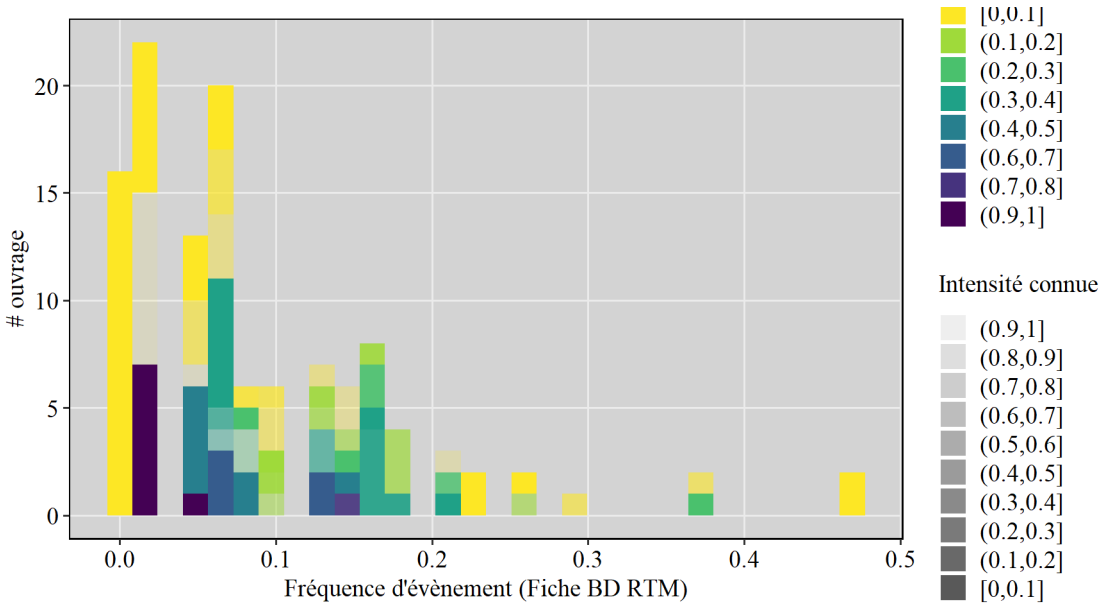


FIGURE 17 – Distribution des fréquences d'occurrence d'évènement par année. Le code de couleurs indique pour chaque ouvrage la proportion d'évènements d'intensité inconnue ou supérieure à 1. Le code de transparence indique pour chaque ouvrage la proportion d'évènements d'intensité inconnue par rapport aux évènements totaux.

2.4 Régionalisation

Deux méthodes ont été mobilisées pour régionaliser les prédictions de transport solides :

— La méthode de type *random forests*, plus sophistiquée et fournissant des nombreux résultats intermédiaires et notamment l'importance des variables.

— Des régressions en lois puissances basées sur quelques paramètres, plus simples à utiliser en contexte opérationnel.

2.4.1 Les *random forests*

La méthode des *random forests* (forêts aléatoires) est une technique introduite récemment par Breiman (2001). Cette méthode se base sur l'agrégation d'un ensemble d'arbres de classification et de régression obtenus par la méthode CART (*Classification And Regression Trees*). Chaque arbre est construit avec un sous-échantillon du jeu de données originel tiré au hasard (*bootstrap sample*). La taille du sous-échantillon est d'environ deux tiers des observations du jeu de donnée originel et les observations restantes sont appelées les observations «*out-of-bag*». De la variabilité aléatoire est également ajouté au niveau des variables explicatives qui interviennent dans la construction des arbres. Un petit nombre d'entre elles est sélectionné successivement durant les étapes de construction des arbres. Une fois construit chaque arbre va chercher à prédire les observations *out-of-bag*. La prédiction finale est basée sur la moyenne des prédictions de tous les arbres (c'est-à-dire de plusieurs modèles). L'erreur de prédiction « *out-of-bag error* » des *random forests* est ensuite mesurée pour avoir une estimation de la performance prédictive du modèle global. Cette mesure est l'erreur moyenne calculée, à chaque arbre, sur les observations *out-of-bag*.

La méthode des *random forests* peut être utilisée sur des variables à prédire de type qualitative ou quantitative. Dans notre cas où les variables à prédire sont quantitatives, il s'agit d'arbres de régression. Par ailleurs, la méthode des *random forests* ne requiert pas d'hypothèse particulière quant à la distribution des variables explicatives, ni au type de celles-ci (quantitatives ou qualitatives) et traite automatiquement des interactions fortement non linéaires entre les variables ainsi que les variables corrélées.

Les analyses de *random forests* ont été réalisées avec le logiciel R en utilisant la fonction «*randomForest*» du package du même nom. Dans un intérêt de parcimonie dans le nombre de variables explicatives des modèles, la méthode de sélection de variables VSURF du package VSURF (Genuer et collab., 2015) a été utilisée. Cette méthode utilise une approche itérative basée sur l'importance des variables explicatives qui sélectionne un sous-ensemble de variables explicatives suffisant pour bien prédire la variable à expliquer. Cette méthode a été appliquée pour les quatre variables à expliquer, ce qui a permis l'identification automatique d'un nombre réduit (entre 3 et 5) de variables explicatives les plus importantes, qui ont ensuite été utilisées pour produire les modèles. On notera que l'utilisation de la méthode des *random forests* ne génèrent pas d'équation de prédiction mais un objet statistique complexe qui nécessite l'utilisation d'un logiciel statistique tel que R pour être appliqué. Afin de faciliter l'application de méthodes d'estimations plus simples, des régressions sous forme de lois puissances ont aussi été produites. L'analyse par *random forests* a permis de pré-sélectionner les variables retenues pour ces lois de puissances.

2.4.2 Lois de puissances

Les techniques de régression telles que la régression linéaire ou en lois puissances sont couramment utilisée en géoscience dans des application d'ingénierie. Plusieurs équations, généralement sous forme de lois de puissances et avec peu de variables explicatives, ont ainsi déjà été proposées dans littérature (par exemple, Rickenmann et Zimmermann, 1993 ; Peteuil et Liébault, 2011 ; Altmann et collab., 2021), et présentent l'avantage d'être facilement applicables pour des visées opérationnelles. En complément aux approches de type *random forests*, nous avons donc également développé des modèles de régressions simples ou multiples. Nous nous sommes basés sur les sélections de variables explicatives proposées par VSURF pour le choix des variables à considérer.

Il est important de noter que la possibilité de recombiner des paramètres afin d'orthogonaliser ces derniers n'a pas été exploré . En effet, les paramètres morphométriques (superficie de bassin versant, pente, Melton, connectivité sédimentaire et ratio de zone de production) sont légèrement à fortement corrélés. Des analyses en composantes principales et des méthodes statistiques plus sophistiquées auraient permis de déterminer des combinaisons de paramètres dé-corrélées qu'il aurait été possible de combiner pour affiner les formules empiriques. Ceci constitue un perspective d'extension des résultats du projet.

2.4.3 Évaluation des performances des modèles

Afin d'évaluer la performance des différents modèles, nous avons dans un premier temps effectué une procédure de validation croisée «*leave-one-out*» (LOO) en laissant de côté chaque observation à tour de rôle, en ajustant un modèle avec toutes les données restantes, puis en prédisant la valeur de l'observation laissée de côté. Cette procédure permet d'évaluer la performance du modèle de manière indépendante. Cette procédure a été appliquée pour les modèles de régressions et les *random forests*.

Nous avons quantifié les performances de prédiction de nos modèles en utilisant trois mesures de performance. Le coefficient de détermination (R2) décrit la proportion de la variance des données mesurées expliquée par le modèle. Les valeurs de R2 varient entre 0 et 1. Des valeurs de R2 plus proches de 1 indiquent une meilleure correspondance entre les valeurs observées et les valeurs prédites. Le pourcentage de biais (pbias) mesure la tendance moyenne des données simulées à être sur-estimées (pbias<0 %) ou sous-estimées (pbias>0 %) par rapport à leurs homologues observées.

Comme indice d'erreur, nous avons utilisé le rapport RMSE-écart type des observations (RSR) qui standardise l'erreur quadratique moyenne (RMSE) en utilisant l'écart type des observations. Des valeurs RSR plus faibles indiquent une meilleure performance du modèle, zéro indiquant une correspondance parfaite entre les estimations et les observations. Voir Moriasi et collab. (2007) pour plus d'informations à propos des calculs des paramètres et de leurs complémentarités.

La précision des modèles a également été évaluée à partir des ratios de la valeur absolue prédite (i.e. exprimé en m^3 et non en volume spécifique exprimé en m^3/km^2) divisé par la valeur absolue observée. On a mesuré la proportion de ces ratios qui se trouve dans les intervalles $[2/3; 3/2]$; $[1/2; 2]$ et $[1/5; 5]$. Si les scores de tels indicateurs sont par exemple de 30 %, 50 % et 85 %, cela signifie que, en moyenne, on a 30 % de chance que la valeur réelle soit dans la gamme valeur prédite $\times$ $[2/3; 3/2]$, 50 % d'être dans la gamme $[1/2; 2]$, etc. Ces indicateurs démontrent qu'il faut rester prudent quand à l'interprétation des méthodes de prédiction dont l'objectif est, au mieux, de tenter de fournir un ordre de grandeur.

3 Résultats

3.1 Analyse des coûts de curages

L'inventaire décrit dans la section 2.1 a été l'occasion de recueillir des données sur les coûts de curages de plages de dépôt. Nous avons pu recueillir 364 données de coûts de curages réalisés sur 86 plages de dépôt différentes gérées par l'ONF-RTM ou le SM3A. Parmi ces ouvrages (particulièrement les ouvrages gérés par le SM3A), une grande partie n'ont pas été inclus dans les analyses de production sédimentaire car ne possédant pas d'informations de suivi suffisamment longues.

La Figure 18a montre que le coût de l'opération de curage rapporté au volume (en €/m^3) est fortement lié au volume qui est curé. Pour les volumes faibles (c.-à-d. < 1000 m^3), les coûts de curages peuvent être importants et sont davantage conditionnés par les coûts fixes d'installation de chantier (notamment liés à l'acheminement des engins de terrassement sur site) que par le volume réel à curer.

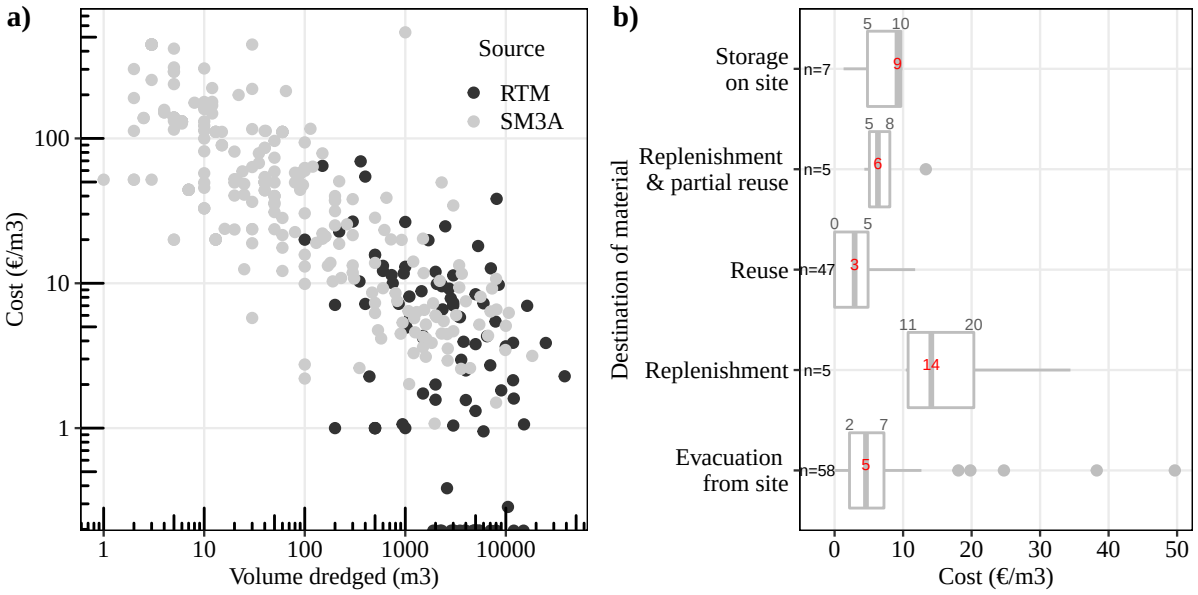


FIGURE 18 – a) Variabilité des coûts de curage en fonction du volume de curage et selon le gestionnaire des plages de dépôt pour n = 364 opérations de curage. b) Variabilité des coûts de curage en fonction de la destination des matériaux pour n = 122 opérations de curage avec un volume curé > 1000 m³. La marque centrale et le chiffre rouge dans la boxplot indiquent la médiane, et les bords gauche et droit ainsi que les chiffres gris indiquent respectivement les 25^e et 75^e centiles.

La Figure 18b présente les opérations de curages d'un volume supérieur à 1000 m³ et montre que pour ce type d'opération, la destination du matériau curé joue un rôle clé sur les coûts de curage. L'opération la plus coûteuse (valeur médiane de 14 €/m³) consiste à réinjecter les sédiments dans le cours d'eau en aval de l'ouvrage afin de maintenir l'état de qualité de la rivière, bien que nous ne disposions que de cinq données. À l'inverse, lorsque ces opérations de réinjections ne peuvent être réalisées et que les sédiments piégés sont de qualité suffisante pour être revalorisés à des fins de construction, le curage est beaucoup moins cher (valeur médiane de 3 €/m³). Dans certains cas, les curages sont réalisés gratuitement ou même contre paiement pour les matériaux de très bonne qualité (ces cas ont été considérés comme exceptionnels et n'ont pas été pris en considération). L'évacuation, la ré-injection partielle ou le stockage sur site se situent entre ces deux cas extrêmes. Il est à noter qu'un large échantillon de données n'est disponible que pour le matériel qui a été réutilisé ou évacué.

La variabilité du coût du curage peut s'expliquer par exemple par le coût exceptionnellement élevé de l'acheminement des engins de terrassement sur des sites éloignés, la facilité variable du curage du matériau (les matériaux granulaires sont plus faciles à curer que les matériaux boueux), la distance sur laquelle le matériau doit être transporté sur des pistes d'accès de qualité très variable ou la nécessité d'ouvrir de nouvelles pistes d'accès sur des sites rarement curés.

3.2 Analyse des capacités de stockage des ouvrages

L'inventaire des plages de dépôt nous a aussi permis de collecter les données relatives aux capacités de stockage de matériaux pour une grande partie des ouvrages (99 ouvrages). Ce volume théorique était fourni à titre indicatif par l'opérateur en charge de remplir la fiche descriptive de l'ouvrage dans la base de données "Ouvrages du RTM". Pour 25 ouvrages, ces informations n'ont pas pu être collectées (il s'agit d'ouvrages gérés par les AS, les communes et le SM3A principalement). La Figure 19 montre la relation entre la capacité de stockage des ouvrages et les volumes qui y sont curés. L'analyse de ces données nous a permis d'identifier des incohérences dans les estimations des capacités de certains ouvrages. En effet, pour certains ouvrages, les volumes des curages excédaient souvent le volume de capacité théorique de l'ouvrage. L'incertitude du volume de stockage des ouvrages peut être expliquée par l'estimation parfois approximative de celle-ci selon la pente de dépôt considérée. Lorsque plus de 75 % des curages ont un volume supérieur au volume théorique de la plage de dépôt, nous avons considéré que le volume de la plage de dépôt est égal au volume maximum de curage.

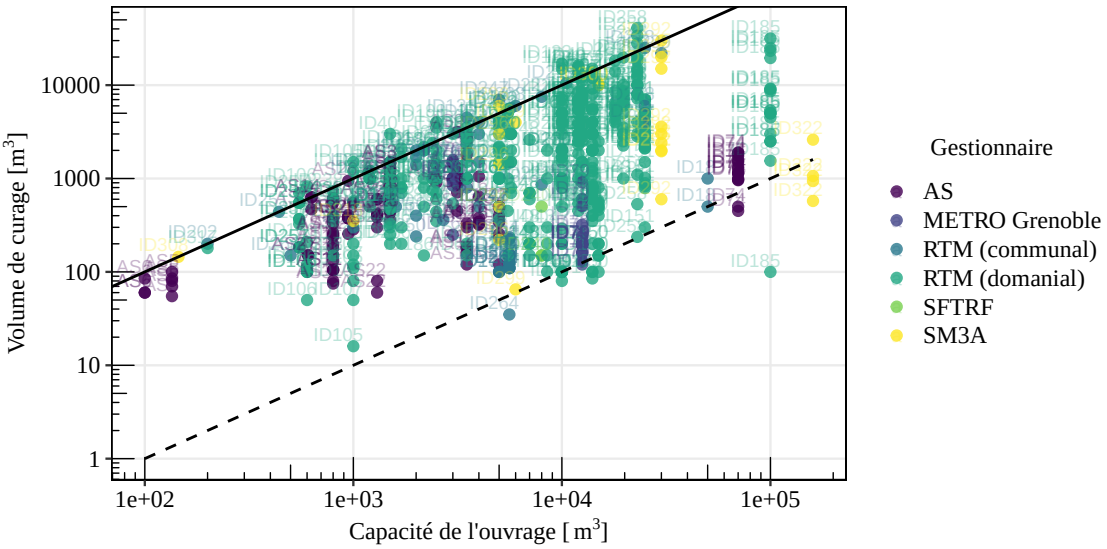


FIGURE 19 – Relation entre les volumes de curage et les volumes de stockage des plages de dépôts (n = 627 curages). Le trait plein représente x = y. Le trait discontinu représente le ratio de volume curé égal à 1 % de la capacité de l'ouvrage qui est dépassée pour 90 % des ouvrages.

L'analyse du rapport entre les volumes de curage et la capacité de stockage des ouvrages nous a permis d'étudier le seuil de remplissage de l'ouvrage qui déclencherait une opération de curage par les gestionnaires. La Figure 19 montre le volume de curage en fonction du volume de l'ouvrage. Deux lectures sont possibles : en absolu on relève que les curages de moins de 100 m^3 sont rares et que 90 % des curages sont supérieurs à 150 m^3. Le seuil de déclenchement du curage est toutefois vraisemblablement dépendant de la capacité de l'ouvrage. Dans 90% des curages, le ratio du volume curé divisé par la capacité de l'ouvrage est supérieur ou égal à 1 %. Ce qui signifie que 1 curage sur 10 vise tout de même à curer moins de 1 % du volume de l'ouvrage.

3.3 Variabilité des paramètres descripteurs principaux

La Figure 20 montre les corrélations entre les différentes variables explicatives du jeu de données (cf. Tableau 5). Pour des raisons de lisibilité, les variables $IC50$, $IC50_{ZP}$, $P1h_{10}$ et $P6h_{10}$ ne sont pas présentées dans la Figure 20 ; $IC50$ et $IC50_{ZP}$ sont très corrélés à $IC95$ et $IC95_{ZP}$ respectivement, $P1h_{10}$ et $P6h_{10}$ sont tous deux très corrélées à $P24h_{10}$.

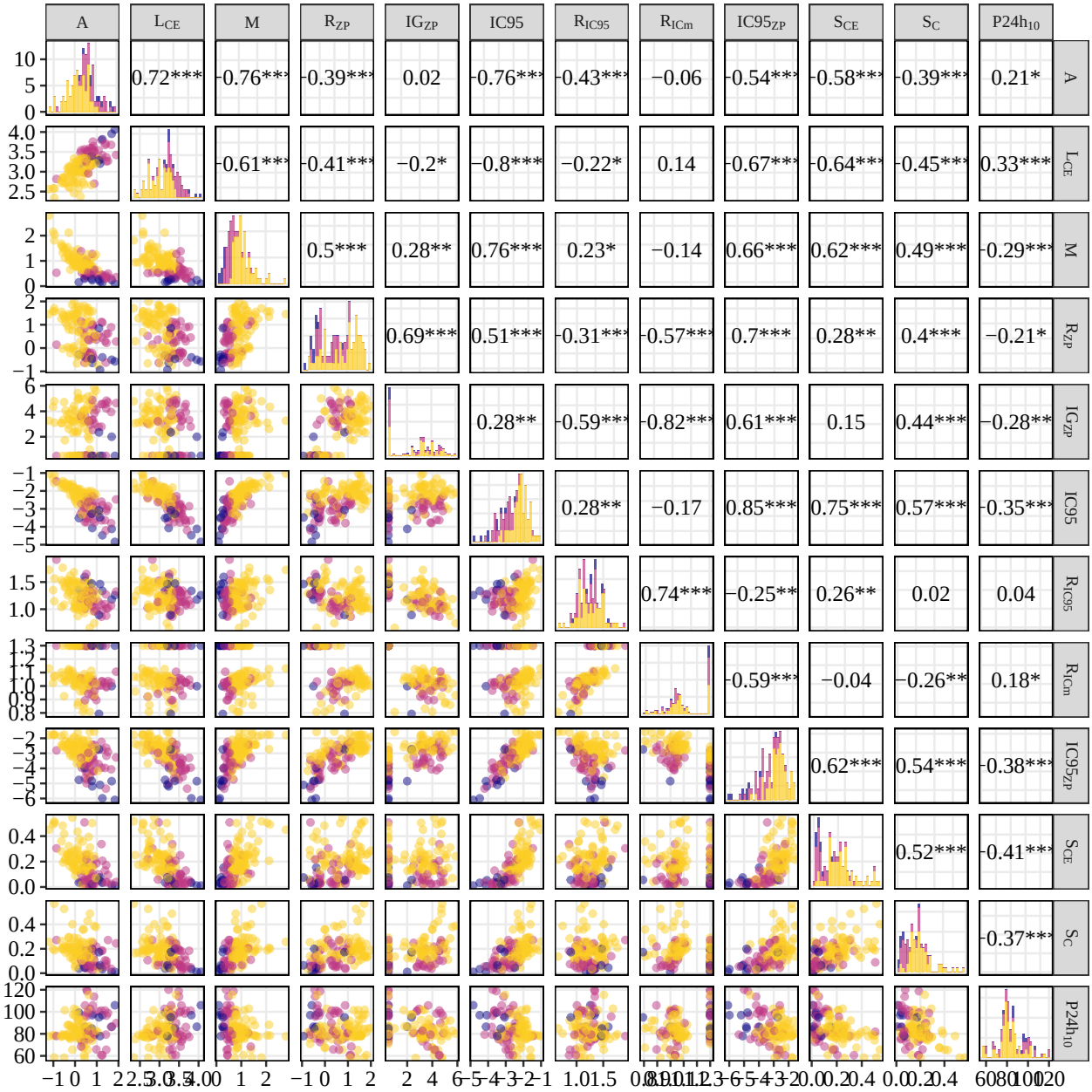


FIGURE 20 – Matrice de diagramme de dispersion par paires, distributions et coefficients de corrélation de Pearson pour les principales variables explicatives (n = 120 bassins). Les cases inférieures présentent les diagrammes de dispersion par paire, les cases diagonales présentent la distribution et les cases supérieures donnent les coefficients de corrélation de Pearson entre les variables. Les couleurs représentent les différentes typologies de phénomène de transport solide dominant selon la classification de Wilford et collab. (2004) : jaune = *debris flow*, rose = *debris flood* et violet = *bedload*. Les valeurs des variables A, L_{CE} et R_{ZP} sont en logarithme (base 10).

On observe une corrélation importante entre l'indice de Melton M et les différents indices de connectivité, ce qui est rassurant : les deux indices dépendent principalement de la pente et de la surface drainée. L'indice de Melton est très simple et caractérise le bassin versant dans son ensemble quels que soient les détails de sa géomorphologie interne. Les indices de connectivité sont au contraire calculés sur chaque pixel du bassin versant et prennent en compte une partie de la complexité du bassin versant. On observe également un lien apparent entre la classification de Wilford et collab. (2004) et les différents indicateurs géomorphologiques. Par exemple, les torrents classés comme torrents à laves présentent de fortes valeurs d'indices de connectivité et de R_{ZP}. La Figure 20 montre aussi les limites de la caractérisation de l'indice géologique IG_{ZP} dont de nombreuses valeurs sont nulles du fait de l'absence de zone de production identifiée visuellement dans certains bassins.

3.4 Variabilité de l'activité torrentielle et de la production sédimentaire

3.4.1 Sélection des paramètres explicatifs

La Figure 21, montre une mesure de l'importance relative des variables explicatives (*IncNodePurity*) à partir de l'analyse avec les *random forests*. Il s'agit d'une mesure de l'importance des variables basée sur l'indice d'impureté de Gini utilisé pour le calcul des divisions des arbres de régression. Les variables les plus importantes sont celles qui ont une valeur de *IncNodePurity* élevée. Les mesures proches de zéro sont des variables qui ne sont pas assez prédictives ou pas importantes.

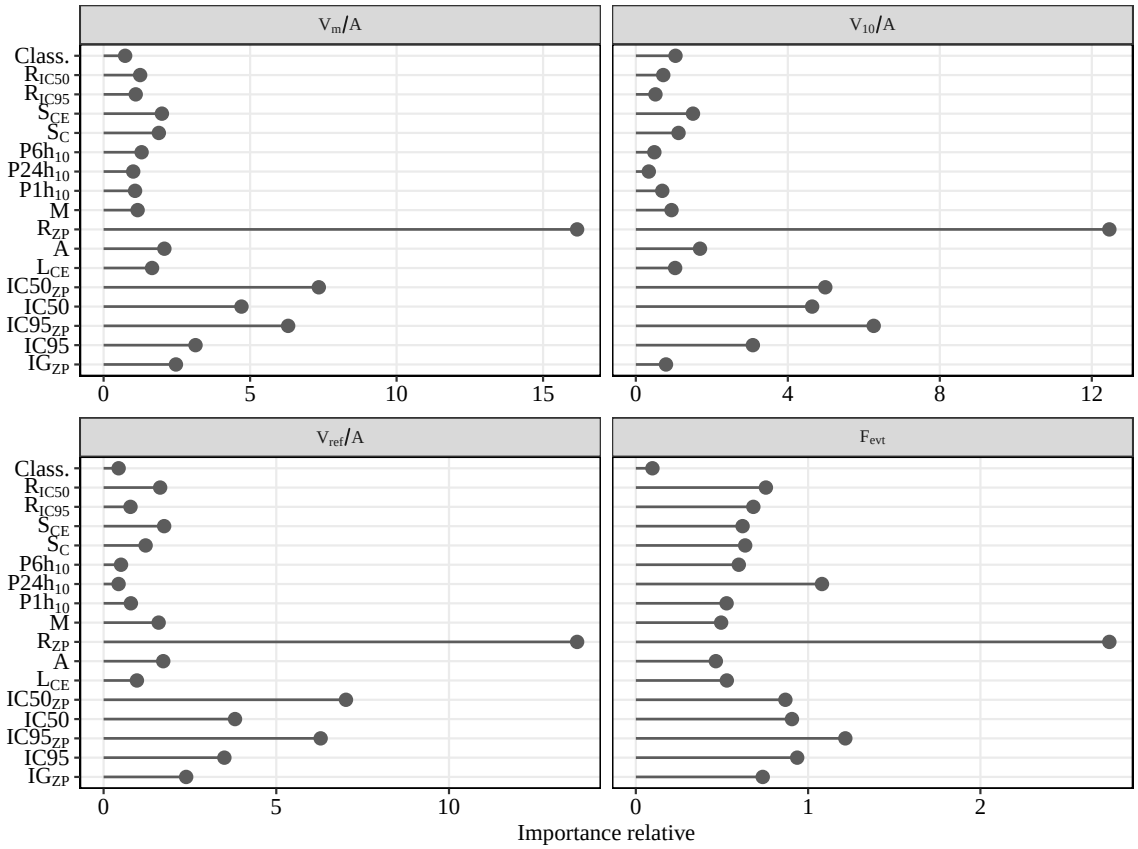


FIGURE 21 – Indice d'importance des paramètres dans la prédiction des variables V_m/A, V_{10}/A, V_{ref} [m^3/km^2] et F_{evt} [evt/an]. Le ratio de zone de production R_{ZP} est le paramètre le plus significatif, les indices de connectivité sédimentaire des zones de production arrivent en second rang ainsi que la pluie sur 24 h pour la fréquence d'évènement. Les autres paramètres sont d'importance assez similaire.

La Figure 21 montre que ratio de surface de production R_{ZP} est la variable clairement la plus significative. Cette relation est présentée dans la Figure 22b. Dans une moindre mesure, les indices de connectivité, particulièrement $IC50_{ZP}$ et $IC95_{ZP}$, sont des variables importantes pour la prédiction de V_m/A, V_{10}/A, V_{ref} et F_{evt}. Les variables climatiques, de pentes et les ratios d'indices de connectivité semblent avoir un rôle plus limité dans la prédiction des variables à expliquer. La relativement faible importance identifiée sur les pentes est peut-être partiellement l'artefact de la faible précision de ces dernières suivant le protocole suivi (voir discussion §2.2.7).

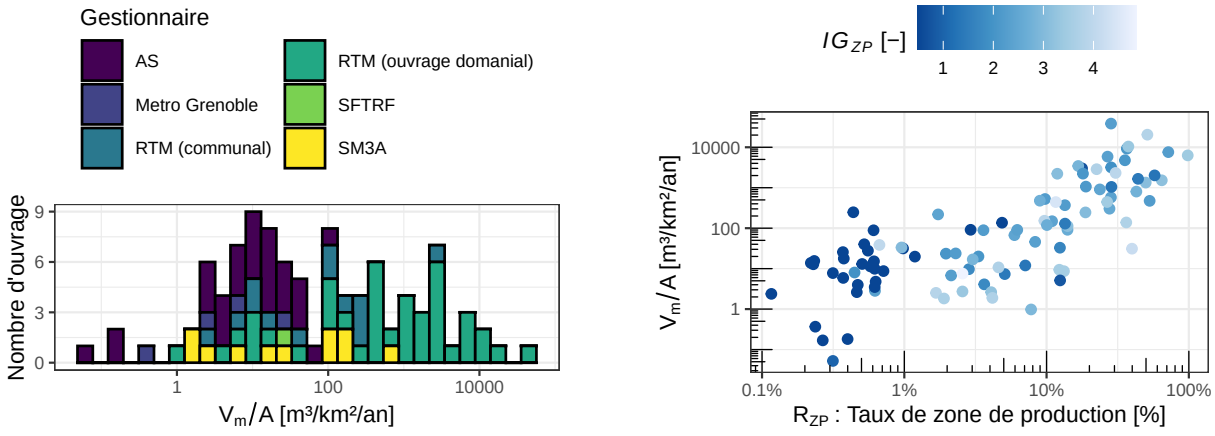
Sur la base de l'analyse de l'importance des variables explicatives, nous avons proposé plusieurs formulations de modèles en cherchant une parcimonie dans le nombre de variables explicatives. Ces formulations ont été testées selon des approches de type *random forests* ou de régressions. Celles-ci sont présentées dans le Tableau 6 et considèrent un à plusieurs paramètres explicatifs.

TABLE 6 – Paramètres utilisés dans les différents modèles de *random forests* et de régressions

Modèle	Paramètres impliqués
#1	R_{ZP}
#2	R_{ZP}, A
#3	R_{ZP}, M
#4	R_{ZP}, $IC95_{ZP}$
#5	R_{ZP},S_{CE}
#6	R_{ZP}, S_{CE}, A
#7	R_{ZP}, $IC95_{ZP}$, A

3.4.2 Variabilité observée de la production annuelle moyenne

On observe une variation sur plusieurs ordres de grandeur de la production annuelle moyenne spécifique (Figure 22a). La Figure 22a montre également que les torrents les plus actifs se trouvent généralement en terrains domaniaux, à l'exception des torrents de la vallée de l'Arve (gérés par le SM3A) qui sont en général des torrents péri-glaciaires.



(a) (b)

FIGURE 22 – a) Distribution des volumes de production annuels spécifiques observés (n = 100 bassins) ; b) Relation entre la production moyenne annuelle spécifique V_m/A et la proportion de zones de production dans la bassin versant R_{ZP} (n = 100 bassins). Le code couleur correspond à l'indice géologique IG_{ZP}.

La Figure 22b illustre la corrélation entre la production solide spécifique annuelle moyenne V_m/A et le ratio de superficie de zone de production R_{ZP}. On note la tendance générale mais aussi l'échantillon de bassins versants ayant des ratios de zone de production minimes ($R_{ZP} < 1\%$) et dont la production sédimentaire est beaucoup plus variable que le reste de l'échantillon. On note aussi que les indices géologiques les plus faibles correspondent aux productions sédimentaires spécifiques les plus faibles.

3.4.3 Prédiction de la production annuelle moyenne

L'analyse préalable des relations entre V_m/A et les variables explicatives a permis d'identifier cinq outliers qui sont des torrents situés dans la vallée de l'Oisans (les torrents de Sarenne, le Treuil et la Lignarre) et le torrent du Piézan. Comme décrit dans la section 2.2.4, il s'agit de bassins pour lesquels notre protocole amène à une surestimation des surfaces de zones de production (zones de pâturages et d'alpages mal classées par la BD Forêt V2) ou une sous-estimation dans le cas du bassin du Piézan (la BD Forêt ne détecte pas les zones d'érosion à proximité du torrent). Afin de ne pas introduire de biais dans nos modèles, il est préférable d'écarter ces torrents de l'étape de modélisation. Dans le cadre du développement de la méthode ECsTREM, une cartographie des zones de production a déjà été réalisée pour les bassins versants du Treuil (ID98), de la Lignarre (ID123) et du Piézan (ID286 et 287). Nous avons corrigé les surfaces des zones de production cartographiées avec les valeurs digitalisées plutôt que d'écarter ces bassins versants du jeu de données. Ainsi, seul le bassin versant de Sarenne, n'ayant pas fait l'objet d'analyse cartographique dans le cadre d'ECsTREM, a été écarté. Cette même procédure de correction a été réalisée pour les étapes de modélisation de V_{10}, V_{ref} et F_{evt}. Au final, les modèles de prédiction de V_m/A ont été construits à partir de 99 bassins.

Les équations résultantes des modèles pour l'évaluation de la production annuelle moyenne spécifique [$m^3/km^2/an$] sont les suivantes :

Modèle 1	$V_m/A = 52 \cdot R_{ZP}^{0.81}$	(10a)
Modèle 2	$V_m/A = 77 \cdot R_{ZP}^{0.70} \cdot A^{-0.26}$	(10b)
Modèle 3	$V_m/A = 40 \cdot R_{ZP}^{0.75} \cdot M^{0.17}$	(10c)
Modèle 4	$V_m/A = 175 \cdot R_{ZP}^{0.67} \cdot 10^{0.14 \cdot IC95_{ZP}}$	(10d)
Modèle 5	$V_m/A = 34 \cdot R_{ZP}^{0.76} \cdot S_{CE}^{0.55}$	(10e)
Modèle 6	$V_m/A = 72 \cdot R_{ZP}^{0.70} \cdot S_{CE}^{0.07} \cdot A^{-0.25}$	(10f)
Modèle 7	$V_m/A = 132 \cdot R_{ZP}^{0.65} \cdot A^{-0.23} \cdot 10^{0.07 \cdot IC95_{ZP}}$	(10g)

L'ensemble de ces équations sont confrontées aux mesures dans les diagrammes de l'Annexe I.

La Figure 23 compare les productions solides annuelles moyennes spécifiques (Fig. 23a) et absolues (Fig. 23b) prédites par le modèle 2 et observées. Les performances des différents modèles proposés seront comparées dans la section 3.4.7. Le modèle 2 (Equation 10b) et le *random forest* utilisant les mêmes variables ont été choisis dans un premier temps parce qu'ils sont les plus simples à utiliser. On constate la forte dépendance à R_{ZP} pour la production spécifique. Toutefois, le nuage de points est beaucoup plus mélangé quand l'analyse est menée à l'échelle du bassin versant : des productions annuelles moyennes équivalentes sont observées sur des grands torrents avec peu de zones de production et sur de petits torrents où l'érosion est intense.

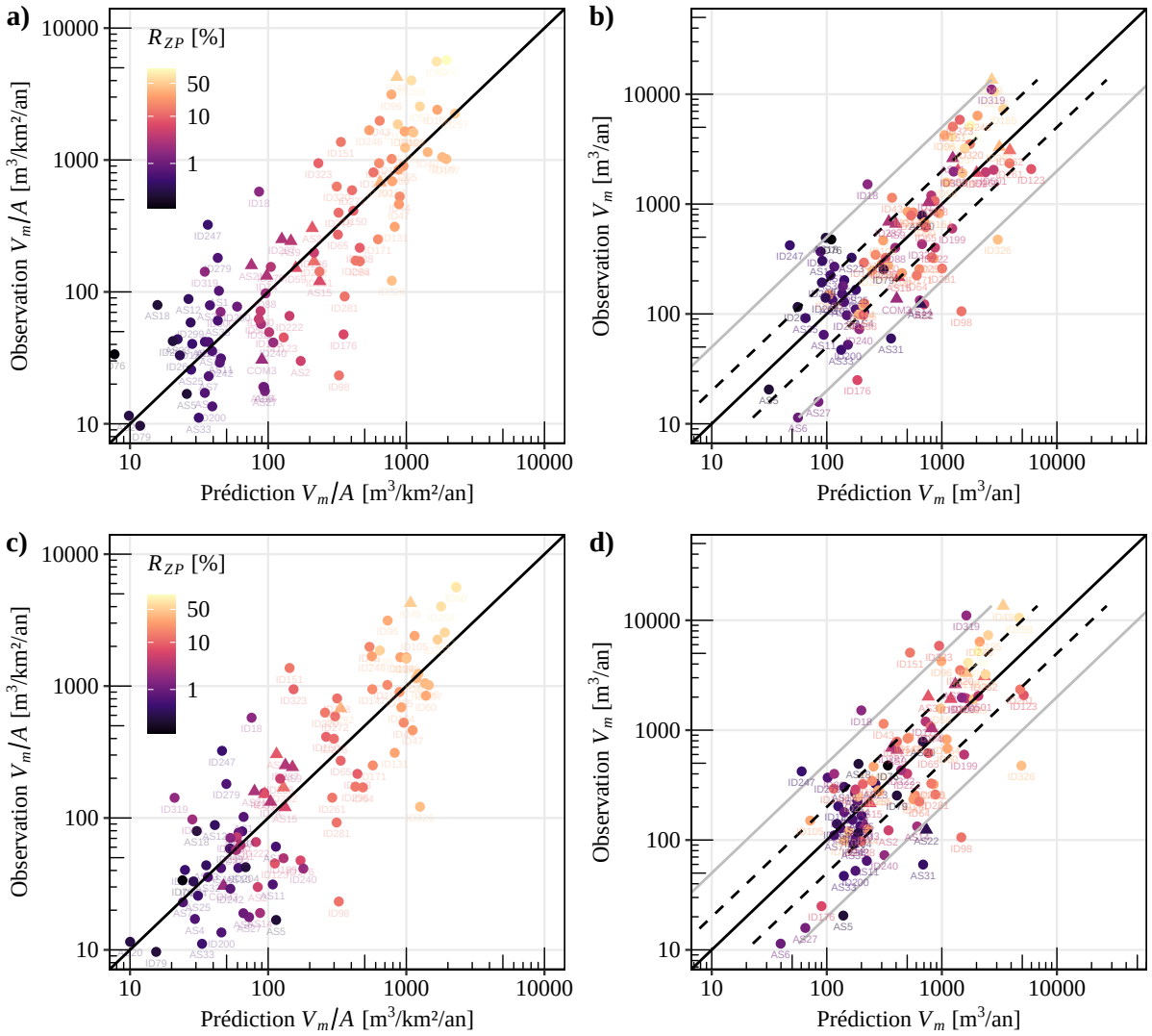


FIGURE 23 – Comparaison des volumes moyens annuels observés et volumes prédits (ligne du haut : lois puissances, ligne du bas : *random forest*). (a) et (c) Valeurs observées et prédites de V_m / A en utilisant la formulation de l'équation (10b) et le modèle 2 de *random forests*, respectivement (n = 99 observations). (b) et (d) Valeurs observées et prédites brutes V_m pour les mêmes formulations. Forme : rond = bassin ordre 1, triangle = bassin ordre 2. Le trait noir plein = ligne de parfaite égalité. Le trait noir discontinu = [2 ; 1/2], trait gris = [5 ; 1/5].

3.4.4 Prédiction de la production décennale

Les équations résultantes des modèles pour l'évaluation de la production solide spécifique décennale [m^3/km^2] sont les suivantes (n = 69 bassins versants) :

$$\text{Modèle 1} \qquad V_{10}/A = 168 \cdot R_{ZP}^{0.88} \tag{11a}$$

$$\text{Modèle 2} \qquad V_{10}/A = 274 \cdot R_{ZP}^{0.75} \cdot A^{-0.28} \tag{11b}$$

$$\text{Modèle 3} \qquad V_{10}/A = 125 \cdot R_{ZP}^{0.81} \cdot 10^{0.2 \cdot M} \tag{11c}$$

$$\text{Modèle 4} \qquad V_{10}/A = 830 \cdot R_{ZP}^{0.70} \cdot 10^{0.18 \cdot IC95_{ZP}} \tag{11d}$$

$$\text{Modèle 5} \qquad V_{10}/A = 110 \cdot R_{ZP}^{0.81} \cdot 10^{0.6\sqrt{S_{CE}}} \tag{11e}$$

$$\text{Modèle 6} \qquad V_{10}/A = 309 \cdot R_{ZP}^{0.75} \cdot A^{-0.29} \cdot 10^{-0.13\sqrt{S_{CE}}} \tag{11f}$$

$$\text{Modèle 7} \qquad V_{10}/A = 592 \cdot R_{ZP}^{0.68} \cdot 10^{0.1 \cdot IC95_{ZP}} \cdot A^{-0.23} \tag{11g}$$

L'ensemble de ces équations sont confrontées aux mesures dans les diagrammes de l'Annexe I.

La Figure 24 illustre elle aussi la corrélation entre la production solide spécifique décennale V_{10}/A et le ratio de superficie de zone de production R_{ZP} qui est représentée par le modèle 1 (Eq. 11a). On note là encore que l'échantillon de bassins versants ayant des ratios de zone de production minimes ($R_{ZP} < 1$ %) et un indice géologique faible présente une production sédimentaire plus variable que le reste de l'échantillon.

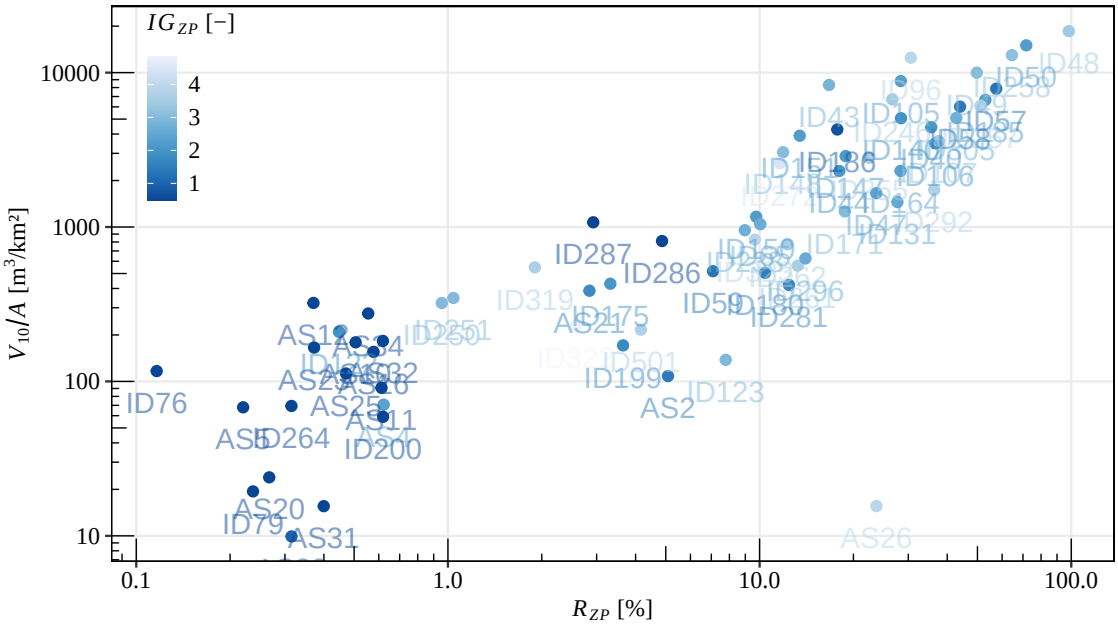


FIGURE 24 – Relation entre la production décennale spécifique V_{10}/A et la proportion de zones de production dans la bassin versant R_{ZP} (n = 71 bassins). Les couleurs représentent les valeurs de l'indice géologique IG_{ZP}.

La comparaison entre valeurs prédites et valeurs observées est fournie dans la Figure 25. Elle montre la même tendance que pour la production solide annuelle moyenne. Les bassins versants pour lesquels les observations montrent que V_{10}>10 000 m^3 sont par contre en général sous-estimés.

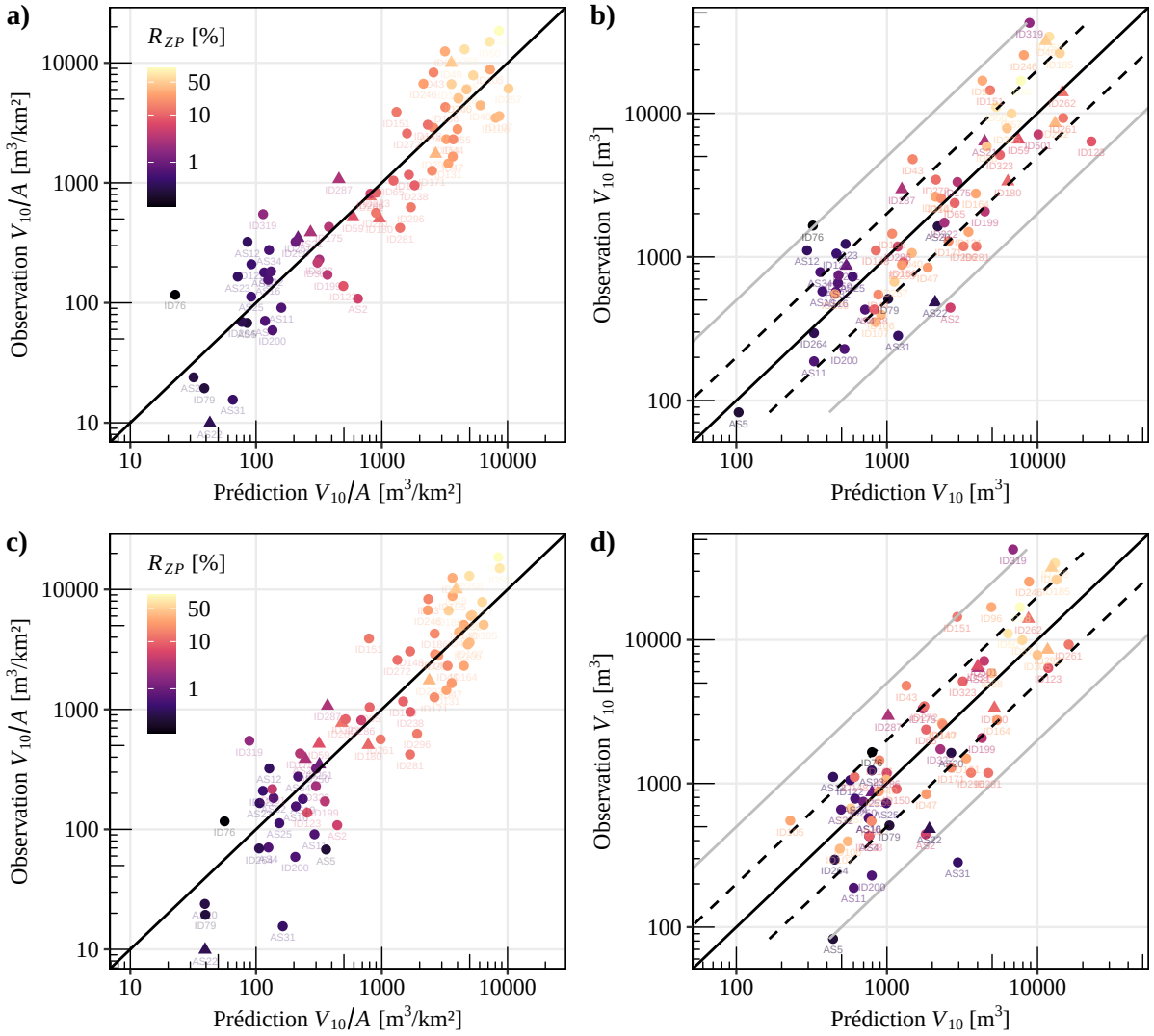


FIGURE 25 – Comparaison des volumes décennaux observés et volumes prédits (ligne du haut : lois puissances, ligne du bas : *random forest*). (a) et (c) Valeurs spécifiques V_{10}/A observées et prédites en utilisant la formulation de l'équation (11b) et le modèle 2 de *random forests*, respectivement (n = 69 observations). (b) et (d) Valeurs brutes V_{10} observées et prédites pour les mêmes formulations. Forme : rond = bassin ordre 1, triangle = bassin ordre 2. Le trait noir plein = ligne de parfaite égalité. Le trait noir discontinu = [2 ; 1/2], trait gris = [5 ; 1/5].

3.4.5 Prédiction de la production de référence

Les équations résultantes des modèles pour l'évaluation de la production solide spécifique de l'évènement de référence [m^3/km^2] sont les suivantes :

Modèle 1	$V_{ref}/A = 475 \cdot R_{ZP}^{0.94}$	(12a)
Modèle 2	$V_{ref}/A = 661 \cdot R_{ZP}^{0.85} \cdot A^{-0.18}$	(12b)
Modèle 3	$V_{ref}/A = 363 \cdot R_{ZP}^{0.87} \cdot 10^{0.19 \cdot M}$	(12c)
Modèle 4	$V_{ref}/A = 1982 \cdot R_{ZP}^{0.77} \cdot 10^{0.16 IC95_{ZP}}$	(12d)
Modèle 5	$V_{ref}/A = 373 \cdot R_{ZP}^{0.90} \cdot 10^{0.35\sqrt{S_{CE}}}$	(12e)
Modèle 6	$V_{ref}/A = 779 \cdot R_{ZP}^{0.85} \cdot 10^{-0.17\sqrt{S_{CE}}} \cdot A^{-0.21}$	(12f)
Modèle 7	$V_{ref}/A = 1630 \cdot R_{ZP}^{0.76} \cdot 10^{0.1 \cdot IC95_{ZP}} \cdot A^{-0.13}$	(12g)

L'ensemble de ces équations sont confrontées aux mesures dans les diagrammes de l'Annexe I.

La Figure 26 illustre la corrélation entre la production solide spécifique de référence V_{ref}/A et le ratio de surperficie de zone de production R_{ZP} qui est representé dans le modèle 1 (Eq. 12a). On note aussi une forte tendance générale, même si l'échantillon des bassins versants ayant des valeurs de R_{ZP} très faibles (bassins versants sans zones de production identifiées) et un IG_{ZP} faible présente plus de variabilité.

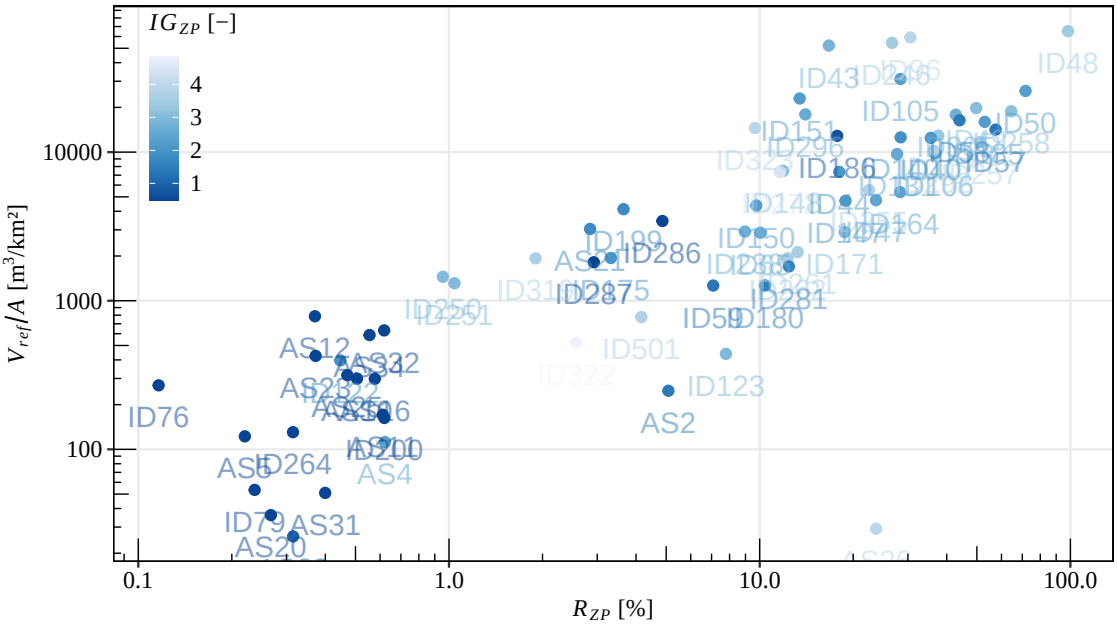


FIGURE 26 – Relation entre la production de référence spécifique V_{ref} et la proportion de zones de production dans la bassin versant R_{ZP} (n = 71 bassins).

La comparaison entre valeurs prédites et valeurs observées est fournie dans la Figure 27. Elle montre la même tendance que pour le production solide annuelle moyenne. On constate que les bassins versants pour lesquels les observations montrent que V_{ref}>100 000 m^3 sont en général sous-estimés.

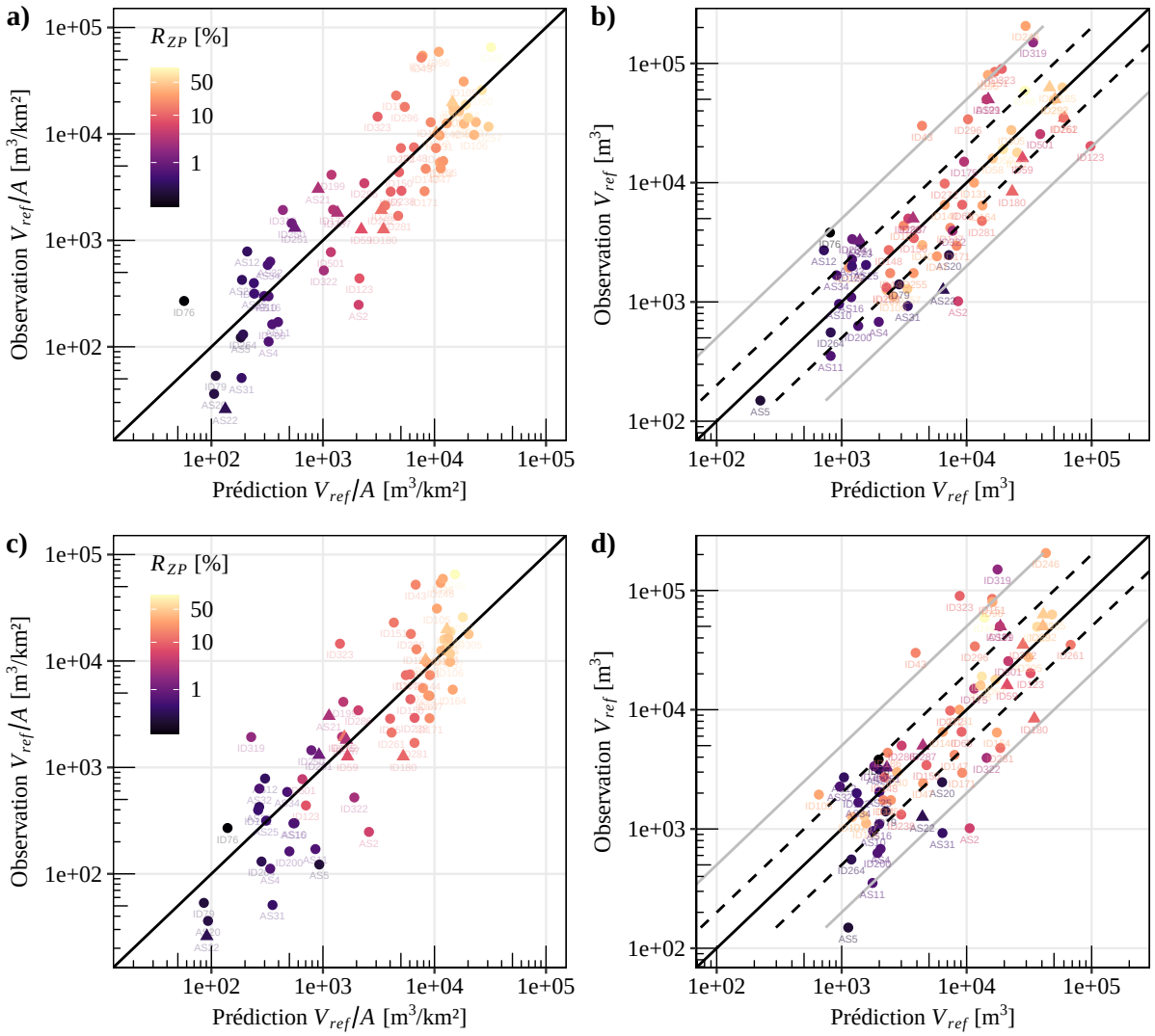


FIGURE 27 – Comparaison des volumes de référence observés et volumes prédits (ligne du haut : lois puissances, ligne du bas : *random forest*). (a) et (c) Valeurs spécifiques V_{ref}/A observées et prédites en utilisant la formulation de l'équation (12b) et le modèle 2 de *random forests*, respectivement (n = 69 observations). (b) et (d) Valeurs brutes V_{ref} observées et prédites pour les mêmes formulations. Forme : rond = bassin ordre 1, triangle = bassin ordre 2. Le trait noir plein = ligne de parfaite égalité. Le trait noir discontinu = [2 ; 1/2], trait gris = [5 ; 1/5].

3.4.6 Prédiction de la fréquence d'occurrence d'évènements (BD-RTM)

Les équations résultantes des modèles pour la prédiction de la fréquence d'occurrence d'évènement torrentiel $[evt./an]$ sont les suivantes (n = 104 bassins versants) :

$$\text{Modèle 1} \quad F_{evt} = 0.048 \cdot R_{ZP}^{0.26} \tag{13a}$$

$$\text{Modèle 2} \quad F_{evt} = 0.046 \cdot R_{ZP}^{0.26} \cdot A^{0.02} \tag{13b}$$

$$\text{Modèle 3} \quad F_{evt} = 0.055 \cdot R_{ZP}^{0.28} \cdot 10^{-0.08 \cdot M} \tag{13c}$$

$$\text{Modèle 4} \quad F_{evt} = 0.061 \cdot R_{ZP}^{0.23} \cdot 10^{0.03 \cdot IC95_{ZP}} \tag{13d}$$

$$\text{Modèle 5} \quad F_{evt} = 0.040 \cdot R_{ZP}^{0.24} \cdot 10^{0.22 \cdot S_{CE}} \tag{13e}$$

$$\text{Modèle 6} \quad F_{evt} = 0.030 \cdot R_{ZP}^{0.25} \cdot 10^{0.43 \cdot S_{CE}} \cdot A^{0.08} \tag{13f}$$

$$\text{Modèle 7} \quad F_{evt} = 0.066 \cdot R_{ZP}^{0.23} \cdot 10^{0.05 \cdot IC95_{ZP}} \cdot A^{0.04} \tag{13g}$$

La Figure 28 montre la comparaison entre les valeurs prédites et observées. Il apparaît que ce type d'approche est moins précis que les approches de prédiction des volumes solides.

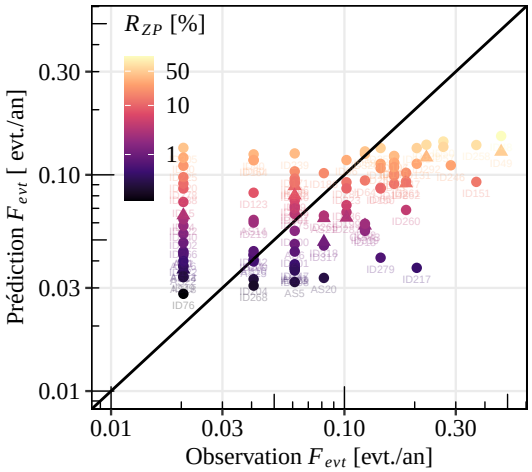


FIGURE 28 – Valeurs observées et prédites de fréquence d'évènement moyenne F_{evt} en utilisant la formulation de l'équation (13a) (n = 104 observations).

3.4.7 Analyse critique de la performance des modèles

La Figure 29a montre les performances de modélisation des variables V_m/A, V_{10}/A, V_{ref} et F_{Evt}. On observe des performances assez faibles pour les modèles de F_{evt} (toutes formulations confondues) par rapport aux modèles des volumes solides. La comparaison des performances des différentes formulations de modèles montre en général des performances comparables entre les modèles utilisant des *random forest* et les modèles construits avec des régressions. Les modèles utilisant des *random forest* présentent des performances plus variables selon les formulations, avec des performances parfois légèrement supérieures aux régressions. Par exemple, pour les modèles de V_m/A, les valeurs des R2 varient de 0.62 à 0.75 et de 0.67 à 0.70 pour les modèles utilisant les *random forest* et les régressions, respectivement. Les erreurs sont également plus faibles pour les modèles utilisant les *random forests* (indicateur RSR). Pour l'ensemble des modèles, le pourcentage de biais est négligeable (de l'ordre de 1 %).

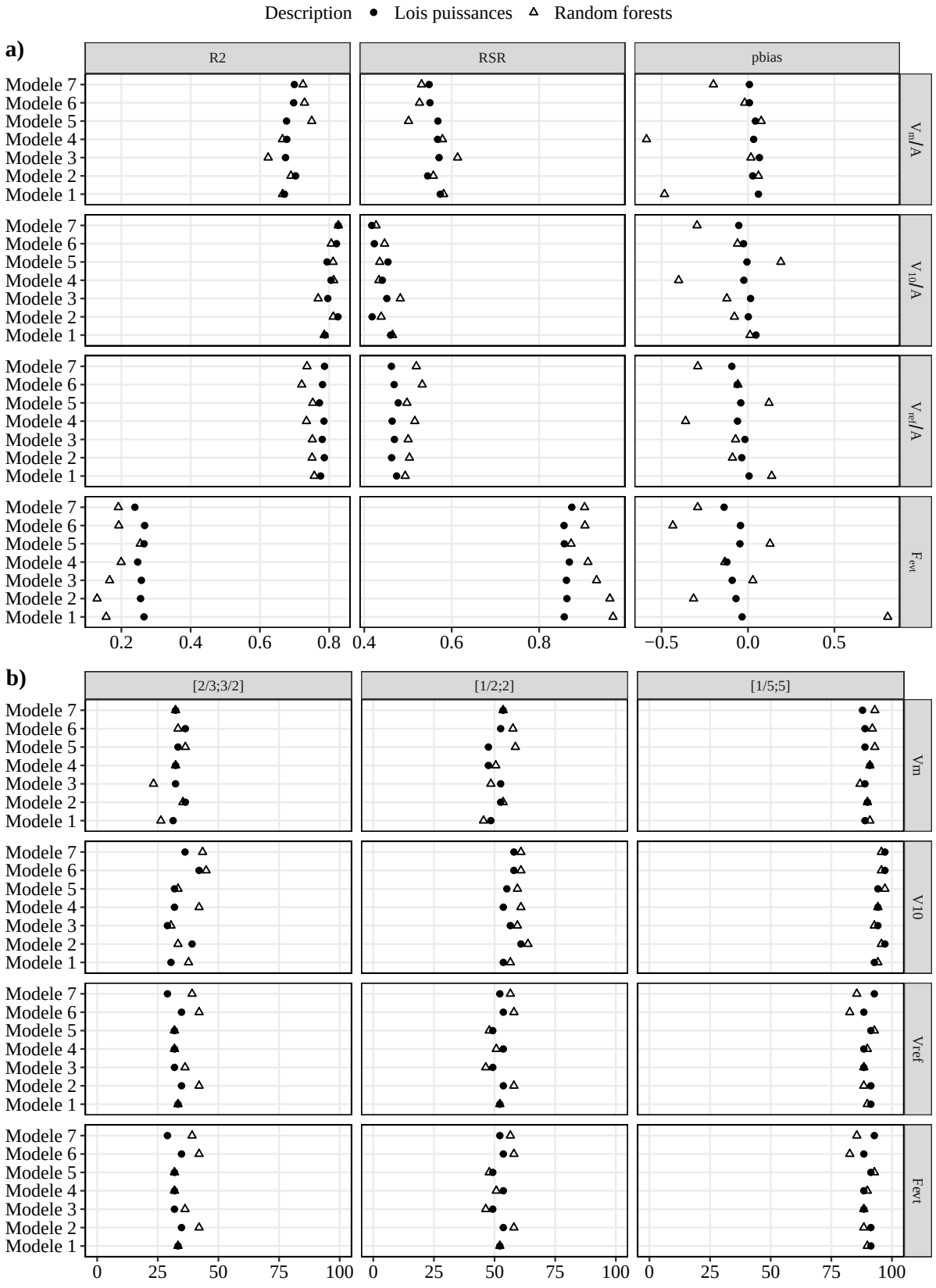


FIGURE 29 – Performances des modèles selon les formulations et les méthodes en validation croisée *leave-one-out* (exclusion tour à tour de chaque bassin, calage du modèle et comparaison avec la valeur observée).

Les performances ont également été évaluées dans la Figure 29b au prisme des proportions du ratio valeurs absolues prédites (i.e. exprimé en m^3 et non en volume spécifique exprimé en m^3/km^2) divisé par valeur absolue observée se trouvant dans les intervalles $[2/3; 3/2]$; $[1/2; 2]$ et $[1/5; 5]$. On remarque que environ 30 % des prédictions tombent dans le première intervalle, sensiblement 50 % dans le second et une très forte proportion dans le troisième qui est très large. Ceci démontre l'humilité avec laquelle il faut utiliser ces méthodes : elles fournissent tout au plus des ordres de grandeur de la production sédimentaire ou des fréquences d'évènements.

Ces proportions sont de plus assez homogènes entre les modèles : tous ces modèles sont en effet calés sur les mêmes échantillons et sont testés sur leur échantillon de calage. Dans la mesure où les modèles sont calés de manière à estimer la tendance moyenne de l'échantillon, l'utilisation de plusieurs modèles d'HydroDemo en parallèle about naturellement à des estimations assez semblables. *La variabilité des volumes prédits par les modèles HydroDemo est ainsi très inférieure à la variabilité réelle de la production sédimentaire des bassins versants. Les relativement faibles scores de précision mentionnés précédemment en sont la preuve. Les chargés d'étude sont donc invités à utiliser plusieurs méthodes indépendantes pour multiplier les faisceaux d'indices qui doivent être utilisés pour encadrer les valeurs probables de production sédimentaire. Une incertitude incompressible doit par ailleurs être acceptée : en géomorphologie et transport solide des bassins versants de montagne, on ne peut jamais être sûr.*

Analyse critique des régressions de prédiction des volumes solides On note que, de manière générale, les résultats montrent que le modèle le plus parcimonieux utilisant seulement la variable R_{ZP} montre une précision quasiment aussi forte que les modèles multi-variés. On pourrait s'interroger sur l'intérêt d'utiliser des modèles bivariés ou trivariés. Chaque paramètre étant un indicateur d'une certaine tendance dans les processus géomorphologiques, nous pensons qu'il est utile de tester plusieurs modèles en parallèle. *On constate toutefois que les modèles tri-variés n'aboutissant pas à un meilleur score de précision, il semble suffisant de se limiter à quelques modèles uni- et bivariés.* A un stade amont d'analyse, les modèles 1 – 3 sont relativement aisés à implémenter. Les modèles 4 (ainsi que éventuellement 7), impliquant le paramètre de connectivité sédimentaire des zones de production. Ils requièrent une analyse géomatique de plus et peuvent être réservés à une étude de stade un peu plus avancée. Les modèles 5 (ainsi que éventuellement 6) impliquent les pentes de cours d'eau estimées sur le MNT de la BD Alti 25m dont la valeur est imprécise comme discuté au §2.2.7. Ils sont fournis pour illustration, présentent des performances de prédiction comparables aux autres mais restent sujets à caution dans la mesure où le paramètre d'entrée ignore les effets des incisions et des petits zones de régulations du transport solide situées sur le profil en long. Chaque modèle sera sensible à un trait caractéristique du bassin versant :

- **Les modèles 1**, monovariés, montrent tout le pouvoir prédicatif et l'importance de la présence de zones de production sédimentaire dans un bassin versant torrentiel. L'effet est non linéaire, la puissance étant respectivement de 0.78, 0.82 et 0.87, toujours <1. Selon ces équations, il faut réduire R_{ZP} par un facteur $\approx 2.2 - 2.5$ pour diviser la production annuelle moyenne ou événementielle par 2, ou encore par un facteur de l'ordre de 6-8 pour réduire la production d'un facteur 5. On notera que la puissance sur R_{ZP} varie aussi assez peu entre les différents modèles multi-variés.
- **Les modèles 2**, bivariés, intègrent la superficie du bassin versant A. La puissance étant toujours négative, ceci démontre un tendance à la décroissance des exports solides spécifiques, à ratio de surface de production constant, pour une superficie de bassin versant qui augmente. Le processus est bien connu, il est principalement expliqué par l'augmentation des zones et phénomènes de régulation du transport solide avec la superficie des bassins versant. Un processus similaire est observé sur les débits de crues qui sont souvent $\propto A^{0.75-0.8}$.

— **Les modèles 3**, bivariés, intègrent l'indice de Melton avec une puissance faible mais positive. Cet indicateur est bien connu pour être positivement corrélé avec la tendance des bassins versants à subir des phénomènes torrentiels.
— **Les modèles 4**, bivariés, intègrent le quantile 95 % de l'indice de connectivité des zones de production. Cet indicateur indique dans quelle mesure les zones de production sont fortement connectées avec l'exutoire du bassin versant (proches, raides et drainant une large part du bassin versant).
— **Les modèles 5**, bivariés, intègrent la pente du cours d'eau comme second paramètre (mesurée sur le MNT de la BD Alti 25m, le long du tronçon contrôlant le transport solide, cf. Figure 10). Ce paramètre est bien connu comme étant critique dans la capacité d'un bassin versant à transférer les volumes solides produits dans ses têtes de bassin. Son caractère grossier en lien avec la donnée utilisée pour le calculer doit amener à une certaine prudence dans l'utilisation de ces modèles.
— **Les modèles 6**, trivariés, intègrent pente du cours d'eau et superficie du bassin versant. Il convient de les utiliser avec la même prudence que les précédents.
— **Les modèles 7**, trivariés, intègrent le quantile 95 % de l'indice de connectivité des zones de production et la superficie du bassin versant. Tout comme les modèles 6, on constate que l'ajout d'un plus grand nombre de variables explicatives n'améliore pas sensiblement la performance des modèles.

Analyse critique des régressions de prédiction de la fréquence d'évènement On remarquera en premier lieu que les performances statistiques des prédictions de $F_{Evt.}$ sont beaucoup plus faibles que celles des volumes solides (critère de R2 RSR). Les précisions sont par contre assez similaires à celles observées sur les volumes solides (ratio prédit / observé : ± 30 % $\in [2/3; 3/2]$; ± 50 % $\in [1/2; 2]$; ± 85 % $\in [1/5; 5]$).

La forme des régressions est par contre assez différente des régressions de prédiction de la production. La dépendance au ratio de surface de production sédimentaire est beaucoup moins linéaire (puissance $\in [0.23; 0.28]$). En supposant que cette équation capte correctement l'effet du pourcentage de zone de production sur la fréquence d'évènements torrentiels, cela signifie que, toutes choses restant égales par ailleurs, il faut réduire la superficie en érosion d'un facteur 18-50 pour réduire la fréquence d'évènements de moitié. Les Modèles 2, 3 et 4, montrent des puissances très faibles (≤ 0.06) pour les dépendances aux paramètres de superficie de bassin versant, de Melton ou de connectivité sédimentaire. Ceci signifierait que, contrairement à la production sédimentaire, la fréquence d'évènements est très peu dépendante de ces paramètres. On capture peut-être là la transition des crues torrentielles vers les crues fluviales. La fréquence d'évènement est par contre sensible à la pente du cours d'eau. Ce type d'analyse, nouveau à notre connaissance, mérite une analyse plus approfondie et l'utilisation de ces modèles doit pour le moment être menée avec prudence. Nous manquons de recul.

En synthèse, le travail présenté dans l'ensemble de cette section a permis le développement de nouvelles approches visant à la prédiction de la production solide moyenne annuelle et événementielle spécifique (m^3/km^2). On y a confirmé l'effet prépondérant du ratio de surface en érosion dans l'activité torrentielle des bassins versants. Ceci confirme l'intérêt des initiatives visant à mener des cartographies généralisées des zones de production sédimentaire telle que l'analyse menée sur les Alpes du Sud par Bertrand et collab. (2017). Plutôt que de proposer une équation unique d'estimation, nous retenons une série d'équations mono-, bi- ou tri-variées qui dépendent principalement de R_{ZP} mais intègrent aussi l'abattement associé à la superficie du bassin versant, à l'indice de Melton, à un quantile d'un indice de connectivité sédimentaire ou encore à la pente du tronçon contrôlant le transport solide. Ces équations montrent des tendances non linéaires cohérentes avec la compréhension actuelle que nous

avons des processus torrentiels. Elles viennent compléter le jeu de formules déjà disponibles dans la littérature.

Une exploration a été réalisée pour aussi tenter de prédire la fréquence d'occurrence d'évènements torrentiels de magnitude suffisamment forte pour justifier l'établissement d'une fiche évènement dans la BD-RTM.

La section suivante présente une première application de l'approche développée à un échantillon de bassins versants de la région Grenobloise.

4 Application des méthodes : les torrents «METRO»

4.1 Choix de l'échantillon étudié

Neuf torrents situés sur le territoire de Grenoble-Alpes Métropole (dénommés torrents «METRO» dans ce rapport) sont étudiés dans ce chapitre à l'aide de la méthode développée précédemment. Ils sont répartis sur les trois massifs entourant la métropole (Figure 30). Les bassins versants sont, ou ont été par le passé, parmi les plus actifs du secteur. L'objectif est d'apporter un nouvel éclairage sur ces derniers et des éléments utiles aux services de la METRO qui, suite à la mise en place de la GEMAPI, sont en charge de la gestion de ces derniers.

Localisation des exutoires étudiés Les services de la METRO avaient sélectionné la liste des cours d'eau mais n'avaient pas spécifié de localisation précise le long de ces derniers. Les analyses menées étant réalisées à l'échelle d'un bassin versant défini comme étant la surface drainée à l'amont d'un exutoire donné, nous avons sélectionné des exutoires sur la base des critères suivants :

1. Dans le cas où il n'existe aucune plage de dépôt sur le torrent à étudier, on sélectionne comme exutoire le point de débordement le plus amont localisé selon les cartes des aléas existantes [20] ;
2. Sur la plupart de ces torrents, une plage de dépôt est présente. Si nous disposons des données de remplissage/curage pour ces ouvrages, ce point a déjà été intégré à l'analyse présentée plus haut et il est inutile de dupliquer l'analyse. Dans ce cas on choisit comme exutoire un point situé à une certaine distance en aval (en général la prochaine zone d'aléas torrentiels), c'est le cas des torrents du Lavanchon, du Rif Talon, du Verderet, du Charmeyran, des Jaillères et du Lanfrey. Des plages de dépôts existent sur les torrents du Domeynon et du Prémol. Toutefois, soit aucun curage n'est connu (Domeynon), soit nous ne disposons pas des données de curage (Prémol). Pour ces deux torrents, le point d'étude a été sélectionné selon le premier critère : au droit du premier secteur identifié comme soumis aux aléas torrentiels.
3. Si le torrent a une extension géographique significative, plusieurs points d'analyse sont choisis. Seul le Lavanchon est dans cette situation. Les autres torrents avaient soit déjà plusieurs points d'études (plages de dépôts amont gérées par le RTM ou la commune et/ou plage de dépôt aval gérée par les AS), soit avaient un cône de déjection de dimension suffisamment limitée pour qu'un seul point d'analyse soit représentatif des processus torrentiels sur l'ensemble du secteur.
4. L'objet de la méthode étant de caractériser les aléas torrentiels, aucun point d'analyse n'a été localisé dans les secteurs de basse vallée et de chantournes. Le critère suivi était qu'aucun point n'a été ajouté dans les zones d'aléas inondation située dans les parties terminales des bassins versants.

Le Tableau 7 synthétise les localisations finalement retenues en suivant ces critères. Les cartes des bassins sont disponibles dans l'Annexe A.

20. Les cartes des aléas de toutes les communes de la METRO sont accesssibles en ligne au lien suivant : `https://sitdl.lametro.fr/urba_posplu/PLUI_GAM_20191220/5_Annexes/07_Documents_informatifs_Risques/7B_Cartes_aleas/` (visité le 22/03/2021)

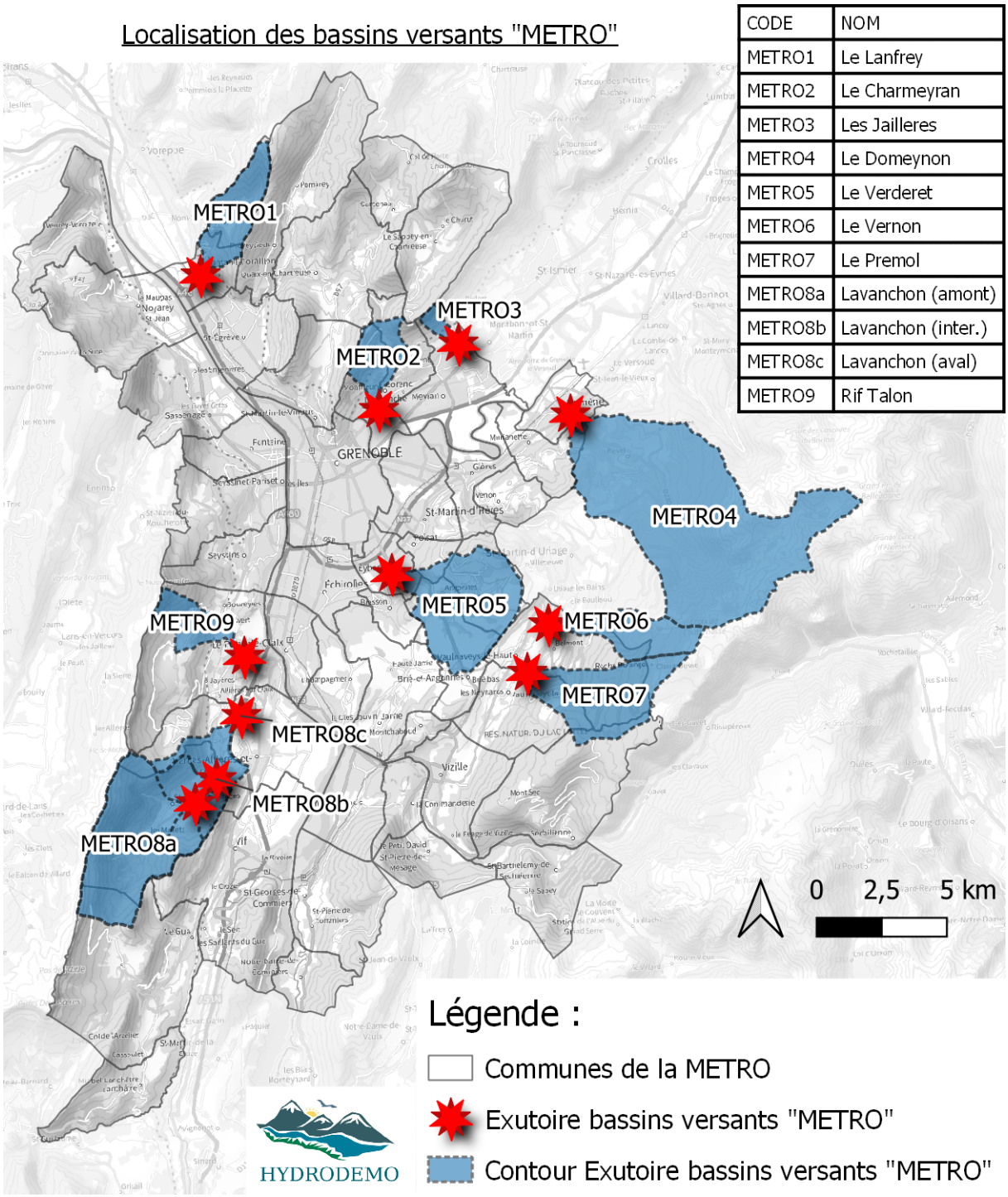


FIGURE 30 – Localisation des exutoires et bassins versants des torrents «METRO»

Table 7 – Localisation des exutoires des bassins versants METRO (PDD : plages de dépôt situées en amont et en aval des exutoires étudiés).

Torrent	Identifiant	Commune	Localisation du point exutoire choisi	PDD amont	PDD aval
Le Lanfrey	METRO1	Fontanil-Cornillon	Pont de la RD 1075 (avenue du tram)	1	1
Le Charmeyran	METRO2	La-Tronche	Pont de la RD 590 (Av. Maquis du Gresivaudan)	3	1
Les Jaillières	METRO3	Meylan	Pont Chemin de l'Eglise	2	2
Le Domeynon	METRO4	Domène	Passage couvert centre bourg	1	0
Le Verderet	METRO5	Eybens	Passage couvert de la Mairie	1	0
Le Vernon	METRO6	Vaulnaveys-le-Haut	Pont de la RD 111 (route de Chamrousse)	0	0
Le Premol	METRO7	Vaulnaveys-le-Bas	Pont Route des Preydières	0	1
Le Lavanchon (amont)	METRO8a	Saint-Paul-de-Varces	Pont Chemin de Collaboeuf	1	0
Le Lavanchon (intermédiaire)	METRO8b	Saint-Paul-de-Varces	Pont Chemin du Meinget	1	0
Le Lavanchon (aval)	METRO8c	Varces-Allières-et-Risset	Passage sous la A51	1	0
Le Rif Talon	METRO9	Claix	Pont RD 269 (Av. de Belledonne)	3	0

4.2 Etat des connaissances avant HYDRODEMO

Les paragraphes suivants retracent succinctement les éléments de connaissances principaux sur la torrentialité de ces bassins versants qui ont pu être rassemblés dans les documents auxquels nous avons eu accès. Les évènements renseignés dans la BD-RTM pour chaque bassin sont listés dans l'Annexe H. Les paramètres clés sont rassemblés dans le Tableau 8.

4.2.1 Le Lanfrey (METRO1)

Nous avons pu recueillir des informations provenant du rapport HYDRETUDES (2012a), de la BD-RTM et du rapport d'analyse de l'aléa de la commune de Fontanil-Cornillon (Alp'Géorisques, 2005). L'analyse des évènements historiques indique l'occurrence de quelques évènements sur le Lanfrey dont deux évènements récents (2002 et 2005) sous la forme de crues torrentielles dues à des phénomènes orageux exceptionnels. Les documents n'indiquent pas de valeurs quantitatives de volumes de sédiments produits lors de ces évènements. Le rapport HYDRETUDES, réalisé dans le cadre de l'étude de la plage de dépôt des AS, donne une estimation des volumes basés sur des hypothèse d'hydrogrammes et de capacité de transport par charriage, au droit de la plage, de 160 m^3 et 310 m^3 pour des évènements décennaux et centennaux, respectivement. On note que les volumes curés dans l'ouvrage sont pourtant régulièrement de l'ordre de plusieurs centaines de m^3.

4.2.2 Le Charmeyran (METRO2)

Pour l'analyse du torrent du Charmeyran, nous nous sommes référés au rapport d'analyse des aléas de la commune de La Tronche (Alp'Géorisques, 2018b) et à la BD-RTM. Dans sa partie amont, le Charmeyran est très encaissé et présente de fortes pentes. Le Charmeyran possède deux affluents

notables que sont les torrents du Gorget et de la Grande Ruine. Ces deux torrents prennent leur source sur le flanc est du Mont Rachais et s'écoulent sur une forte pente. Le Gorget est très encaissé avec des berges instables. On note aussi que le torrent de la Grande Ruine s'écoule sur un lit perché. L'analyse des observations historiques indique que le torrent du Charmeyran a connu de nombreuses crues torrentielles. Le mode de transport solide dominant semble être les crues de charriage mais on note toutefois l'occurrence d'une lave torrentielle dans le torrent de la Grande Ruine en 1986. Les volumes de matériaux transportés sont rarement quantifiés. Pour la lave torrentielle de 1986, le volume transporté a été estimé à environ 2500 m^3. Des évènements en 2009 et 2010 ont provoqué le remplissage de la plage de dépôt du Charmeyran dont la capacité de stockage est estimée à 500 m^3. On note l'existence d'ouvrages de correction sur les torrents du Gorget et de la Grande Ruine ainsi qu'une plage de dépôt en aval de chacun de ces torrents. Le Charmeyran possède également une plage de dépôt en aval de la confluence avec les torrents de la Grande Ruine et du Gorget (au niveau du chemin des Lauriers).

4.2.3 Les Jaillières (METRO3)

Les documents auxquels nous nous sommes référés pour le torrent des Jaillières sont l'Etude du Bassin de Risque (EBR) (ONF-RTM, 2019a) de la Ruine et des Bizenons, le rapport d'analyse des aléas de la commune de Meylan (des Risques Naturels de l'Isère, 2008) et la BD-RTM. L'EBR présente une analyse du profil en long. Le bassin versant est favorable à la formation de laves torrentielles et de crues de charriage hyperconcentré. Dans sa partie amont, le bassin versant est constitué du torrent de la Ruine et de plusieurs ravins dits des Bizenons. Le torrent de la Ruine est formé par deux branches qui constituent le sous-bassin versant qui contribue principalement à l'apport de matériaux dans le torrent des Jaillières. Ces matériaux proviennent des éboulements des falaises du Saint-Eynard. Les ravins des Bizenons peuvent produire d'importants apports de matériaux au niveau de la piste du réservoir de la Dhuy. Ces ravins semblent toutefois déconnectés du torrent des Jaillières. Les observations historiques mentionnent l'occurrence de nombreuses crues torrentielles dans le torrent des Jaillières sous forme de laves torrentielles ou de crues de charriage. Ces évènements sont généralement provoqués par des épisodes orageux intenses. Les observations historiques indiquent que les crues torrentielles impactaient régulièrement les hameaux en aval du cône de déjection jusqu'à la création de la plage de dépôt des Jaillières en 1990 (au niveau du chemin de Maupertuis). La propagation des laves torrentielles se limite en général à l'apex du cône de déjection (au niveau du hameau de la Bâtie). Toutefois, un évènement en 1988 a provoqué une lave torrentielle qui s'est propagée jusqu'au niveau de la RD 1090. Les observations historiques mentionnent également un évènement en 2010 qui a produit une crue torrentielle intense transportant des matériaux jusqu'aux chantournes, en aval du cône de déjection. Un curage de 5000 m^3 a été réalisé dans la plage de dépôt RTM de la Ruine en 1987 et ce volume est considéré comme le volume de référence (volume centennal) au niveau de la plage de dépôt. L'EBR indique que ce volume peut cependant être excédé en cas d'importants éboulements en tête de bassin versant. Une estimation du volume de matériaux transporté a également été réalisée au niveau de la plage de dépôt des Jaillières, dans la partie urbanisée du cône de déjection, et est de l'ordre de 1340 m^3. Le bassin versant comprend plusieurs plages de dépôt : la plage de dépôt RTM de la Ruine (capacité de stockage d'environ 10 000 m^3), les plages de dépôt RTM des ravins de Bizenon (Bizenon II et III, de 600 et 1000 m^3 respectivement), la plage de dépôt communale en aval de la RD 1090 (capacité de stockage d'environ 80 m^3), la plage de dépôt des Jaillières en aval du tronçon endigué (capacité de stockage d'environ 450 m^3), un piège à matériaux en amont d'une traversée couverte et un bassin de décantation en amont de l'autoroute. Les documents consultés indiquent aussi que la faible capacité hydraulique du lit dans la partie aval du bassin versant et la présence de végétation dans le lit peuvent aggraver le risque torrentiel.

4.2.4 Le Domeynon (METRO4)

Nous avons pu recueillir des informations provenant du rapport d'analyse des aléas de la commune de Domène (Mission Inter-Services des Risques Naturels de l'Isère, 2008), du rapport d'étude de la réhabilitation des torrents de Belledonne suite aux crues de 2005 (Alp'Géorisques, 2007) et de la BD-RTM. Le mode de transport solide dominant est le charriage avec reprise des matériaux du lit et des berges par érosion. Les observations historiques indiquent toutefois l'occurrence d'une lave torrentielle en 1679 causant d'important dégâts mais ne mentionnent pas les causes de l'évènement et ne quantifient pas le volume de matériaux transportés. Le Domeynon a connu plusieurs crues torrentielles (1783, 1955, 1968, 2005 et 2007), la plus marquante étant la crue de 2005 provoquée par des précipitations engendrant une crue d'une durée exceptionnelle. Cet évènement a généré un transport solide important (fourniture en matériaux importante due aux déstabilisation des versants, à la divagation latérale et à l'affouillement). Le rapport Alp'Géorisques (2007) estime le volume de matériaux transporté par le Domeynon lors de cet événement à plus de 19 000 m^3. Dans sa partie aval du cône de déjection, le Domeynon est endigué et s'écoule sur un lit perché. On note que suite à l'évènement de 2005, une plage de dépôt a été créée en amont de la scierie située à l'apex du cône de déjection.

4.2.5 Le Verderet (METRO5)

Nous avons pu recueillir des informations provenant du rapport d'analyse des aléas de la commune d'Eybens (Alp'Géorisques, 2018a), du dossier de gestion de la plage de dépôt de l'AS (HYDRETUDES, 2012c) ainsi que des évènements de la BD-RTM. Ces documents mentionnent l'occurrence de plusieurs crues dans la commune. Ces dernières ont généré d'importants dommages par inondation, toutefois aucune information quant à d'éventuelles aggravations associées au transport sédimentaire n'est donnée. Des données granulométriques et de profils en long ont pu être récupérées. Le rapport d'HYDRETUDES (2012c) indique que la plage de dépôt a une capacité de l'ordre de 3000 m^3 et les volumes de capacité transport par charriage estimés dans ce rapport pour des périodes de retour de 10 et de 100 ans sont respectivement de 1200 et de 2500 m^3. Les curages étaient en moyenne de l'ordre 440 m^3/an sur la période 2006-2012. La pente mesurée sur deux tronçons en amont de l'ouvrage est de l'ordre de 5.5 % et 5.7 % et passe à 3.5 % en aval de l'ouvrage avant de diminuer encore progressivement.

4.2.6 Le Vernon (METRO6)

L'analyse du rapport d'analyse de l'aléa de la Commune de Vaulnaveys-le-Haut (Alp'Géorisques, 2019c) ainsi que de la BD-RTM indique que le Vernon a connu des phénomènes torrentiels marqués en 1783 dues à des précipitations exceptionnelles. Ces précipitations ont déstabilisé les versants et provoqué des laves torrentielles et des crues de charriages de fortes magnitudes. Aucune estimation des volumes n'est donnée, toutefois les observations historiques mentionnent le charriage de blocs de 4 m^3 durant ces évènements. Les instabilités des versants et la forte disponibilité sédimentaire due à l'évènement de 1783 ont provoqué plusieurs laves torrentielles et crues de charriage entre 1783 et 1858. Les laves torrentielles observées apparaissent dans la partie amont du Vernon qui est relativement encaissée, fortement boisée et avec de fortes pentes. Ces laves torrentielles se sont déposées sur le cône de déjection, au niveau du hameau de Saint-Georges d'Uriage. Plus récemment, une lave torrentielle s'est produite en 1960 due à la rupture d'un barrage artificiel sur le secteur de Chamrousse (Recoin). Des crues torrentielles ont également été observées en 2005, 2008, 2014 et 2018. Aucune quantification du transport solide n'a été réalisée pour ces évènements. D'après les analyses des observations historiques, il semblerait que le risque torrentiel du Vernon est aggravé par les phénomènes d'embâcles dans sa partie amont.

4.2.7 Le Prémol (METRO7)

L'analyse du torrent du Prémol s'est basée sur le rapport d'analyse de l'aléa de la Commune de Vaulnaveys-le-Haut (Alp'Géorisques, 2019c) ainsi que sur la BD-RTM. A l'instar du Vernon son voisin direct, le Prémol a connu des précipitations exceptionnelles en 1783 causant des instabilités des versants et des glissements de terrain dans la partie amont du bassin versant. Les volumes mobilisés par ces glissements de terrain ont été estimé à 70 000 m^3 et ont généré plusieurs laves torrentielles, charriant des blocs de 4 m^3, et crues de charriage jusque dans les années 1850. Plus récemment, le Prémol a connu une crue torrentielle en 2005 provoquant des érosions des berges au niveau de la scierie et charriant des blocs de 70 cm de diamètre. La partie amont du bassin versant du Prémol présente des versants raides et instables. Les laves torrentielles apparues suite à l'évènement de 1783 sont dues aux glissements de terrain qui fournissent de grande quantité de matériaux et agissent comme des barrages naturels. La partie amont du bassin est fortement boisée et le phénomène d'embâcle peut aggraver le risque torrentiel. Le rapport d'analyse de l'aléa indique également que certains glissements sont toujours actifs et estime un volume de matériaux mobilisé d'environ 20 000 m^3 à 30 000 m^3 pour une crue centennale.

4.2.8 Le Lavanchon (METRO8)

Nous avons pu collecter des informations concernant le Lavanchon provenant de l'EBR du Lavanchon amont (ONF-RTM, 2019b), de la BD-RTM et du rapport d'analyse de l'aléa de la Commune de Saint-Paul-de-Varces (Alp'Géorisques, 2019b). L'EBR fournit des mesures granulométriques des matériaux disponibles dans la plage de dépôt RTM et une analyse du profil en long. Dans sa partie amont à la plage de dépôt RTM, le Lavanchon a une activité torrentielle importante, avec l'occurrence de laves torrentielles et de crues de charriage hyperconcentré. Le sous-bassin de l'Echarina est le principal bassin contributeur de matériaux dans le Lavanchon. Ce sous-bassin génère régulièrement des laves torrentielles dont les matériaux proviennent des éboulements des falaises amont et de la reprise des matériaux du lit. Dans une moindre mesure, les sous-bassins du Rioux et du Lavanchon fournissent des matériaux sous forme de crue de charriage (reprises des matériaux du lit et des berges). Les observations historiques indiquent l'occurrence de plusieurs laves torrentielles, essentiellement dans le torrent de l'Echarina, de volumes estimés entre 2000 et 6000 m^3. L'EBR du Lavanchon estime les volumes de production centennal, au droit de la plage de dépôt RTM, à 20 000 m^3 pour les laves torrentielles et entre 2500 et 4000 m^3 pour les crues de charriage. Dans la partie aval, des crues torrentielles à charriage ont été observées (1931, 1935 et 1955) mais le transport solide associé à ces évènements n'a pas été quantifié. Les observations concernant l'évènement de 1935 mentionnent toutefois un fort charriage entraînant un exhaussement du lit et un engravemment de certaines zones agricoles. L'EBR mentionne l'existence de plusieurs ouvrages de correction dans la partie domaniale ainsi que dans la partie aval. On note également que la plage de dépôt RTM dans la partie amont possède une capacité de stockage de l'ordre de 20 000 m^3. La granulométrie y est plus grossière que dans le lit en aval (D_{50} = 0.1 m et D_{84} = 0.2 m).

4.2.9 Le Rif Talon (METRO9)

Les informations collectées pour le torrent du Rif Talon proviennent du rapport d'analyse de l'aléa de la commune de Claix (Alp'Géorisques, 2019a), de l'EBR du Rif Talon (ONF-RTM, 2014) et de la BD-RTM. Des mesures de profil en long par ailleurs été réalisées dans le cadre du projet. Dans la partie sommitale, le transport solide peut être sous la forme de laves torrentielles ou de crues de charriage hyperconcentré alimentées par les éboulis au pied des falaises. En aval de la première plage de dépôt, le mode de transport dominant est le charriage. Les observations historiques rapportent plusieurs crues torrentielles sur le Rif Talon sans donner de précisions quant aux volumes de matériaux transportés. L'évènement le plus marquant à ce jour est la lave torrentielle de 2006 (l'unique lave torrentielle

clairement recensée dans le bassin) dont le volume de matériaux transporté a été estimé entre 1500 et 2000 m^3. Cet évènement a été déclenché par un évènement orageux intense en tête de bassin versant et la lave torrentielle s'est propagée jusqu'au hameau de Malhivert. L'EBR a réalisé des estimations de volumes de production, pour une période de retour centennal, de 4000 m^3 pour les laves torrentielles et de 3000 m^3 pour les crues de charriage hyperconcentré. Les photos d'archive montrent que les crues torrentielles ont régulièrement impacté le hameau de Malhivert situé au niveau de l'apex du cône de déjection. On note toutefois que la crue de 1992 a eu des impacts plus en aval, au niveau de la Chièze. Les photos d'archive laissent voir un lit comblé de graviers (granulométrie 5-10 cm) en particulier au droit du point d'étude HYDRODEMO (ONF-RTM, 2014, p. 64). Il existe plusieurs ouvrages de corrections sur le Rif Talon, particulièrement dans la partie domaniale (en amont de plage de dépôt RTM situé au droit du hammeau de Malhivert). On note également l'existence de trois plages de dépôt le long du Rif Talon, dans l'ordre de l'amont vers l'aval : la plage de dépôt RTM (capacité de stockage estimée à environ 1000 m^3), la plage de dépôt communale «Gampas» (capacité estimée entre 780 et 1250 m^3) et la plage de dépôt «Beyle Stendhal» (capacité estimée d'environ 100 m^3). Des phénomènes d'érosion et d'incision du lit dépassant parfois un mètre permettent toutefois aux écoulements de se recharger en aval des ouvrages de dépôt.

Table 8 – Données de mesures aux exutoires des torrents de la METRO. * indique des données provenant des rapports HYDRETUDES. † indique des données mesurés sur les photos aériennes disponibles sur le *Géoportail*. ‡ indique des données extraites à partir de la BD ALTI à 5m. § indique des données provenant des rapport EBR, ces mesures généralement réalisées dans les plages de dépôt RTM.

Torrent	D50 (m)	D84 (m)	Pente (m/m)	Largeur du lit (m)
Le Lanfrey	0.008*	0.044*	0.03*	3 - 5†
Le Charmeyran	0.033	0.062	0.045‡	2 - 4
Les Jaillières	0.029* - 0.027§	0.057* - 0.048§	0.145‡	3 - 4†
Le Domeynon	0.043	0.131	0.029	5 - 6†
Le Verderet	0.029*	0.057*	0.035*	3.5-4.5†
Le Vernon		0.3 - 0.5	0.14‡	2.5 - 2.6 - 3.5
Le Premol		0.2 - 0.5	0.10‡	2.9 - 3 - 4
Le Lavanchon (amont)	0.059	0.120	0.021	3 - 3 - 3.3
Le Lavanchon (intermédiaire)	0.059	0.120	0.021	3 - 3 - 3.3
Le Lavanchon (aval)	0.047	0.079	0.011	3.4 - 3.2 - 4.7
Le Rif Talon		0.05-0.10	0.096‡	1 - 2

4.3 Observations de terrain complémentaires

4.3.1 Le Lanfrey (METRO1)

Le torrent du Lanfrey dans sa partie en amont du Fontanil-Cornillon présente un faciès caractéristique des petits cours d'eau du massif de la Chartreuse. Son lit est étroit et assez envahi de végétation. Il était à sec lors de notre visite de Mars 2021. On y trouve des blocs et un peu de graviers, mais pas de traces d'activité de transport solide intense. Avant la traversée du village, le lit est équipé d'une plage de dépôt à proximité du cimetière. Elle est visible depuis la route de Mont-Saint-Martin. Elle est équipée d'un piège à embâcle et son fond présente des dépôts limoneux couverts d'herbacées. On ne distingue que très peu de graviers, signe d'une activité de transport solide récente assez limitée.

En aval, le lit du torrent est protégé d'enrochements libres ou liaisonnés selon les sections. Le lit du torrent conflue avec l'affluent rive gauche de la résurgence karstique de la Lutinière avant d'atteindre

le secteur de la Mairie. Cette résurgence était aussi à sec lors de notre visite. Elle est située dans un canyon court mais dont la largeur apparaît importante considérant qu'il ne semble drainer que la résurgence. L'absence de terre végétale et la présence exclusive de gros blocs éboulés des rives du canyon laissent penser que les débits issus de la résurgence doivent parfois être forts, peut-être très forts. Cet apport d'eau claire associé au piégeage de matériaux dans la plage de dépôt du cimetière doit faciliter le transport de sédiments dans le secteur aval du cours d'eau, ce qui limite le risque de dépôt de sédiment dans la traversée urbaine ; mais aussi augmenter les débits d'eau écoulés et donc les risques d'inondation. Une seconde résurgence alimente de façon plus continue les écoulements du Lanfrey à proximité de la mairie mais son empreinte géomorphologique est faible. Les deux réseaux sont peut-être connectés.

En aval, le lit du Lanfrey est relativement étroit et sa pente est assez faible en amont de la RD 1075. En aval de cette dernière, le lit s'élargit et les berges semblent avoir été aménagées plus récemment qu'en amont. La charge sédimentaire grossière ayant passé la plage de dépôt du cimetière aura vraisemblablement tendance à se déposer dans les quelques zones élargies situées en amont et aval de la voie ferrée (plage de dépôt de l'AS).

La partie amont du bassin versant n'a pas été visitée. La visite de la zone aval laisse penser que le Lanfrey est un torrent à charriage peu actif dont la charge sédimentaire, faute de pente, ne peut aller plus loin que la plage de dépôt de l'AS.

4.3.2 Le Charmeyran (METRO2)

Les deux torrents affluents rive droite du Charmeyran (le Gorget et la Grande Ruine) présentent des traces de laves torrentielles en particulier le lit du Gorget qui semble plus actif que le second. Le lit présente des marques d'érosions sur les berges, la végétation est quasi-absente du chenal en amont de la plage de dépôt. Le lit est profond, pavé de blocs de taille décimétrique à métrique. Des traces de dépôts, rendus cohésifs par une matrice argileuse, laissent penser que des laves torrentielles ont bien lieu sur le secteur. Ces dépôts sont incisés et parfois recouverts de dépôts granulaires et mieux triés laissant penser que des phénomènes de charriage intense ont aussi lieu régulièrement. La plage de dépôt du Gorget est équipé de trois pertuis larges qui bloqueront vraisemblablement une lave torrentielle mais qui laissent passer les flux de charriage. Sur le torrent de la Grande Ruine, un ouvrage équipé d'un pertuis unique a été observé mais ce dernier était totalement obstrué. Une autre plage de dépôt semble être située en amont sur les photos aériennes. Elle n'a pas été visitée.

Ces deux branches présentent donc une certaine activité de production sédimentaire (plus forte pour le Gorget) et alimente le chenal du Charmeyran dont le bassin versant est beaucoup plus grand. Ce dernier ne présente pas d'autres zones notables de production sédimentaire et ses apports hydrologiques "diluent" les apports concentrés des deux branches actives. En aval de leurs confluences, la pente est beaucoup moins raide que dans le lit des affluents. Le lit est encaissé en fond de vallon mais il présente des élargissements ponctuels permettant probablement une certaine régulation du transport solide. Ce tronçon est ensuite fermé par la plage de dépôt du Charmeyran où des dépôts de charriage sont bien visibles. Une pente de dépôt de 3 % y a été mesurée au télémètre laser (trupulse 300X). Cette valeur est toutefois très inférieure à la pente du chenal amont qui est de l'ordre de 10 % mais aussi inférieure 4.5 % qui est la pente moyenne du lit en aval de la plage de dépôt et en amont du point d'étude HYDRODEMO (croisement avec l'Av. du Maquis du Grésivaudan). C'est cette dernière valeur qui est utilisée dans le calcul de transport par charriage. Une granulométrie par comptage de surface (Wolman count) a aussi été réalisée dans la plage de dépôt (Tableau 8).

En aval de la plage de dépôt, la pente du Charmeyran diminue en effet progressivement et le lit du torrent est artificiel (caniveau en béton armé, mur des jardins et des maisons, section couverte vers la station de tram des Sablons où un ouvrage de dépôt numéroté COM3 était localisé sur SIG mais n'a pas été trouvé sur le terrain, il est peut-être souterrain). Dans cette partie aval, le torrent traverse de nombreuses rues via des dalots et ponts. Au droit du point d'analyse HYDRODEMO, le torrent n'a aucun espace de divagation. A la moindre obstruction par des flottants ou en cas de perte des débits liquides par débordement, il faut s'attendre à une aggradation générale dans le lit du torrent et à un emballement des dépôts qui auront traversé les plages de dépôts situées en amont.

4.3.3 Les Jaillières (METRO3)

Le lit amont du torrent des Jaillères est visiblement sujet aux laves torrentielles (lit encaissé, dépôts de blocs, absence de végétation, barrages RTM anciens supportant de gros atterrissements). La plage de dépôt la plus amont est un simple élargissement du lit. Elle n'est pas équipée d'un barrage filtrant à son exutoire (un grand barrage en béton armé en fixe le niveau de sortie). Récemment entretenue, un volume important de matériaux a été stocké sur le côté du bassin (peut-être pour former une berme maintenant les écoulements dans le bassin).

Le lit situé en aval de cette première zone de régulation du transport solide porte des traces de charriage torrentiel (érosions des dépôts végétalisés et souches apparentes, respirations torrentielles, nappes de charriages de granulométrie partiellement triée et sans matrice argileuse). La persistance d'une certaine végétation sur une partie de la section en travers démontre l'effet de régulation de l'ouvrage amont. Les traces de charriage torrentiel montrent aussi que l'ouvrage n'est pas suffisant pour capturer toute l'activité torrentielle issue de l'amont.

Plus loin en aval, au niveau du point d'étude (Pont du chemin de l'Eglise), le lit est envahi de végétation et les traces de charriages, bien que visibles, semblent clairement moins intenses qu'en amont. Le lit est équipé de barrages et seuils de correction torrentielles sur la majorité de sa longueur. L'écoulement a lieu dans un petit chenal étroit s'écoulant entre des terrasses alluviales relictuelles. On suppose qu'elles se sont formées à l'occasion de crues de charriage torrentiel passées.

A la traversée de la RD 1090, une petite plage de dépôt montre encore la présence de blocs de taille décimétrique et quelques dépôts démontrent la capacité du torrent à faire transiter des bouffées de charriage jusque dans ce secteur.

Dans sa partie terminale, le torrent coule dans un caniveau en béton ou dans un fossé de taille réduite avant de rejoindre la plage de dépôt de l'AS et les chantournes aval. On est frappé de la réduction de section hydraulique quand on compare le gabarit de ce ruisseau avec le chenal torrentiel de la partie haute du bassin versant.

4.3.4 Le Domeynon (METRO4)

Le Domeynon présente un faciès caractéristique des torrents de Belledonne dont le bassin versant s'étend jusqu'aux sommets des crêtes du massif. Il s'écoule dans un fond de vallée creusé dans les balcons du massif et a construit un cône de déjection relativement bien développé. La ville de Domène a colonisé l'ensemble de ce dernier, jusque dans la gorge située en amont de l'apex du cône de déjection où des installations industrielles présentes (usine hydro-électrique, scierie) ou passées (ruines, passages couverts végétalisés) sont l'héritage des travaux pionniers de la houille blanche à la fin du XIX^{me} siècle.

En amont de l'usine hydro-électrique, le lit du torrent fait sensiblement 5-6 m de large. Une plage de dépôt équipe le torrent à environ 850 m en amont du passage couvert du centre bourg. Les berges du torrent y sont fixées par quelques enrochements qui permettent une continuité sédimentaire des matériaux transportés pour les crues de routine. Une granulométrie et un profil en long ont été mesurés lors de la visite de terrain de Mars 2021 (Tableau 8). Ces mesures ont été réalisées entre le barrage de fermeture de la plage de dépôt et les premiers affleurements de la roche mère visibles une quarantaine de mètres en amont de l'ouvrage. En amont, des affleurements rocheux sont régulièrement visibles et maintiennent vraisemblablement un pente légèrement plus forte que l'équilibre alluvial naturel. Le lit est constitué de matériel alluvial de granulométrie étendue (diamètres mesurés 8 mm - 362 mm). Il ne fait aucun doute que le Domeynon charrie de manière régulière des matériaux dans son lit. En amont de la plage de dépôt, les versants sont très raides et connectés directement avec le lit du torrent. Toute instabilité géotechnique peut alimenter le lit du torrent de façon très efficace et augmenter la quantité de matériaux transportés vers le cône de déjection.

En aval, le lit du torrent est canalisé, couvert à de multiples reprises et des seuils en stabilisent régulièrement le profil en long. Plus en aval, le lit est endigué et perché au dessus de son lit majeur.

4.3.5 Le Verderet (METRO5)

Le lit du Verderet est profondement incisé en amont de Eybens et du piège à embâcles. Son lit est stabilisé par des seuils. Le piège à embâcles fait aussi office de plage de dépôt pour la charge sédimentaire grossière. L'existence d'un plan d'eau génère aussi probablement des dépôts d'une fraction de la charge sédimentaire en suspension. Le peigne à flottants permettra lors de crues extrêmes d'augmenter la capacité de piégeage de l'ouvrage. En aval, le lit est canalisé avant de passer dans une section couverte. Une végétation herbacée semble plus présente en aval de la plage de dépôt qu'en amont, preuve indirecte de la probable diminution forte du transport par charriage associée à l'ouvrage.

4.3.6 Le Vernon (METRO6)

Le torrent du Vernon a un lit relativement étroit et une granulométrie grossière typique des petits bassins versants du massif de Belledonne. Le lit est pavé de blocs de taille décimétrique organisés en faciès de type «cascade» ou «step-pool» (selon la classification de Montgomery et Buffington, 1997). La granulométrie a été évaluée visuellement et les valeurs fournies dans le Tableau 8 ne sont pas issues d'un véritable comptage de Wolman (d'où la gamme assez large fournie plutôt qu'une valeur précise). Le lit actif est relativement étroit et les blocs semblent peu mobiles (présence de mousse). En aval du point d'étude, le pente diminue et le cours d'eau s'écoule sur un large cône de déjection entre des merlons boisés (probablement issus d'anciens curages) ou des murets faisant office de digues. Quelques blocs décimétriques sont encore présents dans ces secteurs mais la granulométrie moyenne est alors plutôt d'ordre centimétrique.

4.3.7 Le Prémol (METRO7)

Le torrent du Prémol ressemble à son voisin le Vernon. Son cône de déjection s'étend assez loin dans le vallon jusqu'en haut du lieu dit de «la Gorge» où une scierie est située. Sa pente reste raide et régulière jusqu'au débouché dans la vallée, preuve d'une activité torrentielle passée significative. On distingue de nombreux blocs métriques dans le lit et sur les berges. Le lit actif est toutefois ici aussi relativement étroit et pavé de structures stables. Les blocs d'aspect arrondi, la présence de mousse et le bon état de la végétation des rives laisse penser que l'activité de charriage est relativement limitée pour les crues de routine. La granulométrie a été là aussi évaluée visuellement et les valeurs fournies dans le Tableau 8 ne sont pas non plus issues d'un véritable comptage de Wolman (d'où la gamme

assez large fournie plutôt qu'une valeur précise).

4.3.8 Le Lavanchon (METRO8)

Le bassin versant du Lavanchon est déjà relativement large au droit de la plage de dépôt RTM que la branche de l'Echarina alimente en laves torrentielles. Un ouvrage de dérivation prévient une reprise importante des dépôts de l'Echarina par les eaux claires du Lavanchon amont. En aval on retrouve d'abord un tronçon relativement raide où le lit est incisé dans des dépôts fluviaux glaciaires et des gros blocs sont visibles dans les berges. Le lit du Lavanchon retrouve ensuite le niveau du fond de vallée, traverse de nombreuses zones à enjeux et routes. Des seuils en stabilisent régulièrement le fond. Le lit est clairement alluvionnaire. Deux granulométries et deux profils en long ont été réalisés sur le cours d'eau. Un premier levé a été réalisé en amont du pont du Chemin des Buissons. Il est considéré représentatif des deux points d'analyse situés en amont (Lavanchon amont et Lavanchon intermédiaire). Un second levé a été réalisé en amont direct de la traversée de l'autoroute, c'est à dire au point d'analyse Lavanchon aval.

4.3.9 Le Rif Talon (METRO9)

Le Rif Talon est petit cours d'eau des coteaux du Vercors. Les dérochoirs de sa tête de bassin alimentent ce dernier en sédiment. Son bassin versant globalement raide permet la propagation de cette charge solide. Le cône de déjection est très développé et assez raide. Il s'étend jusqu'en amont du hameau de Malhivert et de la plage de dépôt. Les dépôts dans cette dernière sont constitués de blocs décimétrique de calcaire encore anguleux ainsi que de graviers centimétriques. Des traces de divagation et d'érosion de la végétation herbacée démontrent une activité de transport solide régulière. Le lit en aval de la plage de dépôt RTM est étroit, de l'ordre de 1-2 m au fond, ce qui est cohérent avec la petite taille du bassin versant amont et un transport par charriage en aval de l'ouvrage. Des traces évidentes d'incision sont en effet visibles. La raideur du profil et la distance assez forte entre les ouvrages de dépôt et les enjeux doit permettre à des érosions de se développer.

4.4 Descripteurs morphologiques principaux

Les descripteurs géomorphologiques ont été extraits tel que décrit dans les chapitres précédents. Les torrents ont été classés selon la typologie de Wilford et collab. (2004) qui discrimine les torrents à laves torrentielles («*debris flows*»), les torrents à charriage torrentiel («*debris floods*») et les torrents à charriage («*bedload*») sur la base de la longueur du chenal principal et de l'indice de Melton (voir Fig. 12). Le Tableau 9 rassemble les résultats de ces extractions et de la classification.

Table 9 – Synthèse des principales caractéristiques géormorphologiques des bassins de la METRO

Torrent	Identifiant	A	M	R_{ZP}	$IC95_{ZP}$	S_{CE}	Classes
Le Lanfrey	METRO1	6.45	0.64	2.1	-3.647	0.037	debris flood
Le Charmeyran	METRO2	4.43	0.53	1.8	-3.171	0.059	debris flood
Les Jaillières	METRO3	0.88	0.99	18.2	-2.747	0.144	debris flow
Le Domeynon	METRO4	46.17	0.37	0.1	-3.890	0.040	debris flood
Le Verderet	METRO5	14.78	0.17	0.3	-4.815	0.024	bedload
Le Vernon	METRO6	6.10	0.72	2.0	-3.491	0.138	debris flood
Le Premol	METRO7	11.60	0.49	0.5	-3.595	0.103	debris flood
Le Lavanchon (amont)	METRO8a	16.18	0.41	4.9	-3.457	0.036	debris flood
Le Lavanchon (intermédiaire)	METRO8b	20.63	0.37	4.2	-3.661	0.035	debris flood
Le Lavanchon (aval)	METRO8c	25.94	0.34	3.5	-4.105	0.009	debris flood
Le Rif Talon	METRO9	4.07	0.78	5.1	-3.309	0.106	debris flood

4.5 Prédiction de l'activité torrentielle par approche géomorphologique

Nous avons réalisé des estimations des volumes de production de sédiments pour des évènements de référence et de période de retour décennal au niveau des exutoires étudiés. Les estimations ont été réalisées à partir des équations (12a-12e), (11a-11e) pour V_{ref} et V_{10}, respectivement, ainsi que du modèle *random forests* (formulation du modèle 2). A titre de comparaison, nous avons également réalisé les prédictions avec d'autres méthodes existantes couramment utilisées en milieu torrentiel. Les méthodes utilisées sont présentées dans le Tableau 1 et comprennent notamment les différents modèles ECsTREM. Ces méthodes sont de divers types (courbes enveloppes ou prédictions moyennes). Elles sont principalement dédiées à la prédiction de volumes de référence (maximums observés, e.g., Rickenmann (1997), Kronfellner-Krauss (1985) ; évènements exceptionnels, i.e., T>100, e.g., D'Agostino (1996) et D'Agostino et al. (1996), ou volume centennal, e.g., Takei (1984)). Nous avons également estimé le volume décennal lorsque les méthodes le permettent.

La Figure 31 rassemble les résultats obtenus pour chaque torrent et fait apparaître une forte dispersion des estimations. Les différents modèles ECsTREM sont notés «ECsTREM mixte» pour les modèles construits sans distinction de processus de transport solide, «ECsTREM laves torrentielles» pour les modèles spécifiques aux laves et «ECsTREM maximum» pour les modèles construits à partir des maximums observés. Les valeurs de volumes obtenues à partir des applications des méthodes développées en Italie, en Suisse, en Autriche et au Japon sont généralement très supérieures à celles obtenues par les méthodes développées en France (sauf pour les valeurs obtenues par le modèle ECsTREM calé sur les valeurs maximales). Ceci est le résultat direct de leur mode de construction (courbes enveloppes, évènements rares ou évènements de période de retour centennale). Ces valeurs peuvent parfois varier d'un ordre de grandeur. Les valeurs prédites par nos différents modèles de régression sont toujours très comparables (attention toutefois à noter que l'axe est logarithmique et qu'un faible décalage peu aisément être associé à une différence d'un facteur 2 ou 3). Les modèles HydroDemo ayant tous été calés sur le même échantillon, il n'est pas surprenant que les prédictions soient assez homogènes. Le modèle *random forests* fournit des prédictions parfois différentes de ces derniers mais reste dans un même ordre de grandeur. On note également que les prédictions de la méthode ECsTREM sont assez proches des prédictions de nos modèles mais généralement plus faibles. Nous avons confronté ces estimations avec des données d'observations historiques lorsque les bassins versants en possédaient.

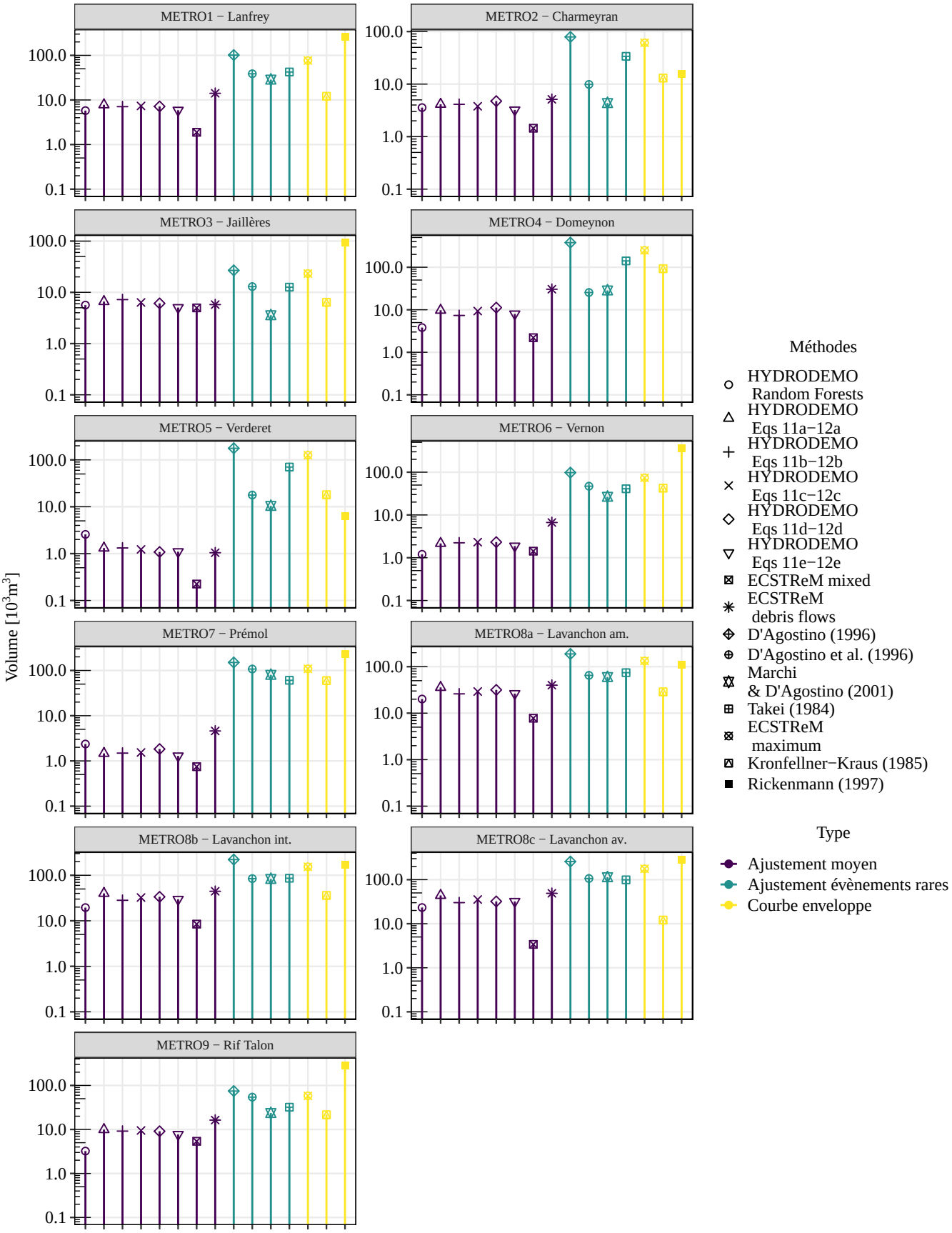


FIGURE 31 – Comparaison des prédictions de V_{ref} selon les différentes méthodes existantes.

Le Lanfrey (METRO1) Le Lanfrey n'a pas pu être comparé compte tenu de l'absence d'estimation de volume pour les évènements historiques. On note toutefois que les estimations obtenues par les différentes méthodes sont largement supérieures au volume d'apport par charriage décennal et centennal estimés par HYDRETUDES (2012a) qui sont de 160 m^3 de 310 m^3, respectivement. Les estimations des modèles HydroDemo varient globalement peu. Elles sont comprises dans la gamme 5800–7800 m^3, une estimation assez supérieure à celle proposée par le modèle ECsTREM pour les torrents mixtes (1900 m^3). Le modèle d'ECsTREM dédié aux laves torrentielles et les modèles calés sur les évènements rares et sous forme de courbes enveloppes surestiment très largement la production observée, ce qui pouvait être anticipé.

Le Charmeyran (METRO2) Concernant le Charmeyran, les estimations de V_{ref} par nos modèles (*random forests* et équations) varient entre 3200 et 4700 m^3 et sont par conséquent assez proches du volume de la lave torrentielle observé en 1986 (environ 2500 m^3). A titre de comparaison, les méthodes ECsTREM «mixte» et «laves torrentielles» ainsi que de Marchi et D'Agostino (2004) estiment le volume de référence à 1400 m^3, 5100 m^3 et 4300 m^3, respectivement, soit des gammes de valeurs cohérentes. Les autres méthodes, calées pour des évènements rares ou maximaux prédisent des volumes supérieurs à ≈10 000 m^3. Les volumes décennaux (estimés par nos méthodes et la méthode ECsTREM) sont inférieurs au volume de l'évènement (entre 800 et 1600 m^3).

Les Jaillières (METRO3) Pour le torrent des Jaillières, les estimations de nos modèles (*random forests* et équations) varient de 5000 à 7200 m^3 et sont comparables avec le volume de référence de l'EBR pour la partie amont du bassin versant (5000 m^3). Nous pouvons comparer nos estimations avec le volume de référence de la partie amont dans la mesure où le bassin versant aval ne draine pas de source sédimentaire significative supplémentaire. Les méthodes ECsTREM («mixte» et «laves torrentielles»), de Marchi et D'Agostino (2004) et de Kronfellner-Kraus (1985) sont aussi comparables (5000 m^3, 5700 m^3, 3600 m^3 et 6400 m^3, respectivement). Les autres méthodes semblent naturellement sur-estimer les prédictions $V_{ref} > 12\ 000\ m^3$.

Le Domeynon (METRO4) Pour le Domeynon, les estimations de nos modèles (entre 3800 et 11 000 m^3 pour les modèles *random forests* et régressions) se situent en deçà du volume estimé pour l'évènement de 2005 (19 000 m^3- Alp'Géorisques, 2007, p. 37). On note une forte variabilité des estimations dans nos modèles ainsi que dans les estimations des autres méthodes (estimations variant de 2200 m^3 pour ECsTREM «mixte» à 25 000 m^3 pour D'Agostino et al. (1996) et 28 000 m^3 pour Marchi et D'Agostino (2001), certaines formules donnent des ordres de grandeurs aberrants $V_{ref} > 100\ 000\ m^3$). La variabilité des prédictions dans nos modèles est probablement due à la très faible zone de production du bassin versant du Domeynon. Ces derniers sont donc plus sensibles aux autres paramètres des modèles. La superficie de bassin versant du Domeynon est particulièrement grande provoquant des sur-estimations de V_{ref} pour les méthodes basées essentiellement sur ce paramètre (par ex. Takei (1984) et D'Agostino (1996)). Les volumes décennaux sont également variables, allant de de 1200 à 8800 m^3 suivant les modèles.

Le Verderet (METRO5) Le Verderet ne possède pas d'évènements permettant une comparaison de nos estimations. Le rapport HYDRETUDES (2012c) estime les volumes transportés par charriage de 1200 m^3 et 2500 m^3 pour des évènements décennal et centennal, respectivement. On note que les estimations de V_{10} et V_{ref} par nos modèles sont du même ordre de grandeur que les volumes proposés par HYDRETUDES (2012c), les estimations du modèle *random forest* étant particulièrement proches (V_{10} varie entre 400 et 500 m^3 pour les équations (11a-11e), $V_{10} = 1200\ m^3$ pour le modèle *random forests*, $V_{10} = 180\ m^3$ pour ECsTREM «mixte» ; V_{ref} varie entre 1100 et 1300 m^3 pour les équations (12a-12e), $V_{ref} = 2600\ m^3$ pour le modèle *random forests* et $V_{ref} = 220\ m^3$ pour ECsTREM «mixte»).

Les autres méthodes, tout à fait inadaptées à ce type de bassin versant de basse montagne surestiment naturellement le volume de référence ($V_{ref} > 6400$ m^3).

Le Vernon (METRO6) Le Vernon ne possède pas de données permettant de confronter nos estimations. Les prédictions de nos modèles sont particulièrement faibles (entre 1200 m^3 et 2300 m^3 pour V_{ref}) et cohérentes avec l'estimation du modèle ECsTREM dédié aux torrents «mixte» (1400 m^3). Le modèle ECsTREM «laves torrentielles» aboutit naturellement à une estimation supérieure (V_{ref} = 6600 m^3) et les méthodes étrangères, calées sur des torrents très actifs, fournissent des estimations très supérieures ($V_{ref} > 40\ 000$ m^3). Cela est cohérent avec la taille et la pente du bassin versant qui lui donnent un potentiel important, à condition que la fourniture sédimentaire soit disponible. Le caractère boisé du bassin versant prévient ainsi l'expression de son potentiel torrentiel. Le paramètre de ratio de zone de production est faible, $R_{ZP} = 2$ % et ce point n'est pas pris en compte dans la plupart des méthodes étrangères.

Le Prémol (METRO7) Comme pour le Vernon, les estimations de nos modèles sont très faibles (V_{ref} varie entre 1200 m^3 et 2400 m^3). Ces valeurs sont intermédiaires entre les méthodes ECsTREM «mixte» et «laves torrentielles» (700 m^3 et 4600 m^3). Ces estimations sont cohérentes avec les 2 300 m^3 de transport par charriage estimé après la crue de Août 2005 (Alp'Géorisques, 2007, p. 37) mais sont largement en deçà du volume observé lors de l'évènement de 1783 (70 000 m^3). Les estimations de V_{ref} obtenues par les autres méthodes semblent plus proches de cette observation historique (par ex. V_{ref} = 60 000 m^3 avec la méthode de Takei (1984)). Toutefois, il faut garder à l'esprit que les méthodes développées dans le cadre de HYDRODEMO n'ont pas été calées dans des bassins versants à glissements de terrain. Elles se basent principalement sur le ratio de surface en érosion et sont donc inadaptées à la prédiction des volumes événementiels des torrents alimentés par des glissements de terrain concernant des zones végétalisées (boisements ou prairies). La réactivation des glissements de terrain étant parfois incertaine, les méthodes HYDRODEMO peuvent être utilisées dans le cadre de scénarios faisant l'hypothèse que les glissements de terrains ne sont pas réactivés. Des scénarios de crues complémentaires doivent être envisagés pour prendre en compte l'activation des zones de glissement et les volumes mobilisés seront dans ce cas à évaluer différemment.

Le Lavanchon (METRO8) Pour le Lavanchon, les résultats des prédictions ne peuvent pas être confrontés à des observations historiques au niveau des exutoires étudiés. L'EBR estime des volumes de référence d'environ 20 000 m^3 pour les laves torrentielles et d'environ 4000 [3] pour les crues de charriage en amont de la plage de dépôt (ONF-RTM, 2019b). Ces estimations doivent être prises avec du recul car une contribution des zones de productions identifiées dans les bassins versants situés en aval de la plage de dépôt pourrait s'y ajouter. Dans sa partie la plus en aval (METRO8c), les estimations des modèles HydroDemo varient de 23 000 à 44 000 m^3. La méthode ECsTREM pour les torrents «mixte» donne une estimation intéressante de 3400 m^3. Les autres méthodes sont inadaptées au contexte (pente faible) et fournissent naturellement des surestimations. Les visites de terrain réalisées sur le Lavanchon ont permis d'identifier plusieurs zones de production qui sont en réalité déconnectées (fond de vallée très plat), bien que des talwegs drainent ces surfaces. Il s'agit des surfaces en érosion drainées par le torrent de la Lampe et de celles qui se trouvent à proximité du lieu dit «Les Combes» (cf. Annexe A). Cela génère une surestimation des prédictions des modèles utilisant le paramètre de zone de production. Ce résultat met en lumière la nécessaire analyse critique et l'étape de validation manuelle du caractère "connecté" ou «déconnecté» des zones en érosion (§ 2.2.4). Les critères fournis sont à utiliser en première approche, avant visite de terrain et validation contradictoire, et *en aucun cas comme des critères absolus*. Après une première étape de pré-identification des zones de production sur la base des critères proposés en section 2.2, le classement doit être validé sur la base d'observations de terrain. Dans le cas du Lavanchon, il ne fait aucun doute que la géomorphologie très plate de la

vallée et l'existence d'ouvrages de correction torrentielle et de sédimentation, déconnecte ces zones de production intermédiaires situées en rive droite du drain principal. Elles doivent donc être considérées comme déconnectées dans l'application de la méthode.

Le Rif Talon (METRO9) Dans la mesure où le bassin versant aval ne draine pas de source sédimentaire significative supplémentaire, nous pouvons comparer nos prédictions aux observations historiques et à l'EBR de la partie amont (ONF-RTM, 2014). Les observations historiques font état d'une lave torrentielle d'environ 1500 à 2000 m^3 dans la partie amont du bassin versant. L'EBR estime également un volume de référence à 4000m^3. Les volumes de référence prédits par les équations (12a-12e) varient de 7700 à 9900 m^3. Les modèles *random forests* et ECsTREM «mixte» estiment le volume de référence à 3300 m^3 et 5400 m^3, respectivement. Les autres méthodes, plutôt calées sur des évènements rares ou extrêmes prédisent des volumes supérieurs à 16 000 m^3.

Réflexion générale Lorsque les prédictions ont pu être confrontées à des observations historiques, on constate que les prédictions de nos modèles (Eqs. 12a-12e et *random forests*) sont assez cohérentes avec les volumes observés. Les sous-estimations de nos modèles dans le bassin versant du Prémol soulignent les limites d'application de ce type de modèle dans les bassins versants où l'activité torrentielle est principalement associée à l'activité de glissement de terrain.

Les fortes variabilités des estimations obtenues par les différentes méthodes testées peuvent provenir des spécificités régionales des échantillons de données étudiés (par ex. climats, disponibilité des matériaux). A l'exception de la méthode ECsTREM, on constate que les autres méthodes surestiment le volume de production sédimentaire par rapport à nos modèles. Comme mentionné dans le Tableau 1, certaines méthodes ont été calées à partir d'observations de laves torrentielles de forte magnitude et ont été construits sous forme de courbe enveloppe plutôt que par des ajustements sur les tendances moyennes. Ces méthodes ont été développées dans des bassins à fortes fournitures sédimentaires et ne considèrent donc pas ce paramètre de fourniture sédimentaire dans les modèles. Ainsi, il faut garder à l'esprit que les torrents analysés se trouvent pour certains à la limite du domaine de validité d'application de ces méthodes (voire loin hors de ce dernier). En effet, ces méthodes ont été développées dans des bassins à fortes pentes et fournitures sédimentaires ce qui n'est pas le cas de certains torrents de la METRO.

Malgré son développement sur un échantillon de bassin versant plutôt plus érosif et plus petit que celui d'HydroDemo (cf. Fig. 13i–j), la méthode ECsTREM se montre très complémentaire des modèles HydroDemo et fournis, via ses deux modèles pour les torrents «mixte» et à «laves torrentielles» des estimations qui encadrent généralement les valeurs prédites par les modèles HydroDemo. Malgré le recouvrement partiel de l'échantillon utilisé pour développer les approches proposées par HydroDemo avec l'échantillon ECsTREM, les estimations sont souvent assez différentes et complémentaires. Les deux approches peuvent ainsi être utilisées en parallèle (ainsi que les autres formules du Tab. 6 quand le bassin versant se situe dans le domaine d'application) pour prédire une gamme d'estimations empiriques de la production sédimentaire. Ces estimations ne sont pas exemptes de biais et doivent évidement être confrontées à d'autres approches indépendantes dans toutes études sérieuses d'un système torrentiel.

4.6 Prédiction des volumes événementiels par calculs de transport par charriage

En complément des estimations événementielles par approche géomorphologique, des estimations des volumes potentiellement transportés par charriage ont été réalisées au droit des points d'analyse où de tels calculs avaient du sens (hors des zones de transport par lave torrentielle, disponibilité de données granulométriques, de pente et de largeur).

4.6.1 Comment appliquer les formules d'estimation du transport solide par charriage ?

Cette section vise à rappeler quelques éléments sur l'application des formules d'estimation du transport solide par charriage. Les sections suivantes décrivent les formules que nous utilisons quand nous sommes amenés à réaliser l'exercice. D'autres formules existent évidement dans la littérature. Elles sont issues de jeux de données et approches de calibration variées. Il est du ressort des utilisateurs d'en définir, avec l'expérience, les domaines d'application, le potentiel et les limites. L'objet de cette section n'est pas de commenter l'utilisation préférentielle d'une formule par rapport à une autre (voir sur ce point le travail de Recking et collab., 2013). Les formules de calcul du transport par charriage usuelles ont toutefois été élaborées de façon similaire : ajustement sur un échantillon de mesures d'une formule impliquant des paramètres descripteurs hydrauliques (hauteur, vitesse, nombre de Froude) et géomorphologiques (pente, granulométrie, largeur) pour estimer une capacité de transport.

L'application des formules de la littérature au contexte torrentiel pose régulièrement problème pour plusieurs raisons, citons entre autres : les effets des pavages, les incertitudes sur les granulométries transportées, des processus incertains et/ou intermédiaires entre laves torrentielles et charriage, ou encore le manque chronique de données d'observation. Les paragraphes qui suivent tentent de pointer les liens qu'il nous semble important de faire entre la géomorphologie du cours d'eau et le calcul du transport solide par charriage. La Figure 32 identifie par exemple quatre contextes géomorphologiques caractéristiques où l'approche pourrait éventuellement être abordée de façon un peu différente (Piton et Recking, 2017). Ces contextes sont caractérisés par la présence ou l'absence d'un pavage peu mobile dans la section étudiée (AA' ou BB' dans la Figure 32) et par un couplage plus ou moins fort avec les apports des versants ou des zones alluvionnaires amont :

- *Un système alluvial* correspond à un bief de cours d'eau dans lequel les matériaux du lit et les matériaux transportés sont globalement les mêmes et sont assez mobiles. C'est la situation classique dans le contexte fluvial. C'est le domaine où l'application des formules de charriage est la moins incertaine ;
- *Un système semi-alluvial* comprend des tronçons alluvials séparés de zones pavées où la granulométrie du lit est plus grossière (correspondant souvent à des gorges où le lit est confiné et plus raide), mais où les matériaux transportés sont en fait principalement issus de la dynamique alluvionnaire amont. Dans ce cas de figure, il est très probable que la granulométrie transportée soit sensiblement celle mesurée dans la section AA' et qu'elle soit significativement plus fine que celle mesurée dans le lit de la section BB' ;
- *Un système non-alluvial* est caractérisé par un lit pavé de matériaux très grossiers et par des sources sédimentaires de versant virtuellement inactives : les matériaux transportés par charriage correspondent alors bien à ceux du lit. Le transport solide est alors usuellement très faible en conséquence du caractère très grossier des éléments à transporter et de la présence marginale des fractions plus fines (graviers et sables). Ceci reste vrai aussi longtemps que les sources sédimentaires restent inactives, ce qui peut changer à l'occasion d'évènements extrêmes ;
- *Un système colluvial* est caractérisé par un lit pavé et des sources sédimentaires exogènes alimentant le lit de façon erratique avec des matériaux plus fins que ceux du pavage (glissements de terrains, affluents torrentiels, dérochoirs). Ici encore, la granulométrie transportée est usuel-

lement plus fine que celle mesurée dans le lit pavé du cours d'eau. L'estimation du transport solide par charriage dans ce contexte est complexe parce que le transport réel dépend en fait principalement de l'activité des sources sédimentaires.

Ces catégories ne sont évidement pas figées dans le temps. Comme discuté par Piton et Recking (2017), des sites alimentés par des sources actives de façon épisodiques peuvent osciller périodiquement entre le fonctionnement *colluvial* (source actives) et *non-alluvial* (apports solides au chenal épuisé). A l'occasion d'un dépavage généralisé, il est aussi possible de voir un système *non-alluvial* devenir transitoirement un système *alluvial*. Ou des apports massifs de versants ou des berges peuvent permettre la métamorphose d'un système *semi-alluvial* en système *alluvial*. C'est par exemple le cas de la Vésubie (Alpes-Maritimes) suite à la tempête Alex d'Octobre 2020.

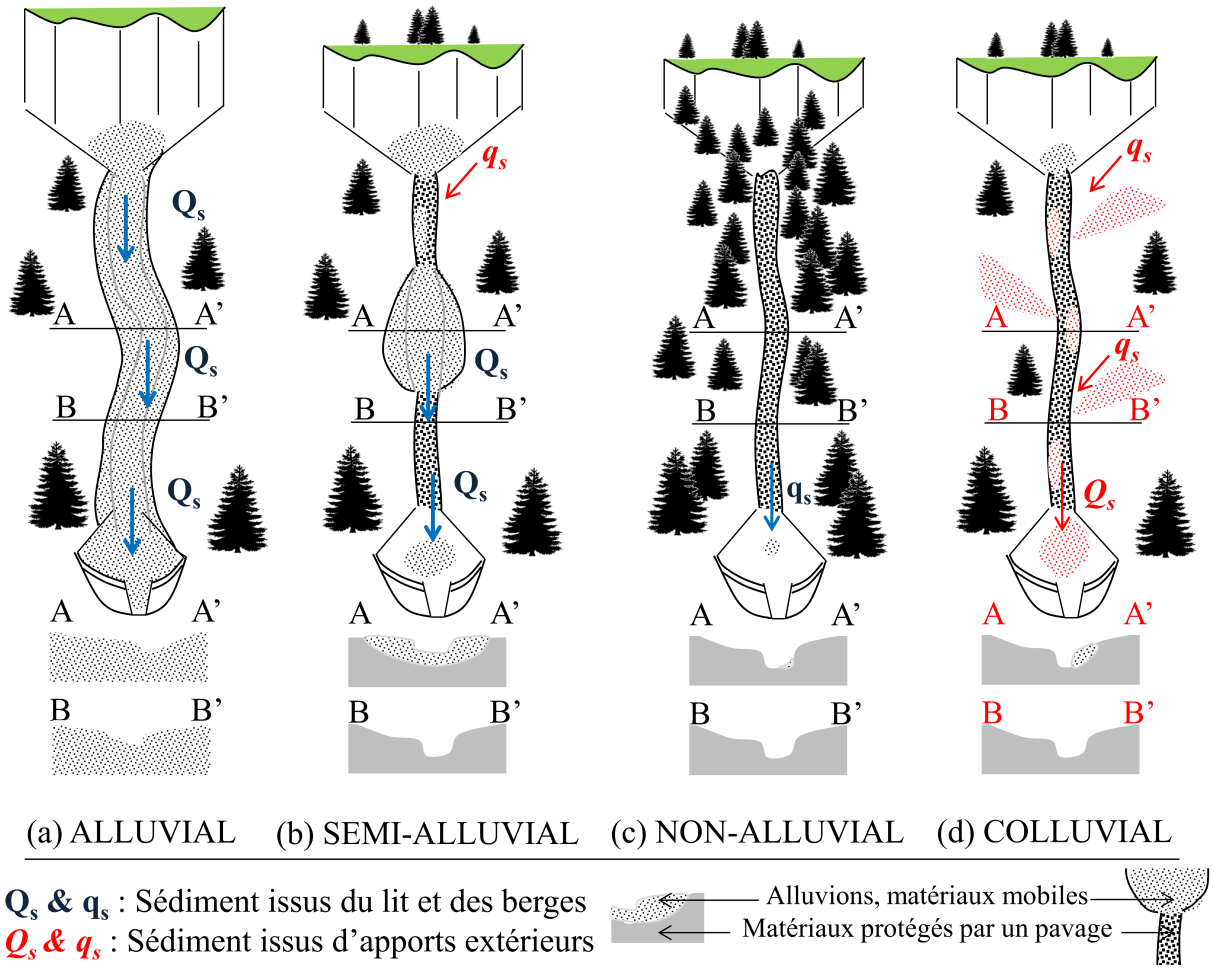


FIGURE 32 – Schémas synthétiques des contextes géomorphologiques les plus classiques des systèmes torrentiels. Figure traduite de Piton et Recking (2017).

On retiendra que dans les systèmes torrentiels :

— Les phénomènes de pavages amènent les granulométries à varier beaucoup plus qu'en contexte fluvial et rendent la valeur de tout indice basé sur la granulométrie partiellement incertain ;
— Ces même pavages et la pente associée qui est généralement forte permettent, souvent mais pas tout le temps, le transit de la charge charrié sur des secteurs avec des effets morphologiques marginaux ; et
— la proximité des sources sédimentaires et les connectivités sédimentaires fortes avec ces dernières imposent de s'intéresser à leur activité.

En conséquence, avant de s'aventurer à calculer le transport par charriage, nous pensons qu'il est important sur les sites torrentiels de définir des *scénarios de crue*. Ces scénarios de crue ne sont pas seulement définit par un hydrogramme, ils sont aussi associés à une description qualitative (et éventuellement quantitative) du mode de fonctionnement géomorphologique du bassin versant : «*Dans le cadre du scénario A, les matériaux transportés sont issus de tel secteur par érosion du lit et des berges. Au contraire, le scénario B correspond à la réactivitation du glissement dans tel autre tronçon impliquant des matériaux ...*».

Il est alors possible que plusieurs hypothèses de granulométrie et de pente contrôlant le transport solide apparaissent dans les différents scénarios de crue. Des volumes de charriage assez variés peuvent résulter de ces différents scénarios et il est souvent posé la question de la période de retour associée. Deux approches peuvent alors être retenues :

— Sur des sites très torrentiels et plutôt bien documentés, il est commun d'évaluer la période de retour d'un évènement au prisme du volume solide plutôt que du pic de crue (voir par exemple Jakob et Friele, 2010). Si une étape de calcul du transport solide est impliquée, visant par exemple à produire un hydrogramme solide, il faut s'assurer du réalisme des forçages hydrologiques et sédimentaires utilisés pour atteindre le volume solide visé. D'une information univariée (un volume donné associé à une période de retour donnée), on aboutit à des informations plus détaillées (série temporelle, paramètre granulométrique) basées sur des hypothèses qu'il convient toujours d'expliciter (scénario géomorphologique, formule de transport). Voir Piton et collab. (2019) sur cas d'étude d'un bassin versant granitique rarement actif.
— Sur des sites peu documentés, l'information est insuffisante pour générer une courbe magnitude - fréquence et le problème est inversé : des évènements hydrologiques sont pris en données d'entrées ainsi que un ou plusieurs scénarios géomorphologiques. S'ils aboutissent à des volumes transportés équivalents, l'attribution d'un volume solide donné à la période de retour étudiée est simple. Si les hypothèses sur les scénarios géomorphologiques sont prépondérantes, il faut tenter d'assigner une probabilité à ces derniers. Cette étape fait l'objet de développement en cours en parallèle du projet HYDRODEMO (Mazzorana et collab., 2011, proposent une approche intéressante sur ce point). Soulignons simplement qu'il est souvent possible de s'en tenir à un petit nombre de scénarios : les scénarios géomorphologiques possibles mais peu probables ayant des probabilités d'occurrence très faibles (crue peu fréquente et scénario géomorphologique peu probable sont conjointement très peu probables, voir là aussi Mazzorana et collab., 2011).

Nous pensons les éléments présentés plus haut assez généralisables aux petits bassins versants torrentiels et décrivons dans la suite l'approche que nous suggérons de suivre.

4.6.2 Estimation de la capacité de transport par charriage

Le volume total charrié peut être calculé par intégration du transport solide instantané estimé par la formule adéquate sur l'ensemble de la crue. Le calcul est mené sur une section (ou plusieurs) où l'écoulement est limité à la largeur du lit : si une partie non négligeable du débit passe par le lit majeur, l'approche suivie n'est plus applicable. On rencontre le même problème sur les sections de rivières torrentielles de géomorphologie divaguante ou à tresses : l'écoulement a une largeur au miroir

importante mais le transport solide a, en réalité, lieu principalement dans une veine fluide ou un chenal particulier. Nos travaux montrent que c'est seulement à cette largeur qu'il faut appliquer la formule de transport (Recking et collab., 2016). Dans ces cas de figure, il est possible d'utiliser la plateforme en ligne `https://www.bedloadweb.com/`. La plateforme `Bedloadweb` permet un calcul en deux temps : (1) calcul de l'écoulement sur des profils en travers de forme arbitraire, et (2) estimation de la capacité de transport par charriage sur la largeur active définie par l'utilisateur. Nous recommandons son utilisation dans les cas de lits larges et/ou de forme complexe et pour des analyses plus fines. Dans le cas de lits relativement étroits, de forme classique et où l'ensemble de l'écoulement reste confiné à un chenal bien défini où le transport solide a lieu sur l'ensemble de la largeur, il est possible de se limiter à un calcul plus simple avec une valeur moyenne de hauteur d'eau h et un paramètre de Shields τ^* à l'échelle de la section, c-à-d. calculé sur toute la largeur W. Le paramètre de Shields τ^* est souvent estimé avec la formule suivante :

$$\tau^* = \frac{R \cdot S_{CE}}{(\rho_{rock}/\rho - 1) \cdot D_{84}} \approx \frac{h \cdot S_{CE}}{(\rho_{rock}/\rho - 1) \cdot D_{84}} \tag{14}$$

avec R le rayon hydraulique (m). Le paramètre de Shields τ^* est très fortement corrélé à la mobilité des sédiments. C'est une façon de représenter le taux de contrainte adimensionnalisé de l'écoulement sur le lit alluvionnaire : plus la pente est raide et la lame d'eau est épaisse, plus l'écoulement applique un taux de contrainte fort au lit sédimentaire ; plus la densité déjaugée des sédiments est forte et plus ces derniers sont gros, moins ils sont faciles à entraîner. Nous calculons τ^* avec le D_{84} parce qu'il a été démontré à plusieurs reprises que la mobilité de la fraction grossière du lit est assez représentative de la mobilité de l'ensemble du lit (voir par exemple MacKenzie et collab., 2018, pour une explication plus détaillée).

Nous estimons la capacité de transport Q_s avec l'équation de Recking (2013b) qui a la forme générale suivante :

$$Q_s = W\sqrt{g(\rho_s - 1)D_{84}^3}\frac{\rho_{rock}}{\rho_{sed}}\frac{14\tau^{*2.5}}{1 + (\tau_m^*/\tau^*)^4} \tag{15}$$

avec Q_s transport solide volumique apparent (m^3/s), W largeur du cours d'eau (m), g accélération de la gravité (9.81 m/s^2), ρ_{rock} et ρ_{sed} densités de la roche et densité apparente des sédiments (-), D_{84} quantile 84% de la courbe granulométrique (m), τ^* paramètre de Shields (-), et τ_m^* paramètre de transition entre le transport partiel et le transport total (-).

L'équation de Recking, introduite par Recking (2013b), a été calée et validée sur un jeu de données très large comprenant de nombreuses données de mesure de charriage sur le terrain ainsi que des données de laboratoire. Contrairement à de nombreuses autres formules, elle n'intègre pas de «seuil de début de transport». L'utilisation de la notion de seuil de début de transport est un héritage des premiers travaux d'étude du charriage qui utilisaient des granulométries uniformes. En granulométrie uniforme, on observe en effet une transition relativement nette entre un transport nul et un début de transport. Les mesures sur le terrain dans les rivières à graviers montrent que les granulométries sont toujours étendues. Ces mêmes mesures démontrent que la notion d'un seuil de début de transport en granulométrie étendue est une vue de l'esprit. Il y a plutôt une réduction très marquée du transport quand seuls les grains les plus petits sont éventuellement mis en mouvement et que les gros éléments restent immobiles (phase de transport partiel) [21]. Mais le transport n'est pour ainsi dire jamais nul.

21. C'est une des raisons pour laquelle la plupart des autres formules de transport solide surestiment chroniquement le transport solide pour des évènements fréquents observés. En théorie l'application des formules de transport solide aux systèmes *non-alluvial* est possible puisque les matériaux transportés sont bien ceux du lits. L'étendue granulométrique y est toutefois très large ($D_{84}/D_{50} \gg 1$). Il est plus probable qu'une formule soit adaptée à ce contexte si elle prend en compte le calcul de taux de transport très faible associé à un transport très partiel des éléments du lit qui est associée à la présence du pavage.

A l'opposé du spectre des écoulements, on rencontre la phase de transport totale pendant laquelle l'ensemble du lit est en mouvement. La formule de Recking a été construite avec une connaissance fine de ces deux phases de transport. Elle est en fait construite avec deux branches asymptotiques :

- Quand $\tau^* \ll \tau^*_m$, $\frac{14\tau^{*2.5}}{1+(\tau^*_m/\tau^*)^4} \rightarrow \frac{14\tau^{*6.5}}{\tau^{*4}_m}$ qui est une branche asymptotique pour les faibles transports. Sans marquer un seuil absolu de transport nul, le taux de transport estimé devient extrêmement faible pour de faibles conditions d'écoulement (rappelons que $\tau^* \ll 1$ donc $\tau^{*6.5} \rightarrow 0$).
- Quand $\tau^* \gg \tau^*_m$, $\frac{14\tau^{*2.5}}{1+(\tau^*_m/\tau^*)^4} \rightarrow 14\tau^{*2.5}$ qui est une branche asymptotique pour la phase de transport totale. Elle a été calée sur des données de laboratoire parce que les mesures de transport solide de terrain dans de telles conditions d'écoulement sont très difficiles à mener et sont donc très rares. Recking (2013a) a montré qu'utiliser des données de laboratoire pour exprimer les forts taux de transport semble raisonnable parce que de nombreux phénomènes tendent à disparaître dans ces conditions au profil d'un lit globalement mobile (ségrégation, variation de l'efficacité de transport en fonction de l'état de surface, répartition spatiale très variable des taux de contrainte, effets des non-linéarités très marqués quand $\tau^* < \tau^*_m$). C'est plutôt pour des conditions de transport faible que l'utilisation sur des cas de terrain de formules calées en canal est très incertaine (Recking et collab., 2013).

La formule de Recking a donc une forme fixe et un paramètre unique τ^*_m qui marque la zone de transition entre transport partiel et transport total. Recking et collab. (2016) ont montré que cette zone de transition était dépendante de la géomorphologie du cours d'eau. Trois approches de calcul de la capacité de transport par charriage sont donc présentées ici en fonction de la typologie du cours d'eau. L'estimation de la hauteur d'eau ou du rayon hydraulique posant aussi toujours question (forme de profil en travers détaillée ou simplifiée ?, loi de frottement de Manning-Strickler ou approche adaptée aux fortes rugosités ?), nous fournissons aussi la formule que les auteurs recommandent pour l'estimation de τ^*.

Dans les biefs de pente faibles (pente<3 %) où le faciès est de type «*pool-and-rifle*» (Montgomery et Buffington, 1997), le système est généralement de type *alluvial* (au sens de la Figure 32) et des bancs de sédiments se développent. Dans ces cas de figure, la capacité de charriage instantanée peut être estimée en calculant les paramètres de la formule comme suit :

$$\tau^* = \frac{S_{CE}}{(\rho_{rock}-1)\cdot D_{84}\cdot\left(2/W + 74\cdot p^{2.6}(g\cdot S_{CE})^p\cdot(Q/W)^{-2p}\cdot D_{84}^{3p-1}\right)} \tag{16a}$$

$$\tau^*_m = (5\cdot S_{CE}+0.06)(D_{84}/D_{50})^{4.4\sqrt{S_{CE}}-1.5} \tag{16b}$$

avec D_{50} quantile 50 % de la courbe granulométrique (m) et p paramètre de la loi de frottement avec $p = 0.24$ pour $Q/\left(W\sqrt{g\cdot S_{CE}\cdot D_{84}^3}\right) < 100$ et $p = 0.3$ le cas échéant (-).

Dans les tronçons de cours d'eau plus raides (3 %<pente<10 %) et dont le faciès correspond plutôt à des «*step-pools*» et du «*flat bed*» (Montgomery et Buffington, 1997), le système peut être de type *alluvial* ou *non-alluvial* (au sens de la Figure 32). L'approche que nous suivons est d'estimer la capacité de charriage instantanée en calculant les paramètres de la formule comme suit (Recking et collab., 2016 ; Piton et Recking, 2017) :

$$\tau^* = \frac{0.015 \cdot (Q/W)^{2p} \cdot S_{CE}^{1-p}}{p^{2.5} \cdot g^p \cdot (\rho_{rock}/\rho - 1) \cdot D_{84}^{3p}} \tag{17a}$$

$$\tau_m^* = 1.5 \cdot S_{CE}^{0.75} \tag{17b}$$

Dans les tronçons de cours d'eau raides (3 %<pente<10 %), pavés et alimentés par des sources amont ou de versant , le système peut être de type *colluvial* ou *semi-alluvial* (tronçon BB' dans la Figure 32) et le faciès correspond souvent plutôt à des «*step-pools*» et du «*flat bed*» (Montgomery et Buffington, 1997). On suit alors l'approche de Piton et Recking (2017) qui introduisent une subtilité : deux granulométries différentes sont identifiées.

- $D_{84,BS}$ («BS» pour «bed structure», structure du lit) correspond à la granulométrie du pavage structurant le lit. On mesure cette dernière par une approche classique de Wolman dans le chenal du tronçon pavé. Cette granulométrie grossière caractérise la rugosité du lit et pilote la dissipation d'énergie et la hauteur d'eau à débit donné ;
- $D_{84,TB}$ («TB» pour «travelling bedload», charriage mobile) correspond à la granulométrie effectivement transportée. Cette fraction est effectivement présente dans le lit mais le pavage immobile est largement prépondérant [22] La mesure de $D_{84,TB}$, toujours réalisée par échantillonnage surfacique de Wolman, doit être faite ailleurs, dans un dépôt représentatif des matériaux réellement transportés (plage de dépôt, banc de graviers dans la partie terminale du bassin versant).

Dans ce cas de figure, la capacité de charriage instantanée est estimée en calculant les paramètres de la formule comme suit :

$$\tau^* = \frac{0.015 \cdot (Q/W)^{2p} \cdot S_{CE}^{1-p} \cdot D_{84,BS}^{1-3p}}{p^{2.5} \cdot g^p \cdot (\rho_{rock}/\rho - 1) \cdot D_{84,TB}} \tag{18a}$$

$$\tau_m^* = 1.5 \cdot S_{CE}^{0.75} \tag{18b}$$

Ces trois approchent permettent de couvrir les cas les plus classiques. Citons toutefois aussi la formule de Recking (2014), présentée aussi dans Recking et collab. (2013), qui permet la prise en compte de proximité de sources sédimentaires actives prévenant l'apparition du pavage. Ou encore la formule de Piton (2016, p. 96), calée exclusivement sur la branche asymptotique des forts transport et qui vise à pouvoir estimer des cas de «bouffée de charriage», épisodes de transport extraordinairement efficace associé par exemple à des épisodes de dépavage.

22. Le cas échéant le site est plus probablement de type *non-alluvial* et l'approche précédente s'applique.

4.6.3 Estimation du volume de transport événementiel

Comme introduit plus haut, il n'est pas simple d'estimer le volume de transport solide d'une période de retour donnée. L'approche retenue sur les sites peu documentés est de croiser des données hydrologiques et des scénarios géomorphologiques, le problème est donc multivarié. Soulignons que dans les problèmes multivariés (par exemple «quelle est le pic de crue *et* la durée d'une crue centennale ?»), plusieurs réponses statistiquement correctes existent (voir le très bon article de Brunner et collab., 2016, sur ce point). Il est possible d'appliquer le cadre présenté plus haut à des hydrogrammes de crues historiques (mesurés ou reconstruits par modélisation) ainsi qu'à des hydrogrammes théoriques de période de retour donnée. Dans les analyses suivantes, les hydrogrammes utilisés sont issus du modèle MORDOR utilisé dans le cadre de l'Action 4 de HYDRODEMO. Les analyses hydrologiques usuelles se concentrent sur l'évaluation du pic de crue, ce dernier étant souvent le paramètre le plus approprié pour caractériser le risque inondation. Cependant, dans le cas des crues torrentielles, les dommages et aléas sont fortement corrélés au volume solide total transporté par l'épisode, plutôt qu'au débit du pic de crue (liquide ou solide). Le volume solide charrié par un cours d'eau est contrôlé par l'ensemble de l'hydrogramme, en particulier par son débit au pic, mais aussi par la durée de la crue.

Si une analyse est monovariée, la définition mathématique de la magnitude de période de retour donnée est univoque. Il n'existe par exemple qu'une seule définition mathématique du débit décennal. Au contraire, lorsqu'on mène des analyses multivariées et qu'on souhaite définir un ensemble de crues de période de retour donnée, plusieurs ensembles sont mathématiquement corrects suivant l'approche retenue. Evin et Piton (2020) ont exploré le potentiel de ces approches et la définition qui semble la plus appropriée à l'étude des crues torrentielles en analysant les débits au pic et durées des crues mesurées sur 128 stations hydrologiques des Alpes et des Pyrénées. Trois leçons principales en ont été tirées :

- Les crues durent plus longtemps que l'intuition ne le laisse penser, typiquement 24-48 h. Une formule simple dépendant seulement de la superficie du bassin versant a été proposée (Evin et Piton, 2020, p. 27) ;
- Les analyses statistiques bivariées sont techniques mais permettent, en présence de données, d'identifier des régimes de crues [23] ;
- Il est plus rigoureux de revenir à une analyse monovariée dans la mesure du possible : ceci nécessite d'estimer le volume solide charrié pour un ensemble de crues réalistes en terme de débits et de durées, puis d'estimer les valeurs de période de retour directement sur les volumes solides estimés. C'est cette approche qui est suivie dans la suite de cette analyse.

4.6.4 Exemple d'application : Le Sonnant à Gières

Le cas du Sonnant à Gières est utilisé comme exemple d'application. Les hydrogrammes des 40 crues ayant les pics de crue les plus élevés ont été extraits des modélisations MORDOR de l'Action 4 de HYDRODEMO (Figure 33). On note que des hydrogrammes de formes très diverses ont été modélisés, plusieurs d'entre eux ont par exemple des pics multiples. On note aussi que, malgré la taille relativement faible du bassin versant (26.3 km^2), les crues [24] modélisées durent généralement plusieurs jours. Des ajustements sur les pics de crues et sur les volumes de crues aboutissent à évaluer le débit de pointe décennal à 7.7 m^3/s (intervalle d'incertitude 7.3 à 8.1) et le volume de crue décennal à 1.51 Mm^3 (intervalle d'incertitude 1.44 à 2.22 Mm^3). Le rapport de HYDRETUDES (2012b) cite des estimations

23. Trois régimes ont été identifiés : régime de crues-éclair dont les évènements les plus extrêmes sont toujours relativement courts, régime de crues longues dont les évènements les plus extrêmes sont d'autant plus longs qu'ils sont intenses et régime intermédiaire pour lequel les crues plus longues sont généralement légèrement moins intenses.

24. On définit par la crue comme la durée pendant laquelle le débit est supérieur à quatre fois le module, voir Evin et Piton (2020)

de 16 m^3/s et de 0.4 Mm^3 tirés d'études plus anciennes. La méthode SHYREG (Arnaud et collab., 2014) donne par ailleurs plutôt 8.8 m^3/s. Une analyse critique reste à mener.

Pour calculer le volume de transport solide généré par chacune de ces 40 crues, les paramètres suivants ont été utilisés dans les calculs : (i) La largeur du lit est prise égale à 4 m ; (ii) La granulométrie mesurée par HYDRETUDES (2012b, p. 20) est considérée (D_{50}=16 mm, D_{84}=39 mm) ; (iii) HYDRETUDES (2012b, p. 21) fournit un profil en long et identifie 4 secteurs de pentes homogènes variant entre 1.7 % en amont direct de Gières et 6.7 % dans une zone plus raide en aval du lieu-dit «Le Sonnant». Des calculs ont été menés pour chacun de ces quatre secteurs. L'approche adaptée pour les faciès de «*pool-and-rifle*» a été utilisée. Pour le secteur terminal des gorges, les calculs aboutissent aux résultats fournis dans la Figure 34. Ces valeurs peuvent être ensuite triées. On peut leur assigner une période de retour théorique (voir formules p. 22) et ajuster une loi de Gumbel pour estimer les valeurs pour des périodes de retour définies (Figure 35).

La zone de plus faible pente (1.7 %) est le secteur en amont direct de l'entrée de Gières, le transport solide est donc censé être régulé et contrôlé par ce secteur. Les ajustements montrent un volume décennal de sensiblement 1000 m^3. On remarque aussi que dans les secteurs amont, où la pente est plus forte, cette valeur est sensiblement triplée pour une pente de 3.2 % et multipliée par 5 à 6 pour une pente de 6.7 %. Des extrapolations des ajustements vers des périodes de retour centennales donnent des valeurs de l'ordre de 150 % du volume décennal.

Ces valeurs sont à comparer avec les curages et ajustements menés sur la plage de dépôt de Gières (Annexe F) : (1) Volume de transport décennal : ≈500 m^3 ; (2) Volume de transport centennale par ajustement GPD sur 20 valeurs : ≈1400 m^3.

Les volumes calculés surestiment donc les volumes curés, mais l'ordre de grandeur est cohérent. Des analyses de sensibilité montrent que si la granulométrie est 50 % plus grossière que les données utilisées, l'ordre de grandeur de transport décennal devient correct. Pour des granulométries 50 % plus fines, les capacités de transport sont sensiblement 2.5 fois plus grandes. Le Sonnant n'étant pas alimenté par des sources sédimentaires bien identifiées, les matériaux qu'il charrie sont issues d'érosion de berge, du lit alluvionnaire et d'éventuels glissements de terrain activés à l'occasion d'épisodes de pluies intenses.

En synthèse, notre analyse laisse penser que, en temps normal, le transport est relativement faible (volume annuel moyen : 250 m^3/an). Toutefois, en cas de crues intenses et longues, des érosions des berges et du lit peuvent mobiliser 500-1500 m^3 de matériaux charriés. Si des glissements de terrains atteignent le lit du ruisseau et l'alimentent en matériaux plus fins qu'usuellement, ces volumes peuvent possiblement doubler ou tripler. Des dépôts auront toutefois lieu aux cassures de pentes et dans les zones de débordements intermédiaires. Une partie sera aussi transportée en suspension.

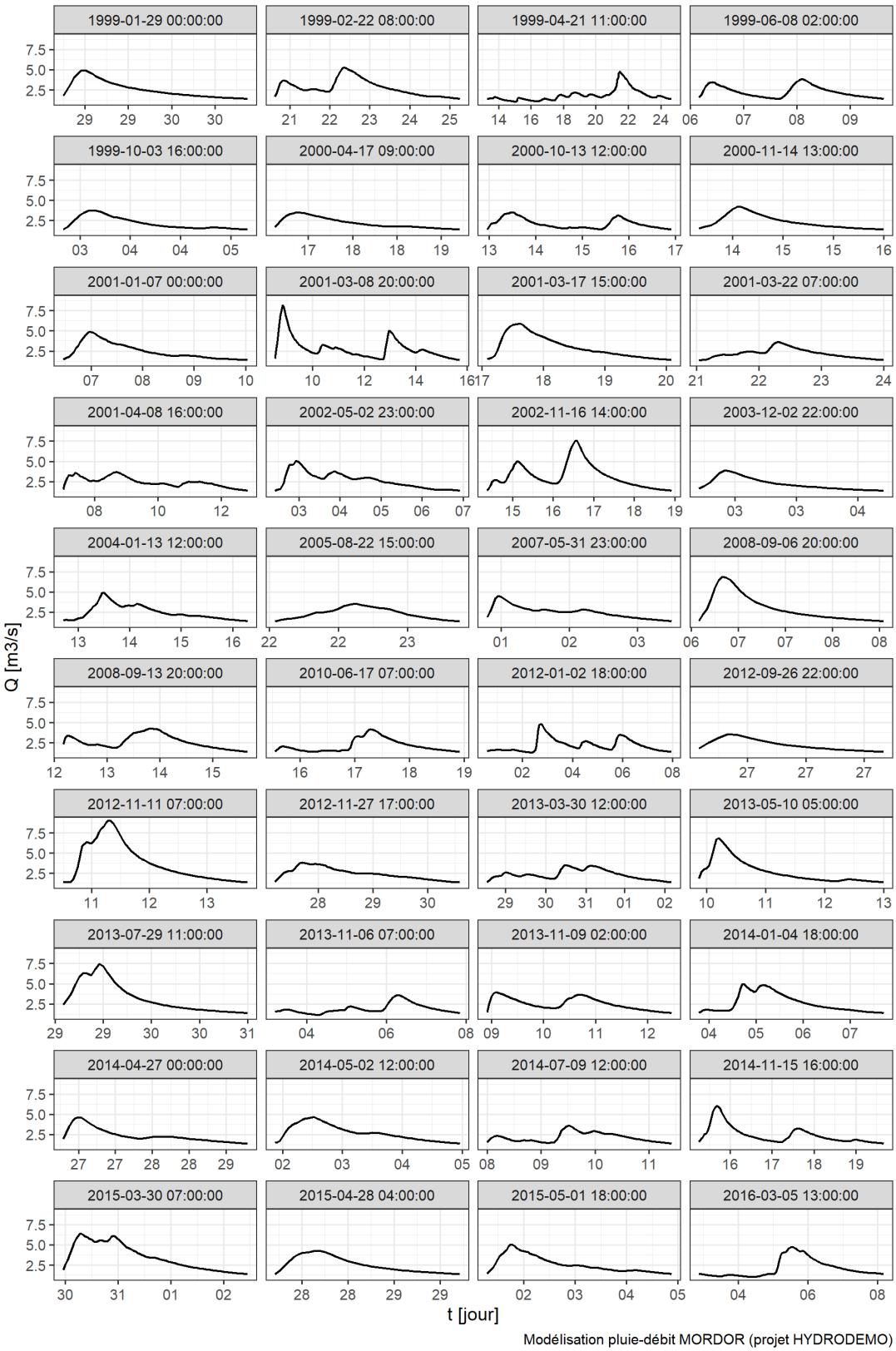


FIGURE 33 – Hydrogrammes des 40 crues aux pics de crues maximums modélisés sur le Sonnant à Gières sur 1997-2017

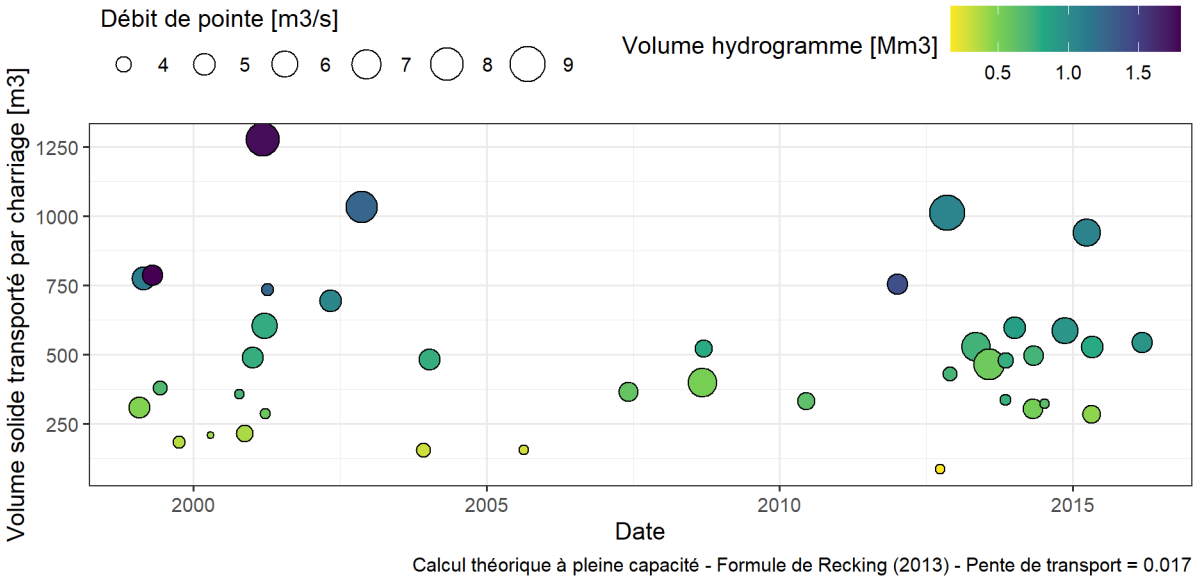


FIGURE 34 – Volume solide transporté pour les 40 crues aux pics de crues maximums modélisés sur le Sonnant à Gières sur 1997-2017 - Pente de transport de 1.7 % (secteur de la Combe à l'entrée des gorges). On constate que les volumes de transport sont à la fois corrélé au pic de crue (taille des points) et au volume de l'hydrogramme (gradient de couleur).

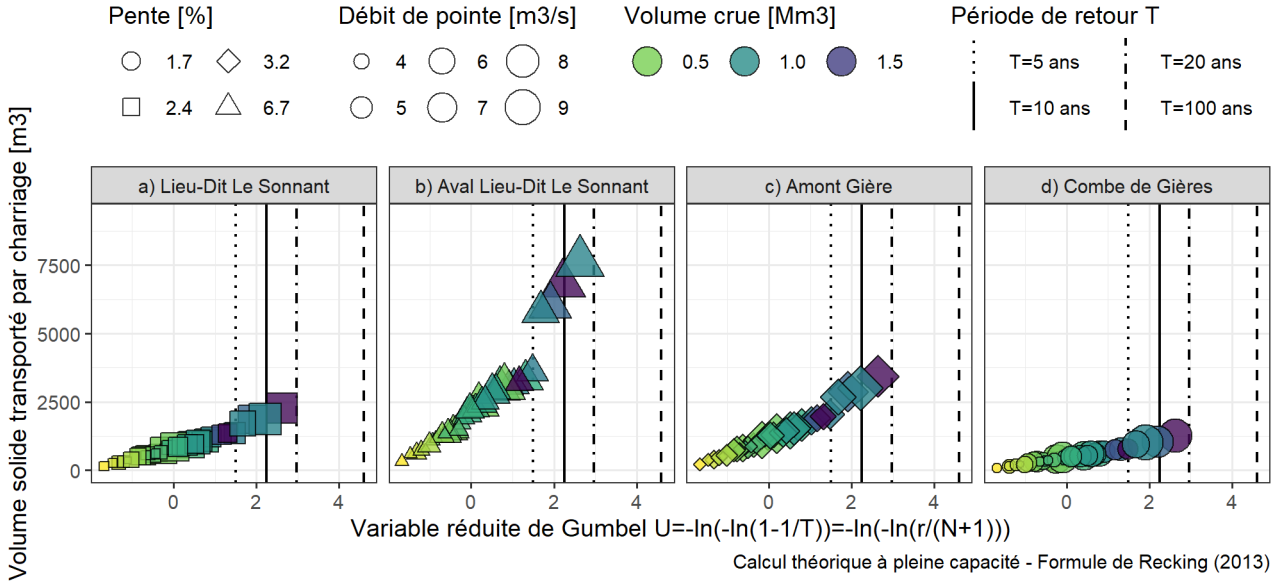


FIGURE 35 – Ajustement des volumes solides transportés pour les 40 crues aux pics de crues maximums modélisés sur le Sonnant à Gières sur 1997-2017. La capacité de transport décennale est sensiblement de l'ordre de 1000 à 3000 m^3 sauf dans le secteur plus raide situé en aval du Lieu-Dit «Le Sonnant». Si des apports par glissements de terrains alimentent le ruisseau dans ce secteur, ils seront partiellement transportés puis régulés dans le secteurs de moindre pente situés en aval.

4.6.5 Application aux torrents METRO

L'approche présentée sur l'exemple du Sonnant dans le paragraphe précédent a été déclinée sur les torrents METRO soumis à des crues de charriage au droit des points d'études HYDRODEMO. Les granulométries et largeurs étant parfois incertaines, des barres d'erreurs ont été ajoutées aux graphiques. Elles prennent en compte à la fois la valeur la plus pessimiste de la granulométrie (minimum) et de la largeur (moyenne - écart type des valeurs disponibles), ou la plus optimiste de la granulométrie (maximum) et de la largeur (moyenne + écart type des valeurs disponibles). Une valeur intermédiaire a aussi été calculée avec la valeur moyenne de la granulométrie et de la largeur. L'approche adaptée aux faciès de «pool and riffle» (Eq. 16) a été appliquée seulement au ruisseau du Verderet sur la base du faciès observé sur le terrain. L'approche adaptée aux faciès de «*plane-bed*» et «*step-pool*» (Eq. 17) a été appliquée aux torrents où des faciès de «*plane-bed*» ont été observés (Lanfrey, Charmeyran, Domeynon, Lavanchon) ou des faciès de «*step-pool*» (Vernon, Prémol, Rif Talon). La Figure 36 représente la distribution des évènements historiques modélisés (les hydrogrammes sont fournis en Annexe J). La Figure 37 trie et montre ces mêmes valeurs dans un diagramme de Gumbel. Quelques comportements typiques peuvent être identifiés :

Les ruisseaux sont caractérisés par des faibles capacités de transport solide (i.e., de l'ordre de la centaine de m^3), malgré des crues impliquant des volumes d'eau et des débits de pointe potentiellement forts. Le Verderet, le Vernon et le Prémol entrent dans cette catégorie. Le Lanfrey aussi dans une certaine mesure (à l'exception de deux crues dans la capacité dépassent une volume de 1000 m^3). Les barres d'erreurs affichées sur le Prémol et le Vernon montent toutefois assez loin au dessus des valeurs moyennes : ces valeurs pessimistes ont pourtant été calculées avec des diamètres assez grossiers. Comme mentionné précédemment, si des apports massifs et plus fins atteignaient le lit de ces torrents, la pente et l'hydrologie de ces torrent leur permettraient d'évacuer aisément des volumes de l'ordre de plusieurs milliers de m^3, c'est-à-dire typiquement dix à vingt fois plus que leur activité usuelle.

Le Domeynon, seul grand torrent de l'échantillon d'étude (A=46 km^2), est le seul cours d'eau dont la capacité de transport dépasse régulièrement 1000 m^3 par crue. Les volumes d'eau ruisselés importants sont vraisemblablement à l'origine de ce résultat (volumes de l'ordre du million de m^3). Les crues les plus fortes modélisées sur 20 ans ne pourrait transporter qu'un volume de l'ordre de 5000 m^3. Étrangement, la crue de 2005 ne ressort pas dans les crues majeures ce qui interroge sur le représentativité des données de pluies COMEPHORE sur cet évènement.

Le Lavanchon, a un comportement intermédiaire entre le ruisseau et le grand torrent. Sa capacité transport solide pour les crues courantes est inférieure à une centaine de m^3 mais plusieurs épisodes approchent ou atteignent le millier de m^3. C'est l'empreinte du caractère très torrentiel du cours d'eau dans sa partie amont qui s'étend sur le fond de vallée de Saint-Paul-de-Varces, bâti sur les dépôts alluvionnaires du bassin versant. Des tests exploratoires ont été menés en utilisant l'approche de calcul du transport solide adaptée aux faciès de «*pool-and-riffle*» sur le Lavanchon : ses pentes sont dans la zone de transition. La capacité de transport était alors sensiblement dix fois moindre. Le lit du Lavanchon est alluvionnaire mais ne présente pas d'alternance de radier et de mouilles, ni de bancs de graviers, formes caractéristiques des faciès de «*pool-and-riffle*». Le lit nous semble beaucoup plus représentatif des faciès de «*plane-bed*», c'est ce qui nous amène à retenir l'approche utilisée.

Le Charmeyran et le Rif Talon semblent avoir le comportement caractéristique de petits torrents. Leurs capacités de transport solide est de l'ordre de quelques centaines à un millier de m^3 pour les crues normales (un peu moins pour le Charmeyran au point d'étude mais c'est l'ordre de grandeur au droit de la plage de dépôt où la pente est plus raide). En cas d'apport plus fin qu'usuellement, elle peut dépasser plusieurs milliers de m^3. Cette capacité de transport décroît fortement avec la pente et

dans la partie terminale de leur cône de déjection, elle est plutôt de l'ordre de la centaine de mètres cubes comme l'illustre les valeurs du Charmeyran. Si les plages de dépôts qui équipent ces torrents dans leurs parties intermédiaires viennent à être saturées, ces dépôts auront lieu directement dans le lit des torrents ce qui aggravera les débordements qui emprunteront des cheminements plus ou moins aléatoires à travers les rues et les points bas du terrain. Bien que probablement légèrement sur-évaluées, ces calculs semblent produire des volumes transportés du bon ordre de grandeur.

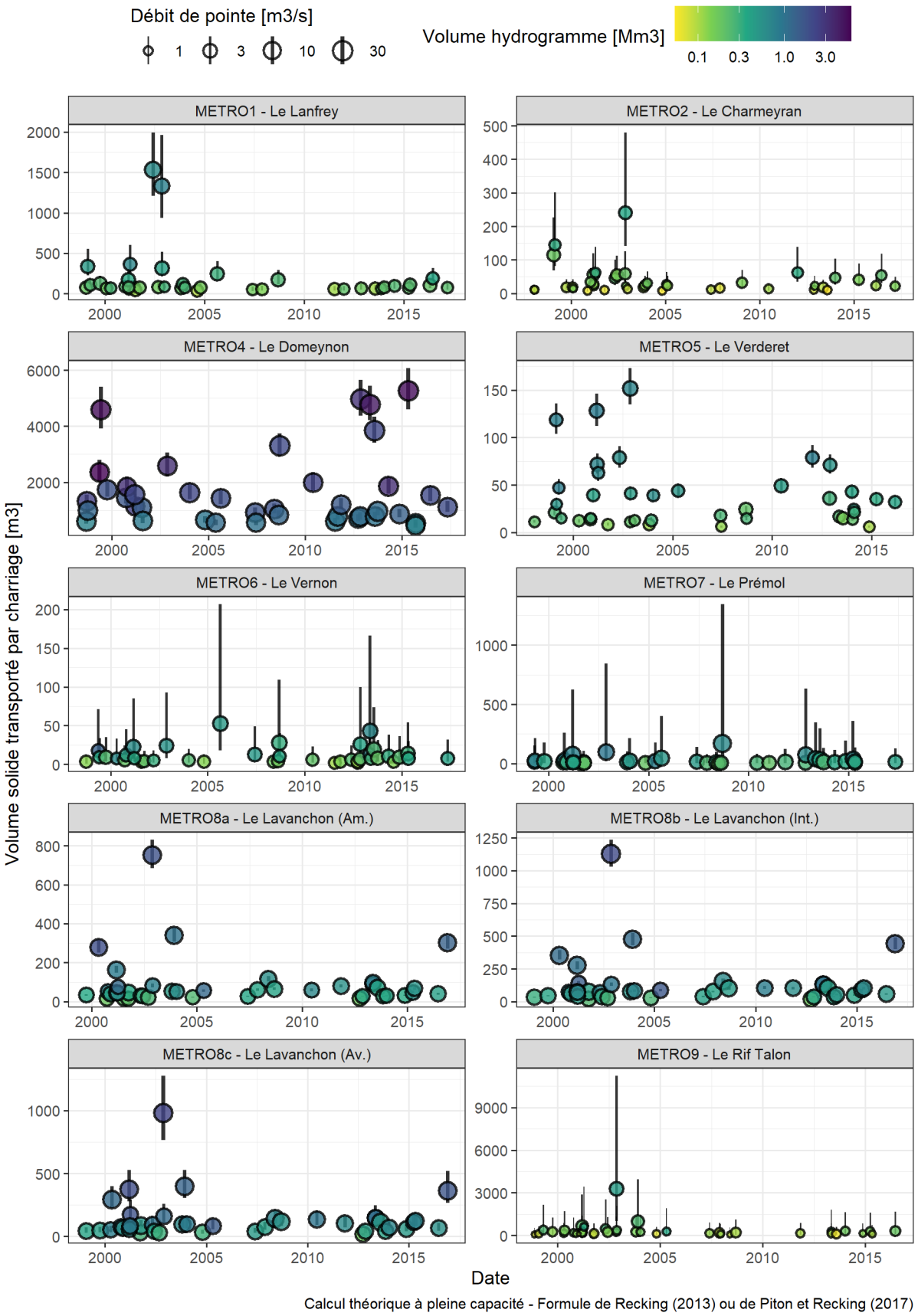


FIGURE 36 – Volume solide transporté théorique pour les 40 crues aux pics de crues maximums modélisés sur les bassins versants METRO.

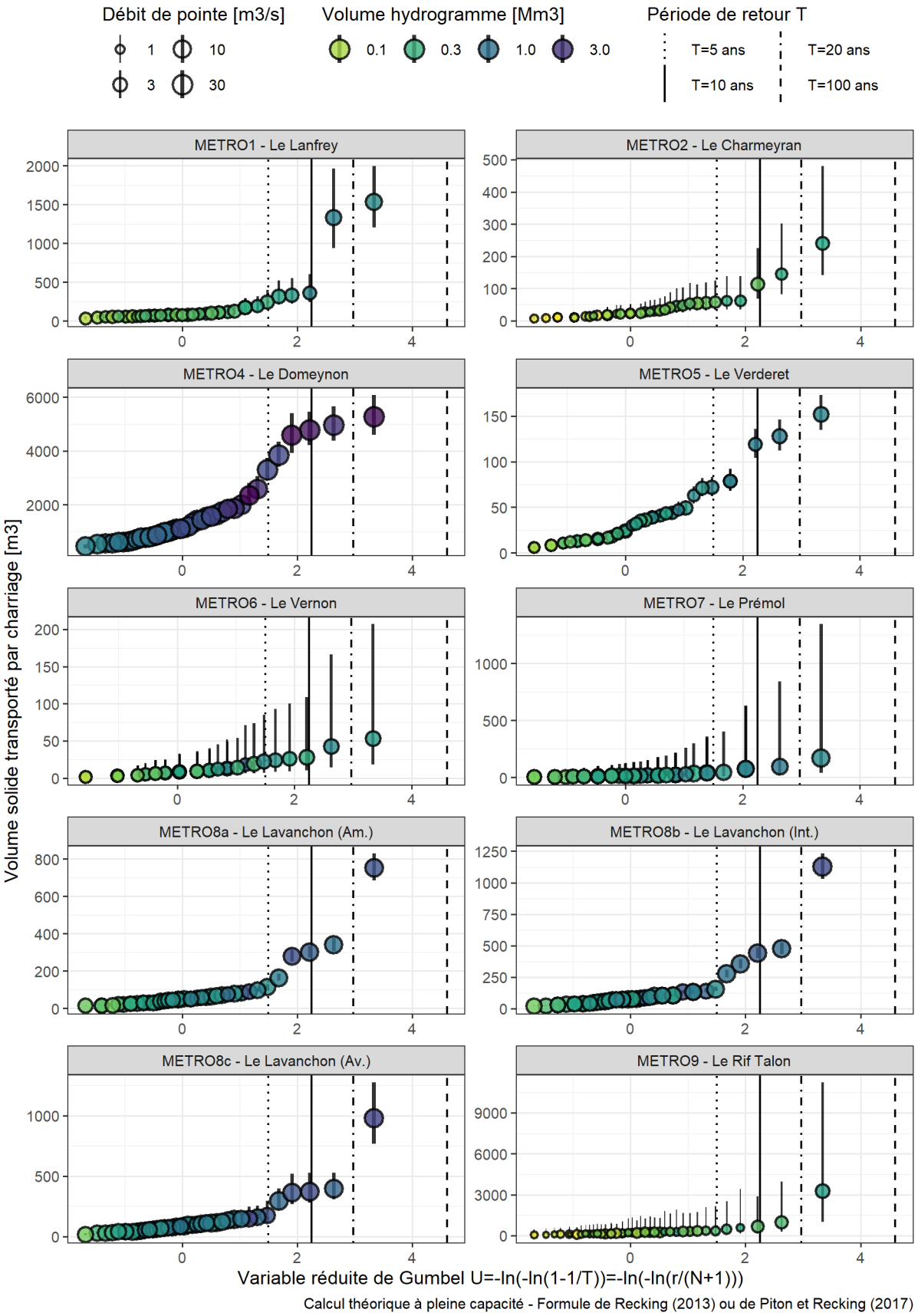


FIGURE 37 – Ajustement des volumes solides transportés pour les 40 crues aux pics de crues maximums modélisés sur les bassins versants METRO sur 1997-2017.

5 Discussion

5.1 Réflexions sur la typologie des torrents

La typologie des torrents selon leur phénomène de transport dominant n'a pas une grande influence sur les variables à expliquer dans nos analyses. Cela peut en partie être dû au fait qu'elle est calculée par des variables déjà prises en compte dans les analyses. Dans leurs travaux, Peteuil et Liébault (2011) ; Altmann et collab. (2021) ont développé des modèles spécifiques aux torrents à laves torrentielles et ceux-ci avaient un plus fort pouvoir prédictif. Une caractérisation des torrents à laves à partir d'analyses terrain, d'images aériennes et d'archives historiques n'a pas été envisagée dans notre étude faute de temps. Elle constitue toutefois une perspective intéressante d'autant plus que l'analyse des performances des modèles montre que les bassins versants à fortes productions sédimentaires, certainement à laves, sont généralement sous-estimés.

5.2 Réflexions sur les paramètres des méthodes

La proportion de zone en érosion dans le bassin R_{ZP} est la variable principale pour la prédiction des volumes de productions annuelles et événementielles. Cette variable est un indicateur de la fourniture sédimentaire du bassin versant. Cette forte relation entre la production sédimentaire et le ratio de partie contributrice du bassin versant a déjà été observée sur de plus petits jeux de données (notamment, Peteuil et Liébault, 2011 ; Altmann et collab., 2021). Pour la méthode ECsTREM, les zones de productions sont cartographiées par photo-interprétation. Cette méthode peut être sujette à des incertitudes due à sa subjectivité et peut également être chronophage. Dans notre approche, nous proposons une méthode plus automatisée et relativement simple à appliquer pour délimiter les zones de de production. On s'est interrogé sur les différences entre les deux approches. La Figure 38 compare les surfaces de zone de production délimitées selon la méthode ECsTREM et selon la méthode de notre étude pour le sous-échantillon de bassins versants de la méthode ECsTREM. Les surfaces de zones de production estimées par ces deux méthodes sont comparables. Faute de temps, nous n'avons pas réalisé de comparaison détaillée des deux méthodes bassin versant par bassin versant. On note cependant quelques surestimations et sous-estimations des surfaces de zones actives par notre méthode pour certains bassins versants (les torrents du Treuil (ID98), de la Lignarre (ID123) et du Piézan (ID286)). Ces estimations aberrantes avaient été préalablement identifiées et ont été expliquées dans la section 2.2.4. Les torrents du Treuil et de la Lignarre drainent des bassins versants avec de grandes étendues de prairies qui peuvent être identifiées comme des zones de production par notre méthode, sans informations complémentaires sur les bassins versants. Pour le torrent du Piézan, la BD Forêt® ne détecte pas les surfaces de sols nus. Ces limites soulignent l'importance de confronter les délimitations des zones de production de notre méthode à des analyses de terrain et/ou d'images aériennes.

Les indices de connectivité peuvent être calculés de manière relativement simple avec l'utilisation de SedInConnect et un logiciel SIG (QGIS). Toutefois, leur utilisation pour l'application des équations développées dans cette étude doit être limitée à la zone de projet et à l'utilisation d'un MNT de résolution à 25 m. En effet, comme indiqué dans la section 2.2.2, les valeurs d'IC dépendent de la résolution du MNT. En particulier, le facteur de pondération W utilisé dans le calcul de l'IC est normalisé par la rugosité la plus forte de la zone d'étude, sachant que la définition de la rugosité est très dépendante de la résolution du MNT. Les équations fournies dans notre étude ne seront donc pas valables avec un IC calculé sur un MNT de résolution différente.

Dans notre étude, le calcul de l'IC a sans doute un peu souffert de la résolution grossière du MNT. Les travaux de thèse de Loris Torresani (Torresani, 2021 ; Torresani et collab., 2021) et des travaux

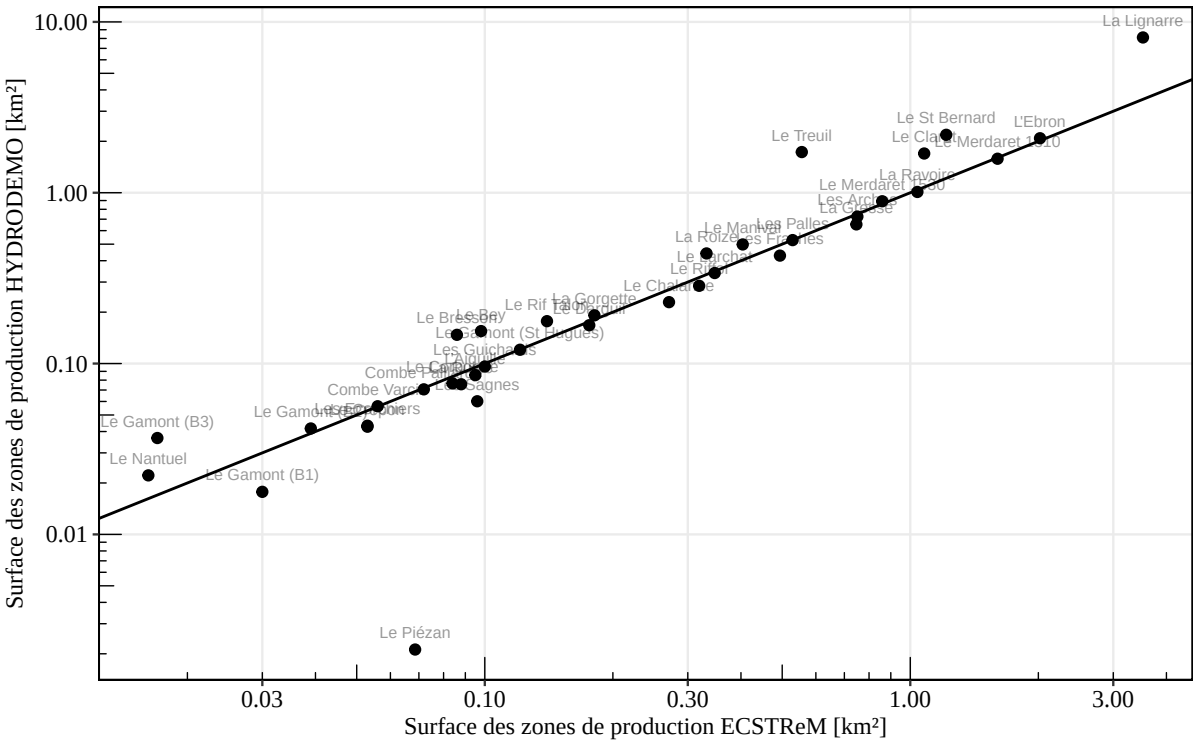


FIGURE 38 – Comparaison des surfaces de zones de production délimitées avec la méthode développée dans la section 2.2.4 et des surfaces de zones de production cartographiées dans le cadre de la méthode ECsTREM (n = 37 bassins versants).

complémentaires réalisés sur le bassin versant de Cheekye au Canada ont montré que la résolution la plus adaptée pour l'analyse de la connectivité sédimentaire est de l'ordre de 5 m. Un programme d'acquisition de données Lidar à une précision de 1 m est actuellement en cours et devrait couvrir l'ensemble du territoire national dans les prochaines années [25]. Il pourrait intéressant d'évaluer l'aptitude des indices de connectivité calculés sur des résolutions plus précises à améliorer la prédiction des productions sédimentaires. Ce travail d'analyse sera éventuellement mené quand un MNT à 5 m de qualité homogène sera disponible sur l'ensemble de la zone d'étude, et pourra conduire à modifier les équations des modèles proposés dans la section 3.

La qualité des données de pente de cours d'eau S_{CE} et de pente du cône de déjection S_C est elle-aussi limitée par la résolution grossière du MNT utilisé. Ces pentes ont été extraites à partir du MNT à 25 m qui est parfois assez bruité (voir les graphiques en Annexe C et D). Ceci pose question parce que la variable de pente de cours d'eau S_{CE} est identifiée comme ayant beaucoup d'influence sur l'estimation des volumes événementiels. Comme pour l'IC, la valeur de ces paramètres sera sans doute à ré-évaluer quand un MNT à 5 m de qualité homogène sera disponible. Cependant, contrairement à l'IC, c'est seulement l'incertitude sur la pente, et non pas la valeur de la pente elle-même, qui dépend de la résolution du MNT. Les équations des modèles fournis dans la section 3 sont donc valables quel que soit la résolution des données utilisées pour calculer la pente. Dans l'application des méthodes HYDRODEMO, nous conseillons donc d'utiliser les valeurs de pentes les plus précises possibles issues des meilleures données disponibles (topographie terrestre, données LiDAR, BD ALTI à 1 m ou 5 m).

Les résultats de notre étude montrent que les variables climatiques n'ont pas d'influence sur la prédic-

25. voir site internet : https ://www.ign.fr/institut/nos-activites/lidar-hd-une-couverture-nationale-dici-2025

tion des volumes de production. Cela est cohérent avec les observations de Peteuil et Liébault (2011) et Altmann et collab. (2021). En effet, Peteuil et Liébault (2011) n'observent pas de relation entre les volumes de production et des variables de pluies centennales de durée journalière et d'une heure. Également, Altmann et collab. (2021) ne montrent pas de relation importante entre le volume de production moyen et la pluie moyenne annuelle. Ces observations laissent penser que dans notre zone d'étude :

1. En général, la pluie n'est pas le facteur limitant principal, c'est plus la reconstitution des stocks sédimentaires qui pilote l'activité torrentielle. En somme, sous nos latitudes il pleut toujours assez pour transporter les volumes disponibles. De ce point de vue, la quasi totalité des bassins versants étudiés sont de type «*supply-limited*» (exports limités par la fourniture sédimentaire), plutôt que «*transport limited*» (exports limités par la capacité de transport) ;
2. On peut aussi considérer que les variables de pluie choisies pour décrire le climat dans notre analyse ne se focalisent pas sur la bonne échelle temporelle et/ou qu'il y a d'autres processus à prendre en compte. Bel et collab. (2016) ont par exemple montré que l'activité des laves torrentielles dépend non seulement des intensités de pluie événementielle mais aussi de la saturation préalable des sols (évaluée via les précipitations sur les 48 h précédent l'averse orageuse). Des analyses plus subtiles d'intensité des évènements conditionnées à des états de pré-saturation des sols pourraient ressortir comme plus significatives que les analyses univariées menées dans notre travail.

Notre approche fait l'hypothèse que les substrats ne sont susceptibles de fournir des matériaux que lorsqu'ils sont nus (couvert végétal inexistant). Notre jeu de données présente pourtant près de 40 bassins versants sans zones de production identifiées et qui sont pourtant équipés de plages de dépôt : une certaine fourniture sédimentaire existe donc. L'ajout d'une surface de production marginale dépendant de la longueur et de la largeur du drain principal vise à ajouter la contribution potentielle des érosions de berges et de la reprise des matériaux du lit. Toutefois, il peut aussi exister des zones de fourniture de matériaux sous couvert végétal, forestier en particulier, zones qui ne sont pas cartographiées par notre méthode, expliquant sans doute une part de l'incertitude dans la prédiction des modèles.

5.3 Réflexions sur les modèles prédictifs

Les modèles de prédiction des volumes moyens annuels sont moins performants que les modèles de prédictions des volumes événementiels (c.à-d. V_{10} et V_{ref}). Cela peut être expliqué par l'échantillon de bassins versants plus grand et certainement plus diversifié.

L'analyse des performances des modèles des volumes solides a montré que environ 50 % des prédictions se trouvent dans l'intervalle $[1/2; 2]$. Cela montre que ces modèles fournissent un ordre de grandeur et non pas une valeur précise du volume sédimentaire. Par ailleurs, ce résultat peut paraître insatisfaisant au vu des performances présentées dans les autres méthodes tels que ECsTREM. Par exemple, 70 % des prédictions se trouvent dans l'intervalle $[2/3; 3/2]$ pour le modèle de prédiction de V_{100} spécifique aux laves torrentielles dans Peteuil et Liébault (2011). Cependant, les meilleures performances de ECsTREM peuvent être expliquées par le fait que notre étude utilise un échantillon plus large et donc plus diversifié de données. A titre indicatif, la Figure 39 présente les performances de la méthode ECsTREM que nous avons appliquée sur notre jeu de données. L'application de la méthode a été faite pour V_m, V_{10} et V_{ref} (la méthode ECsTREM propose un modèle de prédiction de V_{100} mais on suppose que V_{ref} et V_{100} sont comparables). On observe qu'avec la méthode ECsTREM, de la même façon qu'avec les modèles que nous proposons, une forte proportion des prédictions se trouvent en dehors de l'intervalle $[1/2; 2]$. Plus précisément, 49 % des prédictions de V_m, 55 % des prédictions de V_{10}, 52 % des prédictions de V_{100} et 56 % des prédictions de V_{100} (modèle spécifique aux laves torrentielles) se trouvent à l'intérieur de l'intervalle $[1/2; 2]$. Ces proportions présentent des ordres

de grandeur comparables à celles observées sur nos modèles (Figure 29b). On remarque aussi un biais systématique des modèles ECsTREM qui tendent à sous-estimer les prédictions. Cela semble particulièrement concerner les bassins à faible production, à l'exception du modèle de V_{100} qui semble également sous-estimer les forts volumes (Figure 39c). Cette sous-estimation est moindre pour le modèle de prédiction de V_{100} spécifique aux laves torrentielles.

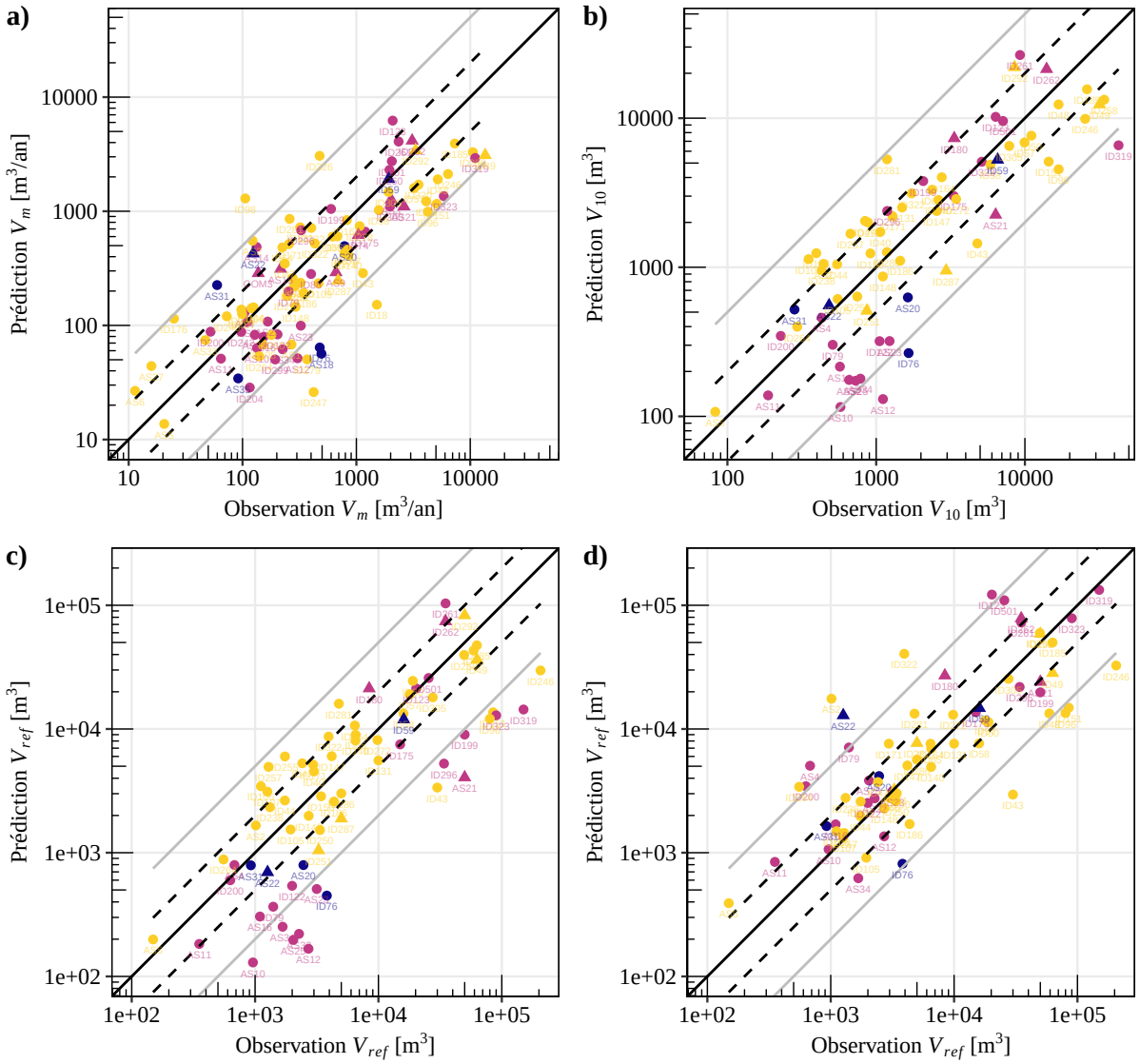


FIGURE 39 – Valeurs observées et prédites par la méthode ECsTREM pour : a) le modèle de prédiction du volume moyen annuel $V_m = 2100 \cdot A_{ZP}^{0.85}$; b) le modèle de prédiction du volume décennal $V_{10} = 24000 \cdot A_{ZP}^{0.82} \cdot S_{CE}^{0.50}$; c) le modèle de prédiction du volume centennal $V_{100} = 112700 \cdot A_{ZP}^{0.93} \cdot S_{CE}^{0.75}$; d) le modèle de prédiction du volume centennal spécifique aux torrents à laves torrentielles $V_{100} = 0.4 \cdot A_{ZP}^{0.60} \cdot D_z^{1.55}$, où D_z est la dénivelée entre les altitudes extrêmes du bassin versant ($Z_{max} - Z_{min}$, en mètre).

On note par ailleurs que les modèles HYDRODEMO de prédiction de volumes solides semblent sous-estimer les forts volumes ($> \pm 10\ 000$ m^3). Ces torrents méritent donc une certaine prudence quand à l'utilisation des méthodes HYDRODEMO. Le parti pris du projet HYDRODEMO a été d'étendre les méthodes de prédiction moyenne et événementielle vers des torrents peu productifs pour englober une plus grande diversité de bassins versants. L'ajout de nombreux bassins versants peu productifs dans

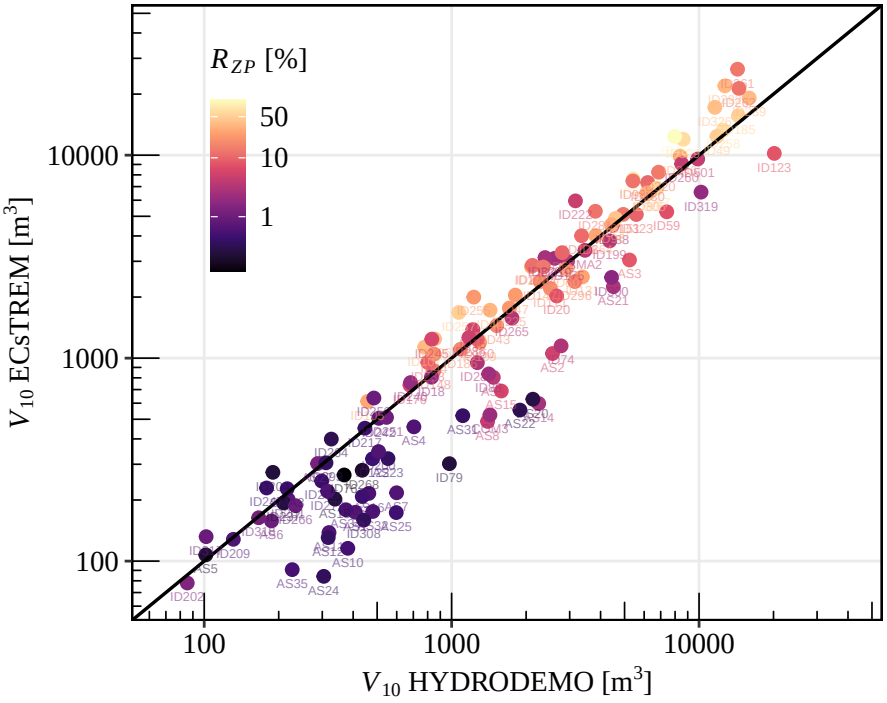


FIGURE 40 – Comparaison des valeurs de V_{10} prédites par la méthode ECsTREM et par l'équation (11b).

l'échantillon de calibration de la méthode explique vraisemblablement le biais dans la prédiction des bassins les plus productifs.

L'exercice de prédiction des volumes de production sédimentaire des torrents de la METRO a montré que les modèles développés dans cette étude prédisent des volumes de matériaux transportés qui sont assez cohérents, bien que souvent supérieurs, avec ceux observés lors d'événements historiques lorsque cette information était disponible. Les prédictions de nos modèles sont assez proches des prédictions d'ECsTREM, ce qui est rassurant étant donné que ces modèles ont été calés dans la même région. On note également que les prédictions de la méthode ECsTREM pour les torrents "mixtes" sont généralement plus faibles que celles de nos modèles sauf pour les productions les plus hautes (>10 000 m^3). Cela rejoint les résultats de l'analyse des performances des modèles ECsTREM (Figure 39) qui montre que ces derniers ont tendance à estimer des volumes de production plus faibles. Les autres modèles testés présentent généralement des résultats très différents des approches développées dans notre étude ou de la méthode ECsTREM. Il faut garder à l'esprit que ces méthodes ont été calées à partir de données régionales, généralement sur des évènements intenses de laves torrentielles. Leur application en dehors de la région dans laquelle elles ont été calées doit être menée prudemment. Des analyses fréquentielles n'ont pas été réalisées pour le développement de ces méthodes et les volumes d'apports utilisés proviennent souvent de valeurs maximales observées dans les torrents. Enfin, ces méthodes ne prennent pas directement en compte la fourniture sédimentaire via des indices associés à la surface active comme cela peut être fait dans la méthode ECsTREM ou celles développées dans cette étude.

La variable de fréquence d'occurrence d'évènement F_{evt} est faiblement prédite par nos modèles. En l'état, ces modèles sont peu performants et nous recommandons de ne les utiliser qu'avec la plus grande prudence. Comme détaillé dans la section 2.3.3, l'estimation de F_{evt} a souffert de nombreuses limites

dans notre travail. L'étude de F_{evt} mériterait une analyse plus approfondie à l'avenir, en réalisant, par exemple, une validation plus rigoureuse des intensités des évènements ou en sous-échantillonnant des bassins versants présentant une documentation suffisamment fiable.

6 Conclusion

Dans cette étude, nous avons développé des nouvelles méthodes pour prédire la production sédimentaire des torrents des Alpes du Nord. Ces modèles permettent de prédire les volumes d'apports solides susceptibles d'être produits par un torrent en moyenne annuelle ainsi que pour des événements plus rares (période de retour décennale et crue de référence). Nous avons également développé des modèles pour prédire les fréquences d'occurrence des évènements producteurs de sédiments dans ces bassins versants. Ces modèles sont basés sur des paramètres morphométriques relativement simples à caractériser. Dans cette étude, nous avons présenté des cas d'application de ces modèles, complétés par une prédiction des volumes événementiels par calculs de transport par charriage, sur des torrents de la METRO.

7 Perspectives

Le travail d'analyse mené dans le cadre de l'Action 3 d'HydroDemo a permis de redéfinir en profondeur la méthodologie et le potentiel des données de curages de plage de dépôts. Un travail significatif est présenté dans le présent rapport. Faute de temps, nous n'avons toutefois pas été en mesure d'explorer toutes les analyses qu'il aurait été utile de mener à bien. Certaines restent ainsi de l'ordre des perspectives pour des futures recherches, notamment :

— Une limitation significative discutée à de multiples reprises dans le rapport est l'utilisation de la BD Alti 25m comme source d'information topographique. A plusieurs reprises, son caractère grossier et son incapacité à représenter la réalité de la complexité des petits systèmes torrentiels a été observée. Un levé LiDAR de l'ensemble du territoire français est en cours et sera bientôt disponible. Les analyses des contours de bassins versants, mais surtout les extractions des indices de connectivité sédimentaire et les pentes des cours d'eau et des cônes de déjection mériteraient d'être mises à jours sur un MNT de résolution 5 m sous échantillonné sur la base d'un MNT de résolution 1 m. Ceci amènera certainement des changements dans les valeurs des paramètres de certains bassins versants.
— Bien qu'un contrôle visuel sommaire ait été effectué sur toutes les données de production sédimentaire de chaque torrent (carnets de curage ou fiches évènements RTM), le temps a manqué pour préciser si les évènements étaient des crues et laves torrentielles classiques ou si des processus particuliers étaient impliqués dans la production événementielle. On peut notamment penser aux réactivations de glissements de terrains ou à la rupture de poches d'eau glaciaires. Après réanalyse, nous avons par exemple intégré un tel évènement sur le torrent de la Creusaz (ID323), retenant ainsi évènement de référence de 90 000 m^3 alors que les curages menés depuis 1997 ne dépassent pas 9000 m^3. Dans le cadre d'un futur travail de recherche, un contrôle des sources plus fin sur ces sujets pourrait permettre d'identifier ces outliers. Des analyses pourraient ensuite permettre de qualifier les tendances moyennes de production sédimentaire (i.e., sans outliers) et les tendances catastrophiques de production sédimentaire (i.e., avec les outliers).
— Une plus grande attention aux catégories des torrents pourrait aussi permettre d'affiner le travail. La catégorisation automatique de la typologie de torrent proposée par Wilford et collab. (2004, en torrents à "debris flows", torrents à "debris floods" et torrents à "floods", basée sur

la longueur du drain principal et sur l'indice de Meltoon) a été retenue dans cette analyse. Les méthodes de *Random Forests* ont montré que le type de torrent ne ressortait alors pas comme variable explicative significative. Ceci nous a amené à garder un seul échantillon de calibration et à caler des modèles sur l'ensemble de cet échantillon. Peteuil et Liébault (2011) avaient retenu une approche par type de torrent dans le développement de la méthode ECsTREM et les tests menés dans le cadre du présent rapport montrent que les ajustements qu'ils ont proposés donnent des ordres de grandeurs très cohérents malgré un échantillon de calage plus restreint et moins divers et une méthode de développement relativement plus simple. Cette option serait à ré-explorer si le travail d'HydroDemo devait être mis à jour.

— Les modèles empiriques développés sont volontairement parcimonieux, faisant appel à un ou deux paramètres géomorphologiques explicatifs. Bien qu'une analyse sommaire des corrélations entre ces paramètres ait été menée, une réanalyse plus profonde pourrait permettre d'étudier les corrélations et de réfléchir à la définition de nouveaux paramètres composites peu corrélés, i.e., quasiment orthogonaux dans l'espace des paramètres. Des équations empiriques multivariés faisant appel à ces paramètres composites pourraient être plus subtils et précises que les équations simples proposés dans ce rapport.

— Le parc des ouvrages intégrés à la base de données mériterait enfin d'être étendu pour intégrer plus d'ouvrages drainant des ruisseaux (ouvrages sous maîtrise d'ouvrage communale dont les données sont difficilement accessibles pour l'heure). Le transfert de la compétence GEMAPI à certaines structures va permettre d'harmoniser la compilation et l'archivage de ces données.

— Les ouvrages équipant les torrents des Alpes du Sud, les Pyrénées et les autres massifs français, ainsi que les ouvrages situés côtés italiens, suisses ou espagnols pourraient aussi intégrer la base de donnée.

Références

Alp'Géorisques. 2005, «Plan de prévention des risques naturels prévisibles», cahier de recherche, Commune du Fontanil-Cornillon.

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 : Torrent de laval, vorz, combe de lancey, domeynon, prémol», cahier de recherche, Communauté de Communes du Balcon de Belledonne.

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 : torrent de Laval, Vorz, Combe de Lancey, Domeynon, Prémol», Rapport de synthèse + Cdrom de photographies 0702724, Communauté de communes du Balcon de Belledonne - Direction Départementale de l'Agriculture et de la Forêt.

Alp'Géorisques. 2018a, «Carte des aléas de la commune d'eybens», cahier de recherche, Grenoble Alpes Métropole.

Alp'Géorisques. 2018b, «Plan de prévention des risques naturels de la tronche», cahier de recherche, DDT de l'Isère.

Alp'Géorisques. 2019a, «Carte des aléas de claix», cahier de recherche, Grenoble Alpes Métropole.

Alp'Géorisques. 2019b, «Carte des aléas de la commune de saint-paul-de-varces», cahier de recherche, Grenoble Alpes Métropole.

Alp'Géorisques. 2019c, «Carte des aléas de vaulnaveys-le-haut», cahier de recherche, Grenoble Alpes Métropole.

Altmann, M., F. Haas, T. Heckmann, F. Liébault et M. Becht. 2021, «Modelling of sediment supply from torrent catchments in the western alps using the sediment contributing area (SCA) approach», *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. sous presse, 10.1002/esp.5046, ISSN 1096-9837.

Arnaud, P., Y. Aubert, D. Organde, P. Cantet, C. Fouchier et N. Folton. 2014, «Estimation de l'aléa hydrométéorologique par une méthode par simulation : la méthode SHYREG : présentation – performances – bases de données», *La Houille Blanche*, , n° 2, 10.1051/lhb/2014012, p. 20–26.

Bel, C., F. Liébault, O. Navratil, N. Eckert, H. Bellot, F. Fontaine et D. Laigle. 2016, «Rainfall control of debris-flow triggering in the Réal Torrent, Southern French Prealps», *Geomorphology*, vol. 291, 10.1016/j.geomorph.2016.04.004, p. 17–32.

Berthet, J. 2016, *L'évolution géomorphologique des systèmes torrentiels proglaciaires de la vallée de Chamonix-Mont-Blanc, une approche du couplage sédimentaire de la fin du Petit Age Glaciaire au désenglacement récent*, thèse de doctorat, Université Grenoble Alpes.

Bertrand, M., F. Liébault et H. Piégay. 2013, «Debris-flow susceptibility of upland catchments», *Natural Hazards*, vol. 67, n° 2, https://doi.org/10.1007/s11069-013-0575-4, p. 497–511, ISSN 1573-0840.

Bertrand, M., F. Liébault et H. Piégay. 2017, «Cartographie régionale de la susceptibilité aux laves torrentielles dans les alpes du sud», *Journal of Alpine Research | Revue de géographie alpine*, vol. 105, n° 105, 10.4000/rga.3530, ISSN 0035-1121.

Blanpied, J., J.-M. Carozza et J.-M. Antoine. 2018, «La connectivité sédimentaire dans la haute chaîne pyrénéenne par l'analyse de la crue de juin 2013 : le rôle des formations superficielles», *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, vol. 24, 10.4000/geomorphologie.12718, p. 389–402, ISSN 1266-5304.

Borselli, L., P. Cassi et D. Torri. 2008, «Prolegomena to sediment and flow connectivity in the landscape : A GIS and field numerical assessment», *CATENA*, vol. 75, n° 3, 10.1016/j.catena.2008.07.006, p. 268–277, ISSN 0341-8162.

Bovis, M. J. et M. Jakob. 1999, «The role of debris supply conditions in predicting debris flow activity», *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 24, n° 11, 10.1002/(SICI)1096-9837(199910)24:11<1039::AID-ESP29>3.0.CO;2-U, p. 1039–1054, ISSN 1096-9837.

Breiman, L. 2001, «Random forests», *Machine Learning*, vol. 45, n° 1, https://doi.org/10.1023/A:1010933404324, p. 5–32, ISSN 1573-0565.

Brochot, S., L. Marchi et M. Lang. 2002, «L'estimation des volumes des laves torrentielles : méthodes disponibles et application au torrent du poucet (savoie)», *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, vol. 61, n° 4, 10.1007/s10064-002-0164-3, p. 389–402.

Brunner, M. I., J. Seibert et A.-C. Favre. 2016, «Bivariate return periods and their importance for flood peak and volume estimation : Bivariate return periods», *Wiley Interdisciplinary Reviews : Water*, vol. 3, n° 6, 10.1002/wat2.1173, p. 819–833, ISSN 20491948.

Carladous, S. et G. Piton. 2019, «Mise à jour inventaire et retour d'expériences sur les plages de dépôt», cahier de recherche MIG MTES (Action C2), ONF-RTM & IRSTEA ETNA.

Cavalli, M. et L. Marchi. 2008, «Characterisation of the surface morphology of an alpine alluvial fan using airborne LiDAR», *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 8, n° 2, 10.5194/nhess-8-323-2008, p. 323–333, ISSN 1561-8633.

Cavalli, M., S. Trevisani, F. Comiti et L. Marchi. 2013, «Geomorphometric assessment of spatial sediment connectivity in small alpine catchments», *Geomorphology*, vol. 188, 10.1016/j.geomorph.2012.05.007, p. 31–41, ISSN 0169-555X.

Cemagref. 1984, «Méthodologie de programmation des actions de restauration des terrains en montagne – phase d'élaboration des éléments techniques d'aide à la décision – le cas de la maurienne.», cahier de recherche, CERREP pour le compte du Cemagref.

Church, M. et M. Jakob. 2020, «What is a debris flood ?», *Water Resources Research*, vol. 56, n° 8, 10.1029/2020WR027144, p. e2020WR027 144, ISSN 1944-7973.

Coles, S. 2001, *An introduction to statistical modeling of extreme values*, vol. 208, Springer.

Crema, S. et M. Cavalli. 2018, «SedInConnect : a stand-alone, free and open source tool for the assessment of sediment connectivity», *Computers & Geosciences*, vol. 111, 10.1016/j.cageo.2017.10.009, p. 39–45, ISSN 0098-3004.

D'Agostino, V. 2013, «Assessment of past torrential events through historical sources», dans *Dating Torrential Processes on Fans and Cones*, vol. 47, édité par M. Schneuwly-Bollschweiler, M. Stoffel et F. Rudolf-Miklau, chap. 8, Springer Netherlands, p. 131–146, 10.1007/978-94-007-4336-6.

D'Agostino, V. et L. Marchi. 2001, «Debris flow magnitude in the eastern italian alps : data collection and analysis», *Physics and Chemistry of the Earth, Part C : Solar, Terrestrial & Planetary Science*, vol. 26, n° 9, 10.1016/S1464-1917(01)00064-2, p. 657–663, ISSN 1464-1917.

EGIS Eau et CIDEE. 2013, «Etat des lieux hydromorpho-multifonctionnel des rivières et milieux aquatiques du bassin versant du grésivaudan – programme de restauration et plan de gestion.», cahier de recherche Diagnostic - Version 2, Communauté de Communes du Pays du Grésivaudan.

Evin, G. et G. Piton. 2020, «Analyse bivariée des liens entre magnitude et durée des crues en zones Alpine et Pyrénéenne», cahier de recherche hal-02509705, INRAE ; DGPR (Direction Générale de la Prévention des Risques - Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire).

Fryirs, K. A. 2013, «(dis)connectivity in catchment sediment cascades : a fresh look at the sediment delivery problem», *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 38, n° 1, 10.1002/esp.3242, p. 30–46, ISSN 1096-9837.

Fryirs, K. A., G. J. Brierley, N. J. Preston et J. Spencer. 2007, «Catchment-scale (dis)connectivity in sediment flux in the upper hunter catchment, new south wales, australia», *Geomorphology*, vol. 84, n° 3, 10.1016/j.geomorph.2006.01.044, p. 297 – 316, ISSN 0169-555X.

Genuer, R., J.-M. Poggi et C. Tuleau-Malot. 2015, «VSURF : An r package for variable selection using random forests», *The R Journal*, vol. 7, n° 2, p. 19–33, ISSN 2073-4859.

Gob, F., C. Bilodeau, N. Thommeret, J. Belliard, M.-B. Albert, V. Tamisier, J.-M. Baudoin et K. Kreutzenberger. 2014, «A tool for the characterisation of the hydromorphology of rivers in line with the application of the european water framework directive in france (CARHYCE)», *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, vol. 20, n° 1, 10.4000/geomorphologie.10497, p. 57–72.

Graszk, E., J. Dupuy et G. Garry. 1997, «Plans de prévention des risques naturels prévisibles (ppr) : Guide général», cahier de recherche, MEDDE.

Gruffaz, F. 1996, «Etude de description et analyse des plages de dépôt torrentilles réalisées dans les Alpes et Pyrénées Françaises», cahier de recherche Bilan d'étape, RTM.

Hampel, R. 1977, «Geschiebewirstschaft in Wildächen», *Wildbach und Lawinenverbau*, vol. 41, p. 3–34.

Harvey, A. M. 2002, «Effective timescales of coupling within fluvial systems», *Geomorphology*, vol. 44, n° 3, 10.1016/S0169-555X(01)00174-X, p. 175 – 201.

Heckmann, T., M. Cavalli, O. Cerdan, S. Foerster, M. Javaux, E. Lode, A. Smetanová, D. Vericat et F. Brardinoni. 2018, «Indices of sediment connectivity : opportunities, challenges and limitations», *Earth-Science Reviews*, vol. 187, 10.1016/j.earscirev.2018.08.004, p. 77–108, ISSN 0012-8252.

HYDRETUDES. 2012a, «Plage du lanfrey sur la commune de fontanil-cornillon - dossier de gestion, d'entretien et de suivi de la plage», cahier de recherche, Union des Associations Syndicales.

HYDRETUDES. 2012b, «Plage du ruisseau de sonnant sur la commune de gières - dossier de gestion, d'entretien et de suivi de la plage», cahier de recherche, AS Drac Isère.

HYDRETUDES. 2012c, «Plage du verderet sur la commune d'eybens - dossier de gestion, d'entretien et de suivi de la plage», cahier de recherche, Union des Associations Syndicales.

Jakob, M. et P. Friele. 2010, «Frequency and magnitude of debris flows on cheekye river, british columbia», *Geomorphology*, vol. 114, n° 3, 10.1016/j.geomorph.2009.08.013, p. 382–395.

Jakob, M., E. Mark, S. McDougall, P. Friele, C.-A. Lau et S. Bale. 2020, «Regional debris-flow and debris-flood frequency–magnitude relationships», *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 45, n° 12, 10.1002/esp.4942, p. 2954–2964.

Kaitna, R. et J. Hübl. 2012, «Silent witnesses for torrential processes», dans *Dating Torrential Processes on Fans and Cones*, vol. 47, édité par M. Schneuwly-Bollschweiler, M. Stoffel et F. Rudolf-Miklau, chap. 7, Springer Netherlands, p. 111–130, 10.1007/978-94-007-4336-6_7.

Leopold, L. B. et T. Maddock. 1953, «The hydraulic geometry of stream channels and some physiographic implications», USGS Numbered Series 252, U.S. Government Printing Office.

Liebault, F., A. Remaître et C. Peteuil. 2013, *Géomorphologie des rivières de montagne*, chap. 1, QUAE, p. 15–89.

des Risques Naturels de l'Isère, M. I.-S. 2008, «Plan de prévention des risques naturels prévisibles», cahier de recherche, Commune de Meylan.

MacKenzie, L. G., B. C. Eaton et M. Church. 2018, «Breaking from the average : Why large grains matter in gravel-bed streams», *Earth Surface Processes and Landforms*, 10.1002/esp.4465.

Mao, L., M. Cavalli, F. Comiti, L. Marchi, M. A. Lenzi et M. Arattano. 2009, «Sediment transfer processes in two alpine catchments of contrasting morphological settings», *Journal of Hydrology*, vol. 364, n° 1, 10.1016/j.jhydrol.2008.10.021, p. 88–98, ISSN 0022-1694.

Marchi, L. et V. D'Agostino. 2004, «Estimation of debris-flow magnitude in the eastern italian alps», *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 29, n° 2, 10.1002/esp.1027, p. 207–220, ISSN 1096-9837.

Mazas, F. 2019, «Extreme events : a framework for assessing natural hazards», *Natural Hazards*, vol. 98, n° 3, 10.1007/s11069-019-03581-9, p. 823–848.

Mazzorana, B., F. Comiti et S. Fuchs. 2011, «A structured approach to enhance flood hazard assessment in mountain streams», *Natural Hazards*, vol. 67, n° 3, 10.1007/s11069-011-9811-y, p. 991–1009.

Melton, M. A. 1965, «The geomorphic and paleoclimatic significance of alluvial deposits in southern arizona», *The Journal of Geology*, vol. 73, n° 1, p. 1–38, ISSN 0022-1376.

Micheletti, N. et S. N. Lane. 2016, «Water yield and sediment export in small, partially glaciated alpine watersheds in a warming climate», *Water Resources Research*, vol. 52, n° 6, 10.1002/2016WR018774, p. 4924–4943, ISSN 1944-7973.

Mission Inter-Services des Risques Naturels de l'Isère. 2008, «Plan de prévention des risques naturels prévisibles», cahier de recherche, Commune de Domène.

Montgomery, D. et J. Buffington. 1997, «Channel-reach morphology in mountain drainage basins», *Geological Society of America Bulletin*, vol. 109, n° 5, 10.1130/0016-7606(1997)109<0596:CRMIMD>2.3.CO;2, p. 596–611.

Morel, M., D. J. Booker, F. Gob et N. Lamouroux. 2020, «Intercontinental predictions of river hydraulic geometry from catchment physical characteristics», *Journal of Hydrology*, vol. 582, p. 124 292.

Moriasi, D. N., J. G. Arnold, M. W. Van Liew, R. L. Bingner, R. D. Harmel et T. L. Veith. 2007, «Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations», *Transactions of the ASABE*, vol. 50, n° 3, 10.13031/2013.23153, p. 885–900, ISSN 2151-0040.

ONF-RTM. 2014, «Etude de bassin de risque – torrent du rif talon», cahier de recherche, Commune de Claix et Ministère de l'Agriculture.

ONF-RTM. 2019a, «Etude de bassin de risque – division rtm les bizenons et la ruine», cahier de recherche, Commune de Claix et Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation.

ONF-RTM. 2019b, «Etude de bassin de risque – divisions rtm de l'echarina, des rioux et du balcon est du vercors», cahier de recherche, Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation.

Peteuil, C. et F. Liébault. 2011, «ECSTReM, une méthode pratique pour prédire la production sédimentaire an-nuelle et événementielle des torrents à partir d'observations originales spécifiques aux alpes françaises.», p. 6.

Piton, G. 2016, *Sediment transport control by check dams and open check dams in Alpine torrents*, PhD Thesis, Univ. Grenoble Alpes.

Piton, G., V. Mano, D. Richard, G. Evin, D. Laigle, J. Tacnet et P. Rielland. 2019, «Design of a debris retention basin enabling sediment continuity for small events : the Combe de Lancey case study (France)», dans *Proc. 7th Int. Conf. on Debris-Flow Hazards Mitigation*, Golden, Colorado, USA, p. 1019–1026, 10.25676/11124/173113.

Piton, G. et A. Recking. 2017, «The concept of travelling bedload and its consequences for bedload computation in mountain streams», *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 42, n° 10, 10.1002/esp.4105, p. 1505–1519, ISSN 1096-9837.

R Core Team. 2020, *R : A Language and Environment for Statistical Computing*, R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.

Recking, A. 2013a, «An analysis of nonlinearity effects on bed load transport prediction», *Journal of Geophysical Research : Earth Surface*, vol. 118, n° 3, 10.1002/jgrf.20090, p. 1–18, ISSN 2169-9011.

Recking, A. 2013b, «Simple method for calculating reach-averaged bed-load transport», *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 139, 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000653, p. 70–75.

Recking, A. 2014, «Relations between bed recharge and magnitude of mountain streams erosions», *Journal of Hydro-Environment Research*, vol. 8, n° 2, 10.1016/j.jher.2013.08.005, p. 143–152, ISSN 15706443.

Recking, A., G. Degoutte, B. Camenen et P. Frey. 2013, *Hydraulique et transport solide*, chap. 3, Editions Quae, p. 126–192.

Recking, A., G. Piton, D. Vázquez-Tarrío et G. Parker. 2016, «Quantifying the morphological print of bedload transport», *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 41, n° 6, 10.1002/esp.3869, p. 809–822.

Remaître, A. 2006, *Morphologie et dynamique des laves torrentielles : Applications aux torrents des Terres Noires du bassin de Barcelonnette (Alpes du Sud)*, phdthesis, Université de Caen. URL `https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00119737`.

Rickenmann, D. 2016, «Magnitude and frequency of torrent events», dans *Methods for the Quantitative Assessment of Channel Processes in Torrents (Steep Streams)*, chap. 5, CRC Press, p. 91–103, 10.1201/b21306.

Rickenmann, D. et M. Zimmermann. 1993, «The 1987 debris flows in switzerland : documentation and analysis», *Geomorphology*, vol. 8, n° 2, 10.1016/0169-555X(93)90036-2, p. 175–189, ISSN 0169-555X.

Schopper, N., M. Mergili, S. Frigerio, M. Cavalli et R. Poeppl. 2019, «Analysis of lateral sediment connectivity and its connection to debris flow intensity patterns at different return periods in the fella river system in northeastern italy», *Science of The Total Environment*, vol. 658, 10.1016/j.scitotenv.2018.12.288, p. 1586–1600, ISSN 0048-9697.

Snelder, T. H., N. Lamouroux et H. Pella. 2011, «Empirical modelling of large scale patterns in river bed surface grain size», *Geomorphology*, vol. 127, n° 3-4, p. 189–197.

Tarboton, D. G. 1997, «A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models», *Water resources research*, vol. 33, n° 2, p. 309–319.

Torresani, L. 2021, *Development of a novel approach for sediment connectivity analysis in debris-flow prone catchments under managed and unmanaged conditions*, thèse de doctorat. URL `http://hdl.handle.net/11577/3373720`.

Torresani, L., V. D'Agostino et G. Piton. 2021, «Deciphering sediment Connectivity Index and erosion pattern in a debris flow catchment», *Proc. 14th INTERPRAEVENT Congress*, p. 303–311. URL `https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03363334/`.

Wilford, D. J., M. E. Sakals, J. L. Innes, R. C. Sidle et W. A. Bergerud. 2004, «Recognition of debris flow, debris flood and flood hazard through watershed morphometrics», *Landslides*, vol. 1, n° 1, https://doi.org/10.1007/s10346-003-0002-0, p. 61–66, ISSN 1612-5118.

ANNEXES

A Cartes des bassins versants

Atlas des bassins versants étudiés et ceux de la METRO. Les cartes présentent pour chaque bassin les délimitations du bassin versant et des zones en érosion, la localisation des plages de dépôts, les sorties du logiciel SedInConnect, les tracés des profils en long et la localisation générale du bassin.

L'atlas, si il n'est pas intégré au présent rapport, peut être téléchargé au lien suivant : `https://doi.org/10.15454/UMXQAB`

B Classement géologique

Liste des catégories lithologiques de la BD BRGM Charm-50 présentes dans nos bassins versants d'étude et correspondance avec les classes géologiques de Marchi et D'Agostino (2004).

Notation BRGM	Description	Classes D'Agostino et Marchi (2001)
Gl-Ne	Neiges et Glaces, Névés	5
EGP	Glacier rocheux	5
Gl-Ne	Glaciers et névés	5
E	Eboulis actuels à anciens (âge non précisé), localement cônes d'avalanches et éboulis mêlés à moraines	5
E	Eboulis actuels à anciens (âge non précisé), localement cônes d'avalanches et éboulis mêlés à moraines.	5
U	Tuf quaternaire, travertin	5
Ez	Eboulis vifs actuels	5
X	Remblais, dépôts anthropiques	5
Ez	Eboulis récents à actuels, actifs à fixés (et +/- réactivés), localement soliflués. Holocène-Actuel	5
Ez	Eboulis vifs actuels	5
Ezb	Eboulis à gros blocs, parfois glissés, éboulements en masse, écroulements, actuels à récents (Holocène) parfois d'âge non précisé (voir également les écroulements représentés par des surcharges)	5
Ey	Eboulis stabilisés anciens würmiens à post-würmiens (?)	5
Ex	Éboulis à gros blocs. Riss : anté-Würmien à Würmien ancien ?	5
Ezb	Eboulis à gros blocs, éboulements en masse, écroulements, actuels à récents ou d'âge non précisé ; voir également les éboulements représentés par des surcharges	5
L	Dépôts lacustres (cailloutis, sables, argiles et tourbes)	5
T	Tourbières	5
Ezb	Eboulis à gros blocs, éboulements en masse, écroulements, actuels à récents ou d'âge non précisé ; voir également les éboulements représentés par des surcharges	5
Rtk	Croûte calcaire : brèche de pente à ciment de "cargneule", cargneule de remaniement (base de la Nappe des Gypses)	1
E-G	Eboulis, glissements et moraines mêlés, indifférenciés. Âge variable	5
Ec	Coulées de matériel fin ou de gros blocs, coulées de solifluxion, coulées boueuses	5
SM	Glissements de terrain indifférenciés (terrains glissés en masse ou en coulées, stabilisés)	5
Ec	Coulées de matériel fin ou de gros blocs, coulées de solifluxion, coulées boueuses	5
U	Tufs, travertins et brèches de pentes récents à actuels, localement anciens	5
C	Dépôts de versants composites (localement glissés) : colluvions, éboulis et moraines remaniés	5
U	Tufs, travertins et brèches de pentes récents à actuels, localement anciens	5
E	Eboulis, éboulis ruisselés, éboulis à gros blocs, éboulis stabilisés anciens, écroulements à très gros blocs, éboulements en masse, colluvions à gros blocs	5
EJz	Cônes mixtes d'éboulis, de déjection et/ou d'avalanches (+/- remaniement par ruissellement), Würm à Actuel ou d'âge indéterminé	5
Ez	Eboulis de gravité actifs, éboulis vifs	5
gl	Terrains glissés	5
E-G	Eboulis, glissements et moraines mêlés, indifférenciés	5
C	Dépôts de versants composites (localement glissés) : colluvions, éboulis et moraines remaniés	5
Jeb	Cônes d'éboulis, cônes d'éboulement	5
SM-E	Glissements (terrains glissés) prédominants d'âge non précisé +/- éboulis, formations de versant et moraines mélés ; voir également les glissements représentés par des surcharges	5
EJz	Cônes mixtes d'éboulis, de déjection et/ou d'avalanches (+/- remaniement par ruissellement), récents à actuels ou d'âge indéterminé	5
FJ	Alluvions torrentielles : cônes de déjection d'âge non précisé. Quaternaire	5
SMz	Glissements actuels à récents ; voir également les glissements représentés par des surcharges	5
EJy	Cônes mixtes d'éboulis, de déjection et/ou d'avalanches (+/- remaniement par ruissellement) du Würm	5
FJz	Alluvions torrentiellse : cônes de déjection (ou d'épandage) actuels (actifs) à récents (fixés). Holocène	5
SMy	Glissements anciens. Würm	5

FJz	Cônes torrentiels de déjection (d'épandage) post-würmiens à actuels (actifs) ou sans âge précisé	5
SMyb	Glissements anciens à gros blocs. Würm	5
Fz	Alluvions fluviatiles (localement torrentielles) actuelles et récentes indifférenciées. Holocène	5
FJy-z	Cônes de déjection stabilisés, anciens ou de retrait würmien	5
FJz	Cônes torrentiels de déjection (d'épandage) post-würmiens à actuels (actifs) ou sans âge précisé	5
Fz	Alluvions récentes de fond de vallées: sables et graviers	5
Pz	Dépôts palustres actuels à récents : limons, tourbe	5
FJy	Cônes de déjection stabilisés, anciens, würmiens ou de retrait würmien	5
Pz	Dépôts palustres actuels à récents : tourbières	5
Lw	Argiles lacustres du début du Würm II	5
Fz	Alluvions actuelles et récentes, localement plus anciennes	5
Fz	Alluvions actuelles et récentes	5
Ty	Tourbe post-wurmienne	5
Ly	Dépôts post-wurmiens de lac et marais	5
Fy-z	Terasses anciennes	5
OEx	Loess et limons	5
Fy	Alluvions anciennes (fluviatiles à fluvio-glacaires ou fluvio-lacustres). Würm à post-Würm (?)	5
G	Glaciaire non différencié (et complexe de formation de versant)	5
FJz	Cônes de déjection ou d'épandage (vifs ou stabilisés) - post-Würm	5
EG	Glacier rocheux, avec bourelets d'accumulation (bourrelets de glissements ou moraines de névés)	5
FJy-z	Cône de déjection ancien (Chamonix, le Tour)	5
Jz	Alluvions torentielles indifférenciées, cône d'alluvions, cônes de déjection torrentiel (et d'avalanche) - Holocène	5
Fw	Alluvions anciennes interglaciaires (glacio-lacustres à fluvio-glaciaires) entre Riss et Würm ou intra Würm	5
Gz1	Dépôts glaciaires (moraines) tardi-würmiens à historiques	5
Gy	Dépôts glaciaires (moraines) principalement du Würm, localement plus tardifs (?) ou plus récents. Dépôts fluvio-glaciaires ou glacio-lacustres localement associés.	5
Gz	Dépots glaciaires (moraines) historiques (récents à actuels)	5
FGy	Alluvions fluvio-glaciaires würmiennes	5
Gy	Dépots glaciaires (moraines) ancients (argiles, sables, galets, cailloux, blocs), localement à argiles dominantes - Würm à post-Würm	5
GA	Dépôts glaciaires de la dépression d'Autrans d'âge indéterminé	5
GLy	Alluvions glacio-lacustres würmiennes	5
Gz	Dépôts glaciaires (moraines) historiques (récentes à actuelles)	5
Gz1	Dépôts glaciaires (moraines) tardi-würmiens à historiques	5
Gy	Dépôts glaciaires (moraines) principalement du Würm, localement plus tardifs (?) ou plus récents. Dépôts fluvio-glaciaires ou glacio-lacustres localement associés.	5
G	Formation glaciaire chaotique de l'Arve (anciennes moraines de fond riches en gros blocs)	5
Gx	Moraines rissiennes	5
¡p2	Formations résiduelles de Chambaran : niveau supérieur : cailloutis et argiles	5
Rt	Formations résiduelles (le Taillefer)	5
FGz	Dépôts fluvio-glaciaires historiques	5
Gy	Moraines glaciaires würmiennes indifférenciées. Pléistocène supérieur	5
p2-IV	Formation de Bonnevaux - l'Amballan (Pliocène supérieur - Pléistocène inférieur)	1
e7Fmc	Flyschs marno-calcaires. Priabonien	3
m5C	Conglomérats deltaïques surtout calcaires avec lits de sables (Tortonien)	3
m5S	Molasse sablo-gréseuse à lentilles conglomératiques (Tortonien)	1
m2	Molasse calcaire, gréseuse et glauconieuse. Localement conglomérat à la base, intercalations marneuses (Burdigalien supérieur ?)	1
gBr	Brèche calcaire (Chattien ?)	1
eS	Sables siliceux bariolés blancs et rouges (Eocène ?)	5
g1nd	Formation olistolithique, flysch à lentilles (ou blocs) non différenciés - Oligocène inf.	3

c1-6C	Calcaires lithographiques clairs à foraminifères planctoniques. Remaniemants à la base. Cénomanien - Maastrichtien	1
n5-6	Calcaires biodétritiques et marnes gréso-glauconieux, grès et sables et silts glauconieux, à horizons de phosphorites. Aptien sup. - Albien	1
g1(5)	Lentilles de flysch à helminthoïdes au sein d'une formation olistolithique-d'un flysch éocène à oligocène - Crétacé sup.	3
g1(6)	Lentilles de brèches à nummulites au sein d'une formation olistolithique-d'un flysch éocène à oligocène - Mésozoïque	3
n4-5U	Calcaires massifs à patine claire de faciès ugonien non différenciés, parfois calcaires à silex. Barrémien - Aptien inférieur.	1
n3	Marnes et marno-calcaires à miches, calcaires silicieux très durs à spicules. Hauterivien	3
c1	Marnes et calcaires argileux. Cénomanien	3
n2(6)	Marnes noires à ammonites. Valanginien	3
n5b-6	Marnes sombres à patine gris-bleuté à verdâtre ("Marnes bleues"), localement grès verts intercalés. Aptien sup. - Albien	3
g1	Flysch indifférencié (à dominance de grès du Val d'illiez ou d'éléments silteux) et/ou marnes à formaminifères - Oligocène inf.?	3
n1-2M	Marnes et calcaires marneux sombres à ammonites pyriteuses et calpionelles. Berriasien - Valanginien	3
n1(1)	Calcaires, schistes et marnes ou marno-calcaires. Berriasien	1
e7-g1T	Grès de Taveyanne (Zone externe, terrains subalpins) - Priabonien à Oligocène basal	3
n4-5a	Calcaires (bioclastiques) massifs, en gros bancs, +/- marno-calcaires. Barrémien-Bédoulien	1
e6-g1(1)	Formation marno-gréso-micacée (Schistes marno-gréso-micacés), matrice des flyschs à olistholites (à blocs) - Bartonien - Priabonien à Rupélien	3
e6-g1(2)	Marnes à foraminifères, marnes nummulitiques, marnes (et schistes) à Meletta (Zone externe, terrains subalpins), facies bréchiques dans marnes à foraminifères et schistes à Meletta - Bartonien - Priabonien à Rupélien	3
e5-7(1)	Calcaire blanc à nummulites, formation grise: grès et calcaires gréseux, formation brune: calcaires argilo-gréseux et marnes (= couches "des Diablerets" "à Cerithes"), conglomérats (Zone externe, terrains subalpins), brèches - Lutétien à Priabon	1
j7c	Calcaires sublithographiques des falaises moyenne et supérieure du "Tithonique s.l.". Tithonien	1
e4b-5	Calcaires et pseudo-conglomérats à cyanophycées, calcaires fins à silex, Calcaires gréseux à grandes nummulites (Zone externe, terrains subalpins) - Yprésien sup. à Lutétien	1
j6b-7	Calcaires (sub)lithographiques +/- calcaires lités à la base : falaise "tithonique s.l.". Kimmeridgien sup. - Tithonien	1
c5-6S	Calcaires cristallins massifs à silex (Campanien terminal - Maastrichtien)	1
c5-6C	Calcaires argileux lités ou lauzes rubanées (Campanien terminal - Maastrichtien inférieur)	1
c5L	Lauzes et formations biodétritiques diverses (Campanien)	1
j6	Calcaires et marnes non différenciés. Kimmeridgien	1
n3	Calcaires gris, calcaires et marnes, localement calcaires roux à la base. Hauterivien indifférencié	1
c1-6C	Calcaires lithographiques clairs à foraminifères planctoniques (Massif des Bornes, Massif des Aravis), Calcaires sublithographiques (Massif des Aravis et massif du Mont Joly) - Cénomanien à Sénonien	1
n5-c1	Calcaires biodétritiques gréso-glauconieux, grès et marnes glauconieux verts ou noirs (à phosphorites), Grès verts helvétiques, "Gault" (Massifs des Bornes et des Aravis, "Zone externe, terrains subalpins") - Aptien à Cénomanien	1
j5b-7	Calcaires marneux et calcaires lithographiques à céphalopodes. Oxfordien moyen - Tithonien	3
n3b-5U	Facies Urgonien: grès et conglomérat (assise détritique terminale), calcaires massifs clairs, calcaires - schistes noirs (couche transition), calcaire urgonien et marbres (Bord. occ. Massif Aiguilles Rouges - Mont Blanc) - Hauterivien sup à Bédoulie	3
c2	Calcaires blancs à Bryozoaires (Turonien ?)	1
n2	Marnes grises à patine jaune à ammonites pyriteuses, marno-calcaires. Valanginien	3

n3-4	Calcaires gréseux et siliceux (parfois calcaires"à miches" (Massif des Bornes, Massif des Aravis)) à patine brune, calcaires siliceux à spicules, marnes silto-gréseuses (Zone externe, terrains subalpins) - Hauterivien à Barrémien?	1
j3-5a	Terres noires = schistes marneux à miches et nodules siliceux et/ou pyriteux très durs. Rares petits bancs de calcaire noir très dur. Bathonien - Oxfordien inférieur.	3
n2b-3a	Calcaires roux et bicolores (à échinodermes et silex); marnes rousses (Massif des Bornes, Massif des Aravis, (Zone externe, terrains subalpins)) - Valanginien sup. à Hautérivien inf.	1
n1b-2a	Marno-calcaires gris ocreux. Berriasien (sup) - Valanginien basal	3
n2	Marnes noires à ammonites, marnes grises à patine jaune (Zone externe, terrains subalpins) - Valanginien	3
n6G	Grès et sables verts glauconieux (Albien)	3
n1a	Calcaires lithographiques lités beiges. Berriasien inférieur	1
jmS	Schistes. Jurassique moyen	4
j2-3(1)	Calcaires et marnes gréseux, calcaires siliceux, schistes. Bajocien - Bathonien	3
n5b	Complexe calcaire urgonien : "Lumachelle" (Aptien supérieur)	1
n1(1)	Calcaires, marno-calcaires (sombres), grès à ammonites (Bornes et Aravis), calcaires, marnes sombres (Bord. occ. Massif Mont-Blanc - Zone ext .Nappe de Morcles), marno-calcaires "néocomiens" (Zone ext., terrains subalpins) - Berriasien	3
n4-5aU	Complexe calcaire urgonien : calcaires massifs à patine claire de faciès urgonien non différenciés, parfois calcaires à silex (Barrémien - Aptien inférieur)	1
jT	Calcaires lithographiques massifs, +/- calcaires à silex, brèches intraformationnelles indifférenciés. Barre "tithonique". Kimmeridgien-Tithonien	1
n5aU	Complexe calcaire urgonien : masse urgonienne supérieure (Aptien inférieur : Bédoulien inférieur)	1
j7cT	Calcaires lithographiques clairs de la "barre tithonique", calcaires à silex. Tithonien supérieur	1
j5b-7(2)	Calcaires lithographiques - massifs, calcaire dolomitisé (Bord. occ. Massif Aiguilles Rouges), "Lame calcaire du Souay" (Zone ext. Aiguilles-Rouges, Cirque du Fer-à-Cheval) - calcaires massifs (Zone ext. Nappe de Morcles) - Oxfordien sup. à Tithonien	1
n5Uo	Complexe calcaire urgonien : couches inférieures à Orbitolines (Aptien inférieur : Bédoulien inférieur)	1
l4c-j2a	Schistes silico-alumineux (ou argilo-silicieux) à nodules très durs siliceux et pyriteux.Toarcien sup. à Bajocien basal ou inf ("Aalénien s.l.")	3
n4	Barrémien indifférencié (inférieur ?)	1
l(1)	Calcaire et schistes calcaires (bordure externe de Belledonne). Lias indifférencié	1
j5b(1)	Calcaires plaquetés et schisteux, gris bleus, finement siliceux ou spathiques, calcaires plaquetés et noduleux et marnes (Zone externe, Nappe de Morcles) - Oxfordien moy. ("Argovien")	4
n4A	Complexe calcaire urgonien : marnes à Annélides (Barrémien supérieur)	1
l3b-j1	Schistes +/- calcaires ("Lias schisteux") et schistes argilo-siliceux. Domérien - Aalénien (Bajocien ?)	4
n4R	Complexe calcaire urgonien : calcaires roux lités (Barrémien supérieur)	1
j5c	Calcaires (à pâte brune) lités ou plus massifs, marnes peu développées sauf localement. Oxfordien supérieur (Kimmeridgien inf ?)	1
j3-5a	"Terres noires" = schistes marneux, marnes schisteuses grises (Zone externe, Nappe de Morcles) - Bathonien à Oxfordien inf.	3
l3b-4S	Schistes argilo-calcaires (marno-calcaires) et rares calcaires = "Lias schisteux". Domérien - Toarcien	3
j2-5b(1)	Calcaires sableux plaquetés (Bajocien à Bathonien), calcschistes noduleux gris à rosés, calcaires spathiques et gréseux (et schistes noirs) (Bord. ori. et occ. Massifs Aiguilles Rouges et Mont Blanc) - Bajocien à Oxfordien moy. ("Argovien")	4
n4a2	Complexe calc urgonien : Calc arg gris, Calc biocl lités, Marnes du Pré de la Font, Marn de la Fontaine Graillère, Marn de la Fontaine Colombette, Marn du Col de l'Aimoux, Calc arg et à petits silex, Calc biocl du Plateau de Glandasse (Barrémien inf	1
j2-3(1)	Calcaires et schistes gréseux, calcaires spathiques à chailles, alternance de schistes et calcaires (Massif des Aravis et massif du Mont Joly - Bajocien à Bathonien inf.	4

n4a1	Complexe calcaire urgonien : calcaires argileux gris ou roux à rognons de silex (Barrémien inférieur)	1
l4(2)	Marnes schisteuses et calcaires. Toarcien	3
n3-4R	Couches rousses à Panopées (Hauterivien terminal - Barrémien inférieur)	1
l4c-j2a	Schistes argilo-siliceux, à nodules, calcaires gris mylonitisés et schistes noduleux (Zone externe, terrains subalpins) - "Aalénien s.l." : Toarcien sup. à Bajocien inf.	3
n3	Marnes et calcaires noirs à Spatangues, à miches, calcaires siliceux très durs à spicules (Hauterivien)	3
l3b(1)	Schistes bruns et roux (+/- calcaires). Domérien	4
n2-3	Calcaires gréso-argileux bruns (Valanginien - Hauterivien)	1
j5bs	Marno-calcaires à joints marneux (Terres noires), "Argovien" supérieur Oxfordien moyen	3
j5bm	Niveaux marneux prédominants (Terres noires), "Argovien" moyen. Oxfordien moyen	3
l1-3a(1)	Calcaires dominants et schistes ou calcschistes (marnes) = "Lias calcaire". Hettangien - Carixien	3
n2M	Marnes gris bleuté jaunissantes (Valanginien)	3
j5bi	Alternance marno-calcaires et marnes (Terres noires), "Argovien" inférieur. Oxfordien moyen	3
l2b-4	Calcaires et schistes calcaires : Schistes argilo-calcaires noirs (Domérien - Toarcien) ("Synclinal médian de Belledonne"), calcaires et marnes, calcaires marneux (Bord. occ. Massif Mont Blanc) - Sinémurien sup. ("Lotharingien") à Toarcien	3
n2	Valanginien indifférencié	1
l2b-3a	Quartzites ocre, calcaires gréseux orangés (Bordure occidentale du Massif du Mont Blanc (Zone complexe de Chamonix-Martigny)) - Sinémurien sup. ("Lotharingien")	0
l1-3a(1)	Calcaires gris à niveaux schisteux noirs (Hettangien à Carixien) ("Synclinal médian de Belledonne"), calcaires siliceux, calcaires en plaquettes sombres (Bord. occ. Massifs Aiguilles Rouges et Mont Blanc) - Hettangien à Sinémurien	4
n2S	Complexe des Calcaires du Fontanil : calcaires sommitaux du Fontanil ou "Calcaires à silex" (Valanginien supérieur)	1
t7-l1	Argilites, grès et calcaires. Rhétien et base Hettangien ?	3
n2R	Complexe des Calcaires du Fontanil : calcaires roux supérieurs du Fontanil (Valanginien)	1
t	Trias indifférencié	1
j4c-5a	Marnes indifférenciées (Terres noires). Callovien supérieur-Oxfordien inférieur	3
tG(1)	Gypse - Trias	3
n1-2F	Complexe des Calcaires du Fontanil s.l. (Berriasien sup. - Valanginien)	1
ts(1)	Argilites versicolores, calcaires recristallisés, schistes dolomitiques et dolomies versicolores. Trias (sup)	3
tsD(1)	Cargneules, dolomies, calcaires dolomitiques ("Montagne des Posettes" - Bordure occidentale du Massif des Aiguilles Rouges et Bordure occidentale su massif du Mont Blanc (Zone complexe de Chamonix-Martigny) - Trias moy. à sup.	1
n2Co	Complexe des Calcaires du Fontanil : calcaires coralligènes de la Sure (limite Berriasien - Valanginien)	1
n2F	Complexe des Calcaires du Fontanil : calcaires inférieurs du Fontanil (Berriasien terminal - Valanginien inférieur)	1
tK	Cargneules (localement argilites versicolores)	3
tQ	Microconglomérats et grès arkosique, grès quartzitique et conglomérats (Zone ext. Aiguilles-Rouges et Cirque du Fer-à-Cheval) (Ladinien - Carnien), quartzites (Bord. Occ. Massif Aiguilles Rouges (Zone complexe de Chamonix-Martigny)) - Trias	3
n1-2M	Complexe des Marnes de Narbonne : Couches de transition aux Calcaires du Fontanil ; Calcaires argileux ; Marnes de Narbonne (Berriasien supérieur - Valanginien inférieur)	3
tG(1)	Gypses (anhydrites en profondeur). Trias supérieur	3
r-tQ(1)	Quartzites (faciès verrucano) - Permien à Trias inf.	0
n1b-C	Néocomien inférieur marno-calcaire : Calcaires gris lités (Berriasien moyen-supérieur) ; Calcaires argileux et marnes (Berriasien inférieur) ; Calcaires gris lités (Berriasien)	0
tsD(2)	Dolomies et calcaires dolomitiques et/ou cargneules. Trias supérieur	1
r	Conglomérats, grès, schistes versicolores - Permien	3

n1	Calcaires argileux beiges et marnes grises (Berriasien)	3
tms(1)	Microconglomérats, quartzites et grès arkosiques. Trias moyen -supérieur	0
n1i	Néocomien inférieur marno-calcaire : Couches à ciment de la Porte de France : calcaires argileux (Berriasien basal)	3
h4-5(1)	Schistes noirs et grès à anthracite - Westphalien à Stéphanien	3
h4	"Westphalien D": conglomérats, grès et schistes (gris à noirs) - Westphalien	3
j6-7Tms	Calcaires lithographiques, calcaires à silex, brèches intraformationnelles (Tithonien indifférencié)	1
j7Ts	Calcaires "tithoniques" supérieurs (bordure Chartreuse subalpine) (Tithonien supérieur)	1
ã	Granite du Mont Blanc (parfois à enclaves) - Paléozoïque	0
j6-7Tm	Calcaires "tithoniques" moyens (bordure Chartreuse subalpine) (Kimméridgien supérieur - Tithonien inférieur)	1
j6	Kimméridgien indifférencié	0
h(1)	Grès et schistes noirs (à plantes) +/- conglomérats, charbon. Houiller : Stéphanien inférieur à moyen (p.p.)	3
ã(1)M	Granite mylonitisé (Région de Chamonix)	0
j6Ti	Calcaires "tithoniques" inférieurs (bordure Chartreuse subalpine) (Kimméridgien supérieur)	1
j6StE	Couches de la galerie du Saint-Eynard : calcaires alternant avec des lits de marnes (Kimméridgien inférieur)	1
j6MB	Calcaire en petits bancs (régions de La Mure et du Beaumont) (Kimméridgien inférieur)	1
j6-7	Calcaires "tithoniques" (bordure Chartreuse subalpine) (Jurassique supérieur)	1
j6A	Calcaires argileux (bordure Chartreuse subalpine) (Kimméridgien)	3
j5-6	Calcaires "séquaniens" (bordure Chartreuse subalpine) (Oxfordien terminal - Kimméridgien inférieur)	1
j5	Calcaires marneux "argovo-rauraciens" (rive droite du Grésivaudan) (Oxfordien moyen-supérieur)	3
j3-5	"Terres noires" supérieures (Callovien supérieur - Oxfordien inférieur) ; Terres noires" inférieures (Bathonien supérieur - Callovien moyen) (rive droite du Grésivaudan)	3
P	Filons de pegmatites (Massif du Mont Blanc)	0
j3i	Calcaires noirs lités (rive droite du Grésivaudan) (Bathonien inférieur ?)	1
ci	Filons de cipolins (Massifs du Mont Blanc et des Aiguilles Rouges)	0
j2-3CS	Alternance de calcaires argileux gris-noir et de marnes très noires (Bajocien - Bathonien p.p.)	3
j2M	Formation de Bramefarine : marnes noires à bancs calcaires (rive gauche du Grésivaudan) (Bajocien inférieur basal)	3
j1	Argilites brunes à nodules siliceux et pyriteux (Aalénien)	3
ã3	Monzogranites (grossiers) à biotite (Granitoïdes de la Lauzière à 341 +/- 13 Ma, Massif de Belledonne). Viséen.	0
l3-4	Marnes noires et marno-calcaires (Domérien - Toarcien)	3
ä(1)	Amphibolites (Massifs du Mont Blanc et des Aiguilles Rouges), amphibolites, amphiboloschistes	0
pã3-4(1)	Granites souvent porphyroïdes +/- déformés, pour partie gneissiques (gneiss oeillés), parfois migmatitiques (Massif de Belledonne, complexe plutonique de St-Colomban-des-Villards à 343 +/-16 Ma). Viséen	0
pã3-4(2)	Granites porphyroïdes pour partie gneissiques et migmatitiques, à mégafeldspaths automorphes (Massif de Belledonne, pluton de St-Colomban-des-Villards à 343 +/-16 Ma). Viséen	0
oæ	Lentilles de gneiss oeillés (Paragneiss migmatitiques et amphibolites (Massif de Belledonne)), gneiss granitoïdes, souvent oeillés (région de Chamonix), gneiss granitoïdes (Cluses) - Cambrien à Ordovicien	4
æa	Gneiss à amphibole (Massifs du Mont Blanc et des Aiguilles Rouges)	4
l4Sc	Schistes calcaires et marno-calcaires (Toarcien indifférencié)	3
Mæ(1)	Migmatites à faciès anatectique (Massif du Grand Châtelard). Paléozoïque inférieur	0
Mæ(3)	Paragneiss migmatiques mylonitisés, gneiss et migmatites indifférenciés localement à amphiboles, séricitoschistes feldspathiques. Massif de Belledonne. Paléozoïque inf. ou Protérozoïque terminal	4

æñMB	Zone externe, Massif du Mont-Blanc : Gneiss et micaschistes indifférenciés (plus ou moins transformés en mylonitoschistes), zone de métamorphisme de contact	4
blMæ	Blastomylonites probables (Gneiss à grain fin, leptynites), blastomylonites de gneiss migmatitiques (région de Chamonix)	4
æã	Orthogneiss à biotite (Massif de Belledonne s.l.). Paléozoïque inf. ou Protérozoïque terminal	4
bl-0æ	Blastomylonites de gneiss granitoïdes, souvent oeillés (région de Chamonix)	4
my-0æ	Mylonitoschistes de gneiss granitoïdes, souvent oeillés (région de Chamonix)	4
l3bMC	"Marnes de la Clapisse", "Marnes d'Allemont", calcaires marneux noirs (Domérien)	3
l3aMB	Calcaire rubané, niveau à entroques, calcaire lité gris (régions de La Mure et du Beaumont) (Carixien)	1
my-ã	Mylonitoschistes de granites (région de Chamonix)	0
l1-3a	"Lias calcaire" : calcaires dominants et schistes ou calcschistes (Hettangien - Carixien indifférenciés)	4
ñ	Schistes cristallins indifférenciés	4
l1-3	Calcaires lités (Hettangien-Carixien non différencié)	1
æñB	Gneiss et micashistes en septa au sein du pluton de St-Colomban (Massif de Belledonne). Paléozoïque inférieur	4
l2-3MB	Calcaire rouille et calcaire gris, niveau à entroques (régions de La Mure et du Beaumont) (Sinémurien supérieur - Carixien inférieur)	1
ñB	Chloritoschistes, schistes quartzeux, schistes ocellaires, schistes albitiques = "Schistes verts" ("Série verte supérieure" du Massif de Belledonne).Paléozoïque inf.	4
l2MB	Calcaire gris (régions de La Mure et du Beaumont) (Lotharingien inférieur - Sinémurien s.s.)	1
l1-2Cf	Calcaire fin et schistes noirs (Hettangien - Sinémurien inférieur)	4
íä	Amphibolites et leptynites ("Série verte" du Massif de Belledonne). Paléozoïque inférieur	0
l1CD	Calcaires et localement dolomies (« couches à Cardinies ») (Hettangien)	1
t7C	Calcaires noirs dolomitiques (Rhétien ?)	1
æM(2)	Gneiss (Massif du Grand Châtelard). Précambrien ? - Paléozoïque inf.	4
tS	Argilites et dolomies versicolores (Trias)	3
tK	Cargneules ocre bréchiques et vacuolaires (Trias)	3
tG	Gypse (Trias)	3
tD	Dolomies et calcaires dolomitiques (Trias supérieur)	1
tQ	Conglomérats, grès, arkoses (Trias moyen-supérieur)	3
ñæD	Micaschistes sériciteux, chloriteux (chloritoschistes), quartzeux, et/ou albitiques (micaschistes ocellaires) ("Série satinée", Massif de Belledonne). Précambrien - Paléozoïque inf. ?	4
K3	Spilites et cinérites (Trias ?)	0
r	Conglomérats, grès et pélites violettes ou vertes (Permien)	3
e7F	Flyschs indifférenciés (des Aiguilles d'Arves). Priabonien	3
h5Ûö	Rhyolites et dacites +/- trachytes ("orthophyres") dans le Houiller (Stéphanien ?)	0
h4-5	Conglomérats, grès et schistes noirs à plantes, anthracite (Westphalien - Stéphanien)	3
e7Fsg	Flyschs "schisto-gréseux" ("Flysch du Cheval Noir et des Aiguilles d'Arves"). Flysch noir. Priabonien	3
e7Fc	Flyschs "calcaires" ("Flysch du Cheval Noir et des Aiguilles d'Arves"). Priabonien	3
e7N	Calcaires à grandes Nummulites ("Flysch du Cheval Noir et des Aiguilles d'Arves"). Priabonien	1
e7S	Schistes intercalés dans conglomérats et grès ("Flysch du Cheval Noir et des Aiguilles d'Arves"). Priabonien	3
e7Cg(2)	Conglomérats polygéniques et grès à la base des flyschs ("Flysch du Cheval Noir et des Aiguilles d'Arves"). Priabonien	3
sid	Filons de sidérose	0
cs-ol	Calcschistes, calcaires et schistes sombres, au moins pour partie en olistolites. Crétacé supérieur (à Paléocène ?)	4
ï	Filons de lamprophyre	0
ci-ol	Calcschistes, calcaires à lits de silex, microbrèches, au moins pour partie en olistolites. Crétacé inférieur	4
Ê	Filons de quartz, localement quartz et sidérite non minéralisés	0

j-eBr	Complexe de brèches et conglomérats, calcaires, calcaires gréseux, calcschistes, olistolithes. Tertiaire ou Jurassique à Tertiaire ?	1
l3b(1)	Calcaires gris à lits schisteux (Klippe des Annes) - Pliensbachien sup. ("Domérien sup.")	1
j-eQ	Quartzites au sein du complexe j-eBr tertiaire ou jurassique à tertiaire	0
l3b(2)	Calcaires argileux et marnes micacées (Klippe des Annes) - Pliensbachien sup. ("Domérien inf.")	3
j-eC	Calcaires massifs au sein du complexe j-eBr tertiaire ou jurassique à tertiaire	1
l3a	Schistes, alternances de schistes et de calcaires organo-détritiques noirs (Nappe supérieure-Klippe de Sulens), calcaires massifs et calcaires argileux noirs (Klippe des Annes) - Pliensbachien inf. ("Carixien")	4
l2(1)	Alternances régulières de schistes et de calcaires argileux noirs (Nappe supérieure-Klippe de Sulens) - calcaires spathiques, marnes et calcaires argileux (Klippe des Annes) - Sinémurien sup.	4
jA	Argilites noires. Lias, Dogger ou Oxfordien ?	3
l1-2(1)	Calcaires organo-détritiques noirs, crinoïdiques, à silex (Nappe supérieure-Klippe de Sulens), calc. biodétritiques à chailles, calc. argileux, calc. crinoïdiens à chailles (Klippe des Annes) - Hettangien à Sinémurien inf.	1
t7c	Alternances de calcaires organo-détritiques et d'argiles noires micacées (Nappe supérieure-Klippe de Sulens) - Rhétien	3
t7b	Alternances de calcaires organo-détritiques, d'argilites vertes et rouges et de calcaires dolomitiques (Nappe supérieure-Klippe de Sulens) - dolomies, calcaires dolomitiques et argilites rouges (Klippe des Annes) - Rhétien	3
jmCS	Calcaires sableux. Jurassique moyen ("Dogger")	1
t7a	Calcaires dolomitiques et cargneules (Nappe supérieure-Klippe de Sulens), cargneules (Klippe des Annes) - Rhétien	1
l(2)	Calcaires, localement schistes roux. Lias indifférencié	1
j1(1)	Schistes noirs silico-alumineux peu calcaires, à nodules siliceux ou pyriteux très durs. Aalénien	4
l4-J1	Marno-calcaires sableux, marnes, calcaires argileux. Toarcien	3
t3-7	Pélites noires à débris charbonneux (Klippe des Annes) - Trias moy. à sup.	3
l3b(2)	Schistes roux. Pliensbachien sup. (Domérien)	4
c1-e4	"Couches rouges" : calcaires argileux et marnes blancs, rouges ou roses (Nappe des PréAlpes médianes) (Môle, Brasses, Miribel) - Cénomanien à Yprésien inf.	3
n1-4	Calcaires clairs en plaquettes, à silex et interlits marneux (Nappe des PréAlpes médianes - Môle, Brasses, Miribel), alternances de calcaires à grains fins et schistes noirs (Nappe des PréAlpes médianes) - Berriasien à Barrémien ("Néocomien")	3
l1-3a(2)	Calcaires argileux, calcaires ltés, dolomies ("Lias calcaire"). Hettangien - Carixien	3
j5-7(2)	Calcaires blancs, massifs, oolithiques (Nappe des PréAlpes médianes) (Môle, Brasses, Miribel) - Oxfordien moy. à Berriasien	1
j5b(3)	Calcaires argoviens noduleux (parfois rouges) et "marbre de la Vernaz" (Nappe des PréAlpes médianes) (Môle, Brasses, Miribel) - Oxfordien moy. ("Argovien")	1
t7(3)	Argilites et schistes noirs, calcaires organogènes (coquillers). Rhétien	3
ä	Amphibolites	0
ts(2)	Argilites versicolores (jaunes, violettes et vertes). Trias supérieur	3
tm(1)	Dolomies, calcaires, argilites. Trias moyen	1
tK(1)	Cargneules.	3
tG(2)	Gypses (anhydrites en profondeur). Trias (supérieur)	3
l4-j4(1)	Marnes beiges et calc. à Cancellophycus, calc. argileux et siliceux, marnes jaunes (Nappe des PréAlpes médianes), calc. compacts siliceux gris-noirs ("Formation des Brasses" Nappe des PréAlpes médianes - Môle, Brasses, Miribel) - Lias sup. à Dogge	3
r(2)	Conglomérats, pélites et schistes violets ou versicolores. Permien	3
h5	Pélites noires, psammites, grès. Stéphanien ?	3
l2-4(1)	Calcaires spathiques clairs, calcaires glauconieux et marnes à lammelibranches, calcaires à pentacrines (unité des "calcaires échinodermiques"), marnes brunes (+/- silex) (Nappe des PréAlpes médianes - Môle, Brasses, Miribel) - Sinémurien à Toar	1
t7(2)	Alternances de schistes noirs et de calcaires fins, dolomitiques et de lumachelles (Nappe des PréAlpes médianes), calcaires noirs et marnes, schistes noirs - Rhétien	4
t6-7(4)	Dolomies et cargneules - (Nappe des PréAlpes médianes) - Norien à Rhétien	1

e-gBr(2)	Brèches nummulitiques basales des flyschs et wildflyschs éocènes à oligocènes (Nappe inférieure-Klippe de Sulens) - Eocène à Oligocène	1
ñc	Roches cristallophylliennes non migmatitiques : Ensemble cortical du Pelvoux et série du Taillefer (Dévono-dinantien) : Conglomérat métamorphique	0
K1-3	Roches cristallophylliennes non migmatitiques : Ensemble cortical du Pelvoux et série du Taillefer (Dévono-dinantien) : Albitophyre et tuf sodique	0
j5c-7	Calcaires lithographiques (Nappe inférieure-Klippe de Sulens) (Préalpes externes) - Oxfordien sup. à Tithonique	1
st/ñæ	Minéraux repéres du métamorphisme : staurotide dans micaschiste et gneiss albitique. Complexe de Belledonne (Précambrien p.p.)	4
ä(2)	Amphibolites "Ophiolite de Chamrousse". Complexe de Belledonne (Précambrien p.p.) (limite Cambrien - Ordovicien)	0
äì	Métagabbro, métapyroxénite. Complexe de Belledonne (Précambrien p.p.)	0
ô	Serpentinites : pyroxénolite et péridotite serpentinisées. Complexe de Belledonne (Précambrien p.p.)	0
æ(2)ä	Roches cristallophylliennes migmatitiques (formation du noyau du Pelvoux) : Gneiss du Lauvitel avec passée d'amphibolite (nord du Vénéon)	0
í(2)	Roches cristallophylliennes migmatitiques (formation du noyau du Pelvoux) : Leptynite (gneiss mylonitisé) de la Pointe de Marceline	0
l4-j4(2)	Brèche inférieure: brèche à éléments dominants calcaréo-dolomitiques (Nappe de la Brèche) et passage au faciès frontal - Lias sup. à Dogger	1
l2-4(2)	Schistes inférieurs: schistes calcaires gris ou marneux - Calcaires massifs, spathiques (en barres, surtout à la base de la série) (Nappe de la Brèche) - Lias moy. à sup.	4
t7B	Calcaires lumachelliques et marnes (Nappe de la Brèche) - Rhétien	1
t5-7(1)	Dolomies et cargneules (cargneules forme une semelle en position basale) (Nappe de la Brèche) - Trias sup.	1
Zcarb	Roches carbonatées métamorphiques diverses	0
j5S	Schistes et marnes noirs. Oxfordien (?)	3
j4-5Br	Brèches calcaires ("Brèche du Télégraphe" et équivalents). Callovo - Oxfordien (?)	1
e2-6(1)	Flysch noir à lentilles de Couches rouges (Mélange supérieur coiffant les nappes des Médianes), schistes marneux noirs - Paléocène sup. à Eocène moy.	3
Zn	Schiste carburé, grès, microbrèche	4
j4CM	Calcaires marneux, calcschistes ("Couches à Cancellophycus"). Callovien	3
Zí	Gneiss, gneiss leptynitique et leptynite	4
e-gW	Flyschs indifférenciés: (a) matrice entre les éléments (flyschs chaotiques/dissociés), (b) éléments du mélange (flyschs cohérents), Wildflyschs (Annemasse) à lentilles d'éléments ultrahelvétiques, à la base de Nappe Gurnigel - Éocène à	3
Zñ	Micaschiste	4
Zíñ	Gneiss, leptynite et micaschiste	4
jmC(4)	Calcaires marno-gréseux et calcaires massifs bioclastiques "organo-détritiques" et vires schisteuses. Jurassique moyen (Bajocien sup. - Bathonien)	3
lms(2)	Schistes et calcschistes sombres, +/- calcaires spathiques. Lias moyen - sup. : Toarcien - Aalénien ?	4
Zæ	Roches très feldspathiques : Gneiss gris migmatitique	4
c6b-e3	Couches rouges: calcaires fins argileux de couleur rouge ou verte riches en foraminifères planctoniques, Flysch de Niesen au sein d'un flysch éocène à oligocène - Maastrichtien sup. à Paléocène sup.	1
æí3	Roches très feldspathiques : Gneiss oeillé de l'Alpetta	4
l1-4	Calcaires (lités) à zones siliceuses, calcaires sombres en bancs massifs, calcaires marmoréens et calcschistes. Hettangien - Sinémurien sup. ?, Toarcien ?	4
st/Zñí	Minéraux repéres du métamorphisme : staurotide dans gneiss, leptynite et micaschiste	0
t7(6)	Dolomies et calcaires lumachelliques, schistes. Rhétien	1
st/Zæ	Minéraux repères du métamorphisme : staurotide dans gneiss migmatitique. Gneiss d'Allemont à biotite, muscovite avec passées d'amphibolites. Rameau int. de Belledonne : W de l'accident de la Belle Étoile-le Rivier (Précambrien à Carbon. inférieu	0
ky/Zñ	Minéraux repéres du métamorphisme : disthène dans micaschiste. Micaschistes à grenat - staurotide - disthène. Rameau int. de Belledonne SW (Ouest de l'accident de la Belle Étoile-le Rivier) (Dévonien - Dinantien)	0

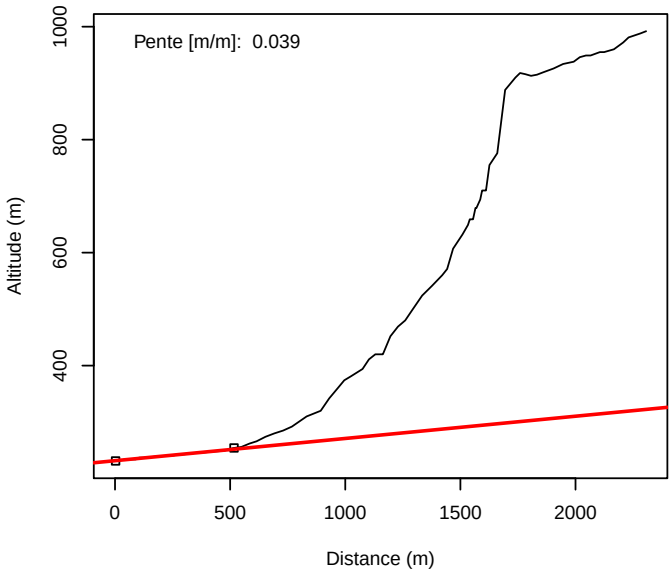
tsD(1)	Dolomies et argilites, calcaires. Trias (sup)	1
st-ky/Zñ	Minéraux repéres du métamorphisme : staurotide et disthène dans micaschiste	0
tK(4)	Cargneules pour partie associées à dolomies jaunes, schistes bariolées (U. du Petit St-Bernard)	3
å	Chloritoschistes de Chamrousse	4
j6-7	Lentilles de calcaires compacts à rognons de silex, plaquetés, ondulés, massifs ou soudés ("Malm de type Anzeide") dans un flysch éocène à oligocène - Kimmeridgien à Tithonien	1
äî	Amphibolite dérivant de l'association spilite-kératophyre : Amphibolite à caractère spilitique	0
cs-bl	Blocs de calcschistes de la zone briançonnaise emballés dans gypses (au Front Houiller). Néocrétacé.	4
ä(b)	Amphibolite dérivant de l'association spilite-kératophyre : Amphibolite (s.l.)	0
ci-bl	Blocs de calcaires à silex de la zone briançonnaise emballés dans gypses (au Front houiller). Crétacé inf.	1
js-bl	Blocs de marbres blancs de la zone briançonnaise emballés dans gypses (au Front houiller). Malm	1
j1-3	Lentilles de schistes et calcaires du Dogger, "type Arveyes": schistes argileux noirs micacés, schistes marneux et calcaires fins tachetés gris, grès grossiers micacés et turbiditiques au sein d'un flysch éocène à oligocène - Aalénien à Bathoni	3
tG(5)	Gypses (anhydrites en profondeur), principalement de la "Zone des gypses". Trias supérieur	3
íä	Alternance "leptynites - amphibolites". Rameau interne de Belledonne : Belledonne sud-ouest (Ouest de l'accident de la Belle Étoile - le Rivier) (Dévonien - Dinantien?)	0
r(7)	Schistes rouges ou versicolores et grès conglomératiques. Permien	4
ñf2	Chloritoschiste et micaschiste à biotite feldspathisés près des leptynites ; Chloritoschiste feldspathisé. Zone externe, Zone Dauphinoise, Massif des Grandes Rousses (Paléozoïque)	4
ñGR	Chloritoschistes et micaschistes à biotite. Zone externe, Zone Dauphinoise, Massif des Grandes Rousses (Paléozoïque)	4
h5Cg	Conglomérats quartzeux, grès feldspathiques, pélites (Formation du Rocher du Loup). Houiller, Stéphanien moyen ?	0
æGR	Gneiss ocellaires bruns (Paléozoïque). Zone externe, Zone Dauphinoise, Massif des Grandes Rousses	4
ím	Leptynite à muscovite ("granulite de P. Termier") (roche volcanique ou hypo-volcanique métamorphisée). Zone externe, Zone Dauphinoise, Massif des Grandes Rousses	2
Mæ(1)	Gneiss migmatitique des Grandes Rousses	4
ñl1-5	Schistes cristallins mylonitiques contenant des filons clastiques de Lias calcaire (Croix de Cassini). Zone Dauphinoise	4
h3C	Conglomérats, grès grossiers (Formation de Cristol). Namurien ?	3
h5-r(2)	Conglomérats clairs, grès, arkoses et pélites versicolores, localement calcaires (Assises de Roche-Château et de Courchevel). Houiller, Stéphano-Permien (?)	3
îë(2)	Zone Briançonnaise - Microdiorites ("filons-couches" du Carbonifère)	0
h4-5(2)	Conglomérats, grès (et arkoses) micacés, schistes (pélites : siltites), charbon (anthracite) : Houiller productif indifférencié (Assise de Tarentaise). Houiller; Westphalien (D) - Stéphanien inf. (A)	3
Ci	Filons de cipolin	1
c-e(2)	Calcschistes et calcaires planctoniques ("Marbres en plaquettes") gris à versicolores. Crétacé sup. - Eocène inférieur	4
e4-7	Schistes et calcaires gréseux noirâtres ("Schistes de Palognan"). Eocène	4
cs-e(2)	Marbres chloriteux (et calcschistes planctoniques). Encroûtements minéralisés associés. Crétacé sup. - Paléocène	1
j2C	Formation de Bramefarine : alternance de bancs calcaires et de schistes (rive gauche du Grésivaudan) (Bajocien inférieur)	1
tm	Calcaires, dolomies, brèches, non différenciés. Trias moyen (Anisien - Ladinien)	1
j3-4	Calcschistes noirs ou calcaires en plaquettes, calcaires bioclastiques noirs, brèches, marbres ; localement à la base : argiles bauxitiques et schistes. Dogger (Bathonien sup. - Callovien).	4

tG(6)	Gypses (anhydrites en profondeur) +/- intercalations, blocs et lentilles de dolomies et schistes. Carnien	3
tm(3)	Calcaires et/ou dolomies, non différenciés. Trias moyen (Anisien - Ladinien), localement Trias sup. (?)	1
tmD	Dolomies blanches et grises. Ladinien supérieur	1
tiQ	Quartzites clairs (blancs). Trias inférieur (Scythien)	0
r-t	"Quartzites phylliteux, conglomérats quartzeux à quartz roses, arkoses et pélites versicolores. "Verrucano". Permo-Trias (Trias inférieur)"	0
tmR	Calcaires (à silex) et dolomies, alternance de calcaires et de dolomies ("Calcaires rubanés"), brèches. Anisien moyen à sup. - Ladinien inf.	1
tiQv	Quartzites versicolores (sommitales). Trias inférieur	0
tiQ(4)	Quartzites. Trias inférieur	0
r-t	Quartzites phylliteux, conglomérats quartzeux à quartz roses et pélites violettes, séricitoschistes, "Verrucano", Groupe d'Etache". Permo-Trias (Trias inférieur)	0
r-tSA	Séricitoschistes albitiques. Permo-Trias (?)	4
rCg	Quartzites conglomératiques, conglomérats polygéniques. Permien (?)	0
rS	Schistes gris calcareux et lentilles dolomitiques. Permien	4
ñN	Micaschistes à chlorite, albite et petits grenats, mylonitisés ("Ecailles intermédiaires", La Norma). Anté-Namurien - Paléozoïque inférieur ?	4
cSN	Schistes noirs (du Col de Vars) et grès très fins, (black shales), "Complexe de base". Albien-Cénomanien ?	3
S	Schistes gris à bancs de quartzites albitiques, micaschistes indifférenciés, schistes noirs charbonneux ("Complexe schisteux supérieur" du Massif de Bellecôte). Cambrien moyen ?	4
ñAr	Micaschistes de l'Arpont, séricitoscistes albitiques (Socle de Vanoise). Paléozoïque inf. ou Précambrien ?	4
l(6)	Calcschistes phylliteux, marbres sombres à lits siliceux (Unité de la Grande Motte). Lias	4
l1(2)	Calcaires massifs et calcschistes sombres (Unité de la Grande Motte). Lias inférieur	1
t7(7)	Schistes dolomitiques et calcaires noirs lumachelliques (Unité de la Grande Motte). Rhétien	4
t6D(1)	Dolomies claires (blondes), litées, parfois bréchiques à lits d'argilites noires ou versicolores, "Dolomia principale" (Unité des Lozes et de la Grande Motte). Norien p.p.	1
cs(2)	Argilites noires et/ou versicolores ("Black shales"), avec niveaux de brèches (Complexe de la Grande Hoche). Aptien-Cénomanien	3
tK(5)	Cargneules de la Zone briançonnaise et de la Nappe des gypses	3
tG(7)	Gypses (anhydrites en profondeur) à éléments et éventuellement intecalations de schistes et dolomies. Carnien à Norien	3
ûæ	Matériel détritique d'origine continentale remanié au sein des Schistes lustrés : quartzites (micacés), gneiss subordonnés.	5
csC(4)	Calcschistes gris, marbres impurs ("Schistes lustrés" indifférenciés). Crétacé sup. basal	4
ciCS	Alternance de bancs calcaires gris et de calcshistes avec localement des niveaux de schistes noirs (Formation de la Replatte, "Schistes lustrés"). Valanginien-Barrémien	4
hydro	Réseau hydrographique	5
n2b	Calcaires roux et bicolores à échinodermes, +/- marnes rousses. Valanginien (sup. ?)	1

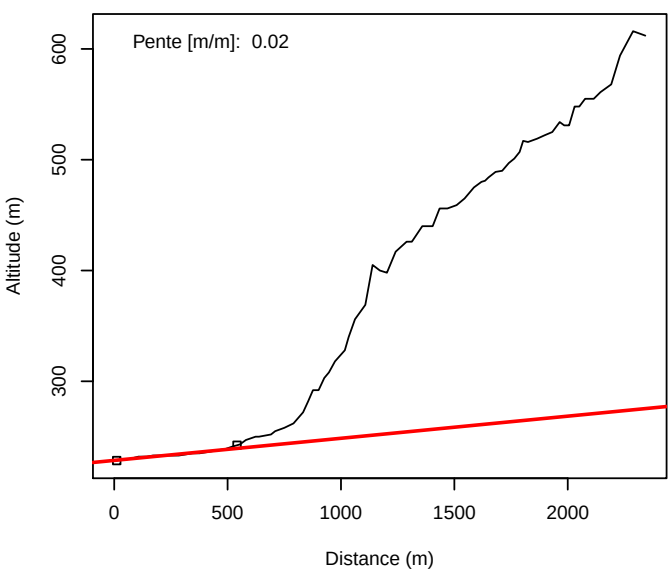
C Pentes des cours d'eau

Profil en long du drain principal de chaque bassin versant (données d'altitude : IGN BD ALTI 25 m, implantation cartographique des axes des cours d'eau : IGN BD TOPO) et estimation de la pente au droit de l'exutoire.

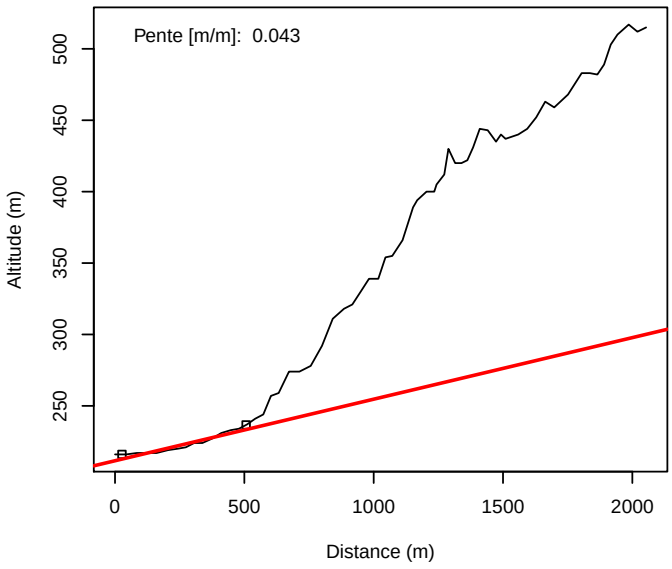
Torrent:MONFORT
Commune: CROLLES (38)
ID: AS1



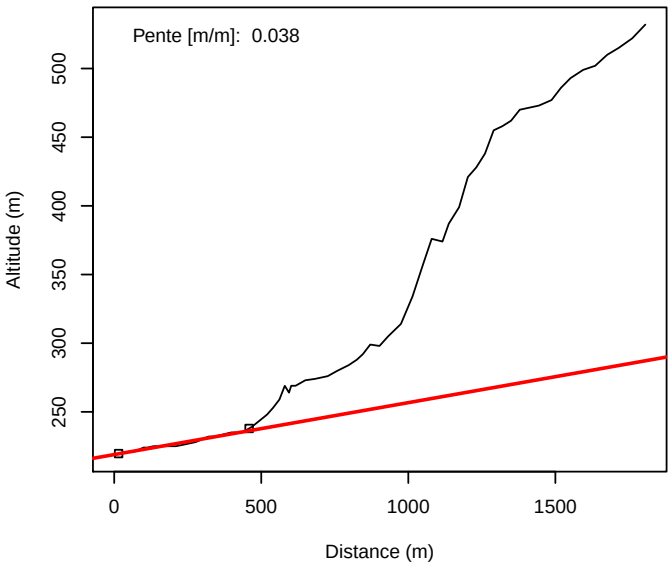
Torrent:HURTIERES
Commune: LA PIERRE (38)
ID: AS10



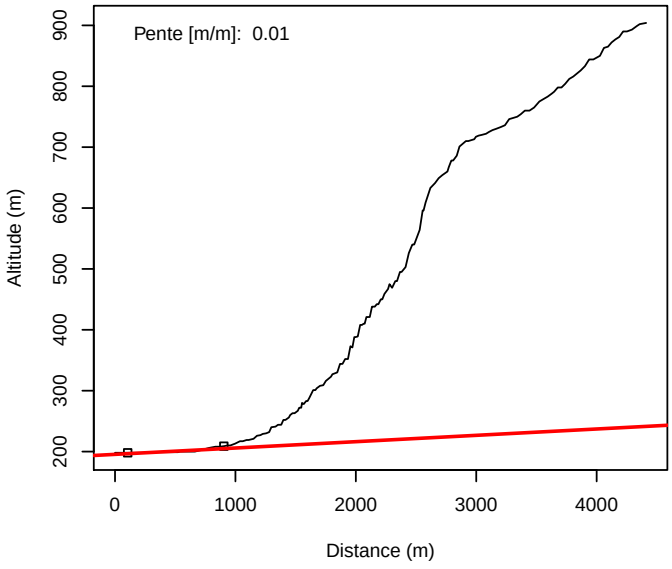
Torrent:MURIANETTE
Commune: MURIANETTE (38)
ID: AS11



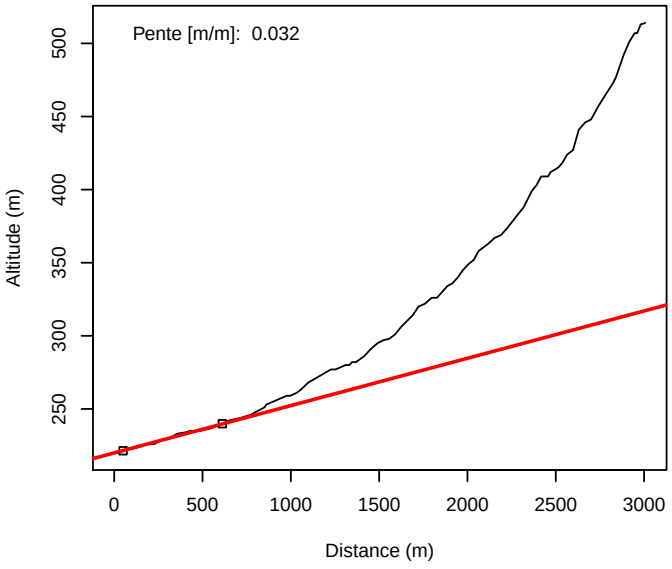
Torrent:VERSOUD
Commune: LE VERSOUD (38)
ID: AS12

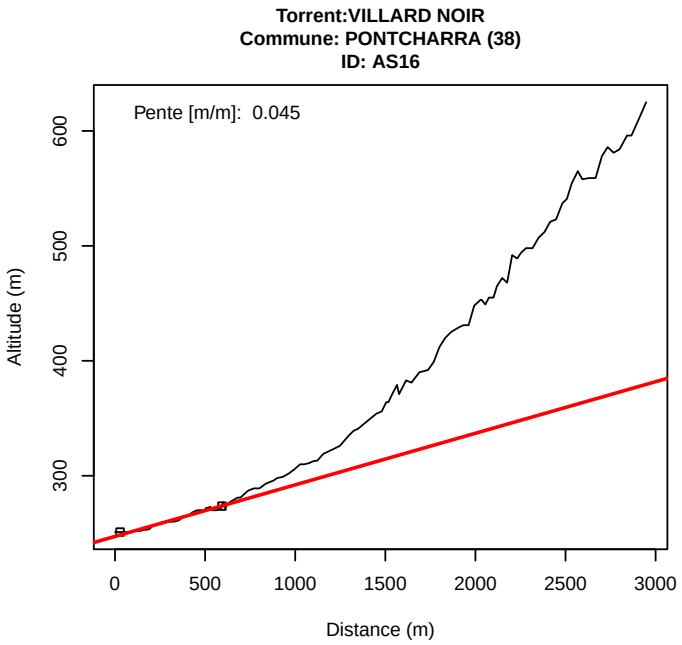


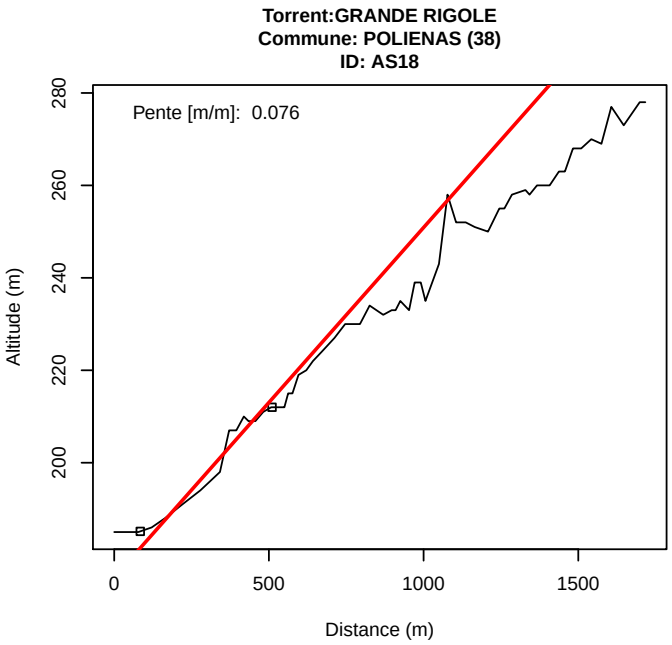
Torrent:LANFREY
Commune: FONTANIL−CORNILLON (38)
ID: AS14

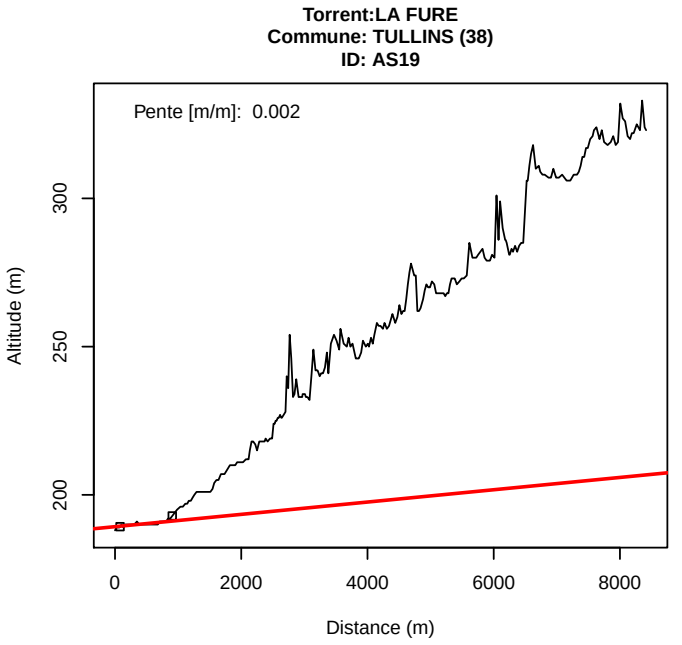


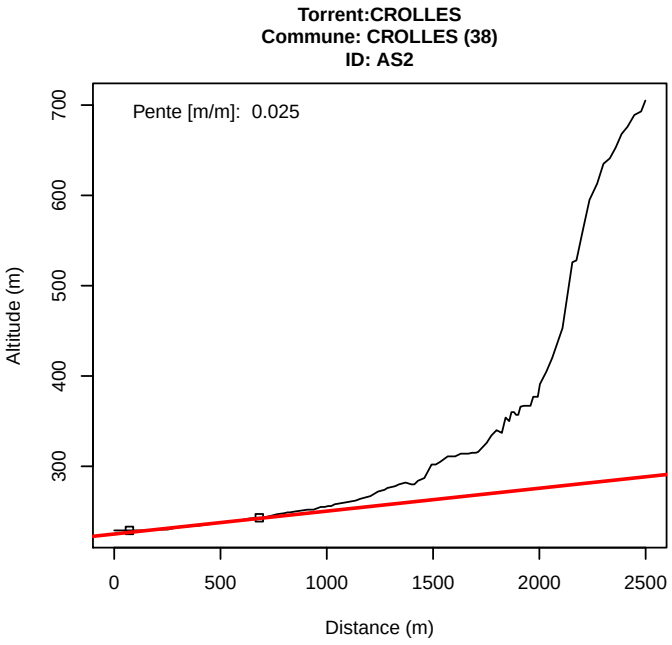
Torrent:JAILLIERES
Commune: MEYLAN (38)
ID: AS15

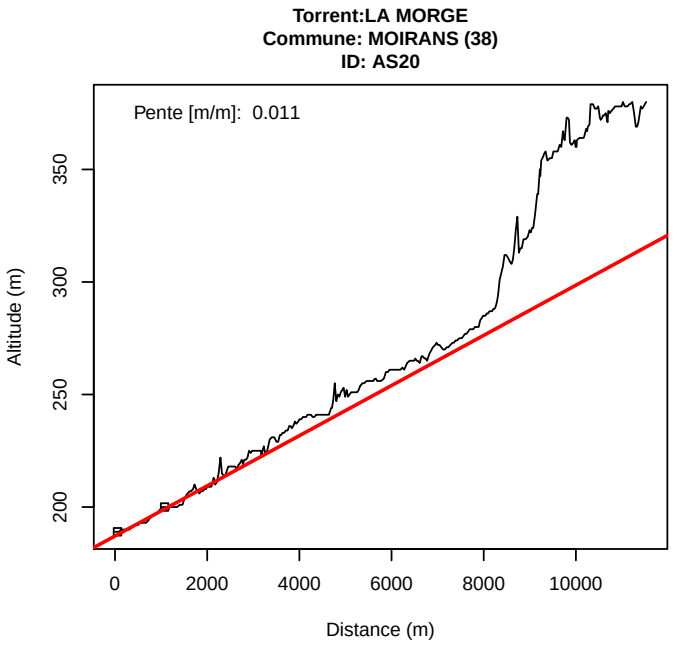


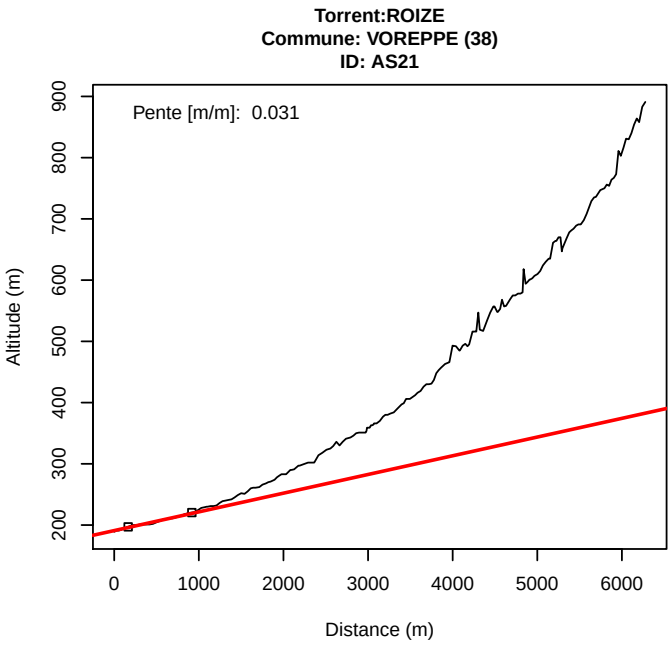

Torrent:VILLARD NOIR
Commune: PONTCHARRA (38)
ID: AS16
Pente [m/m]: 0.045
Altitude (m)
Distance (m)


Torrent:GRANDE RIGOLE
Commune: POLIENAS (38)
ID: AS18
Pente [m/m]: 0.076
Altitude (m)
Distance (m)

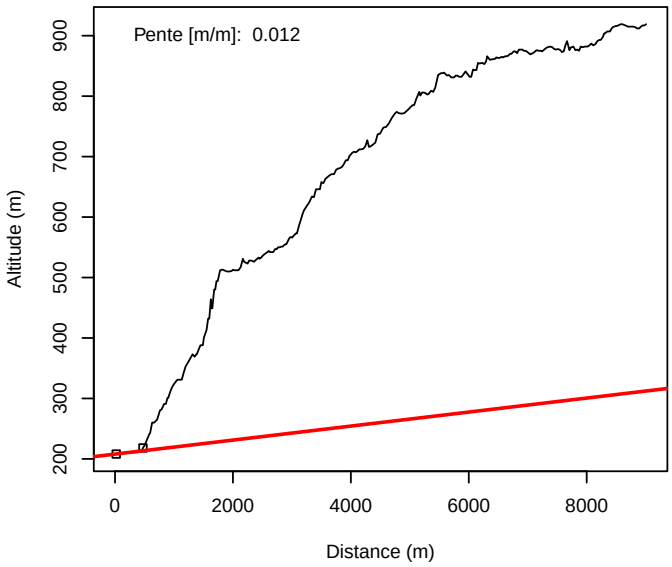

Torrent:LA FURE
Commune: TULLINS (38)
ID: AS19
Pente [m/m]: 0.002
Altitude (m)
Distance (m)


Torrent:CROLLES
Commune: CROLLES (38)
ID: AS2
Pente [m/m]: 0.025
Altitude (m)
Distance (m)

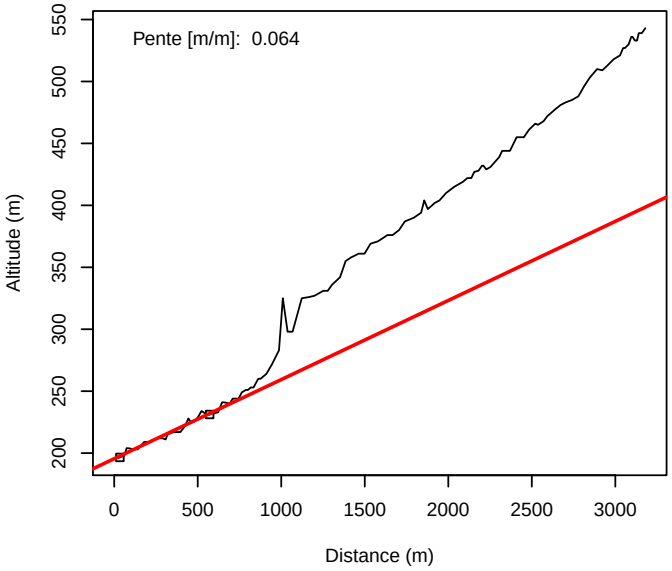

Torrent:LA MORGE
Commune: MOIRANS (38)
ID: AS20
Pente [m/m]: 0.011
Altitude (m)
Distance (m)


Torrent:ROIZE
Commune: VOREPPE (38)
ID: AS21
Pente [m/m]: 0.031
Altitude (m)
Distance (m)

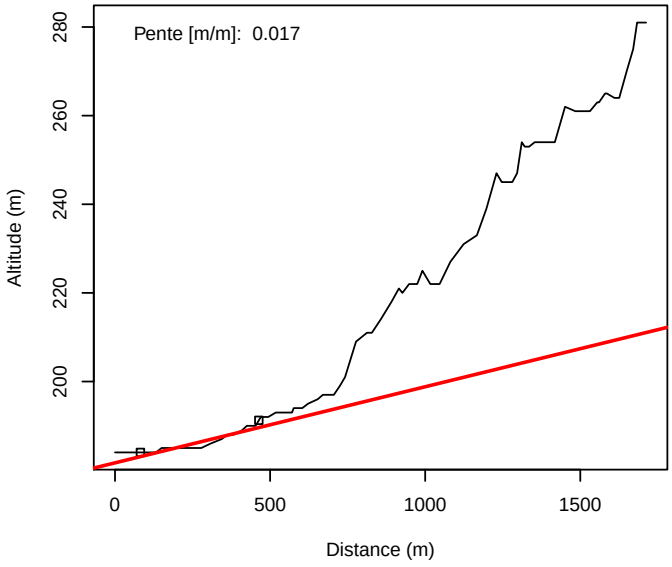
Torrent:FURON
Commune: SASSENAGE (38)
ID: AS22



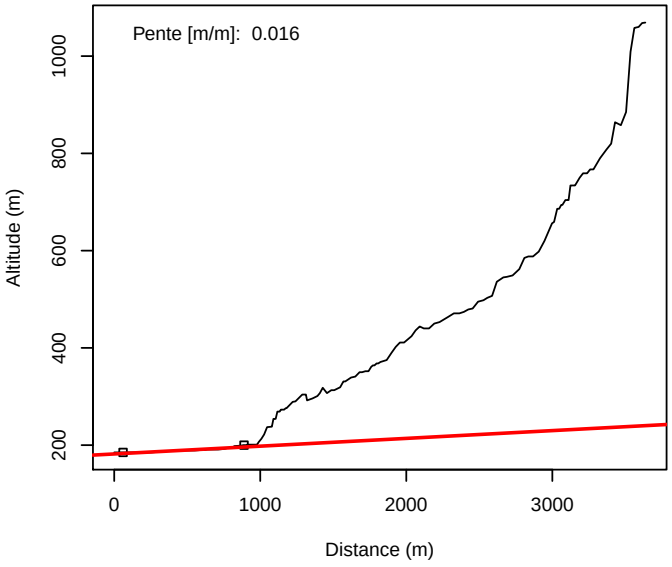
Torrent:VOROIZE
Commune: VEUREY (38)
ID: AS23



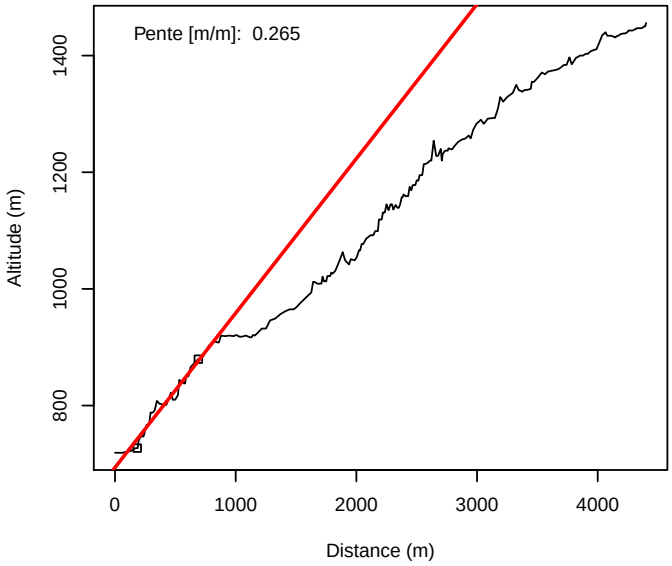
Torrent:MARTINET
Commune: SAINT−QUENTIN−SUR−ISÈRE (38)
ID: AS24



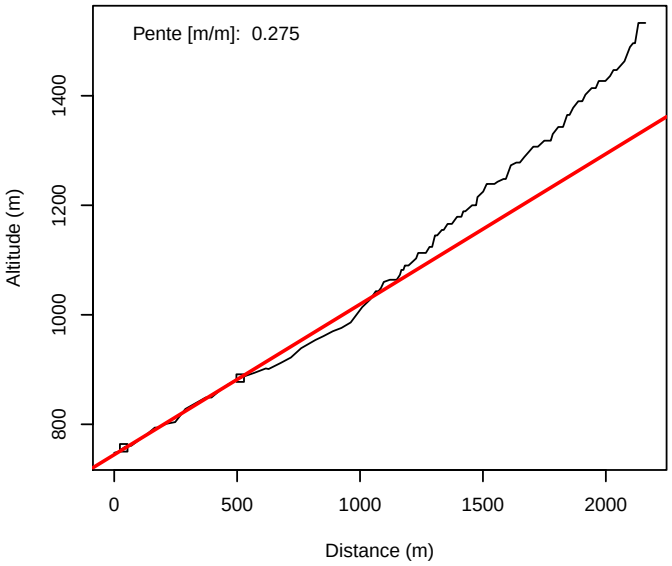
Torrent:VERSOUD
Commune: LA RIVIÈRE (38)
ID: AS25

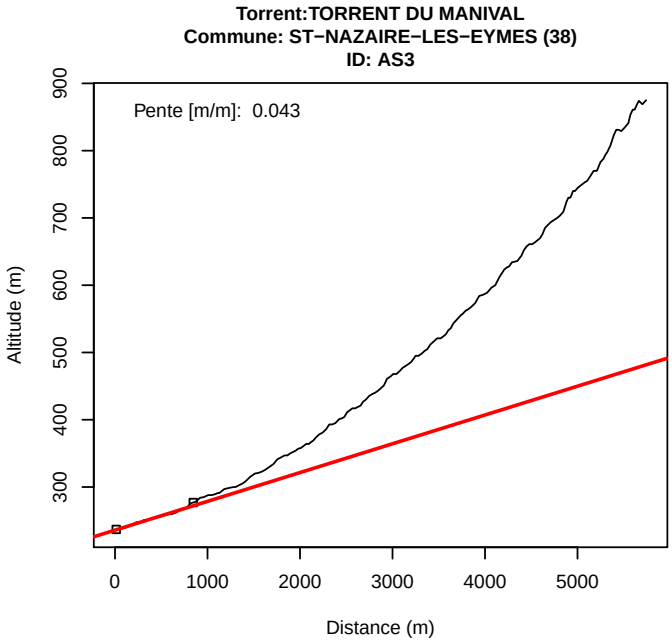


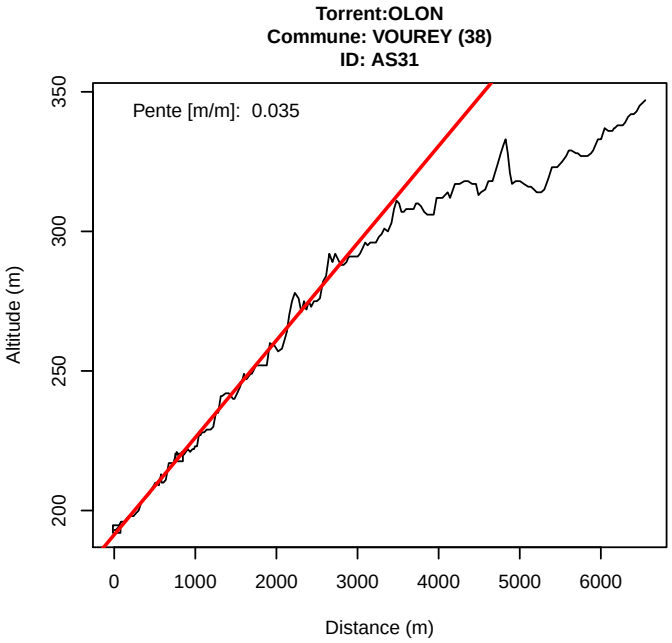
Torrent:SARENNE
Commune: BOURG−D'OISANS (38)
ID: AS26

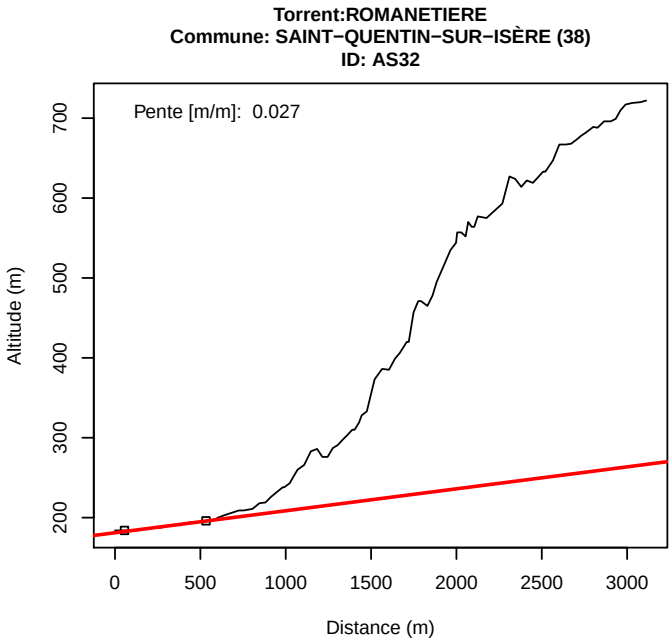


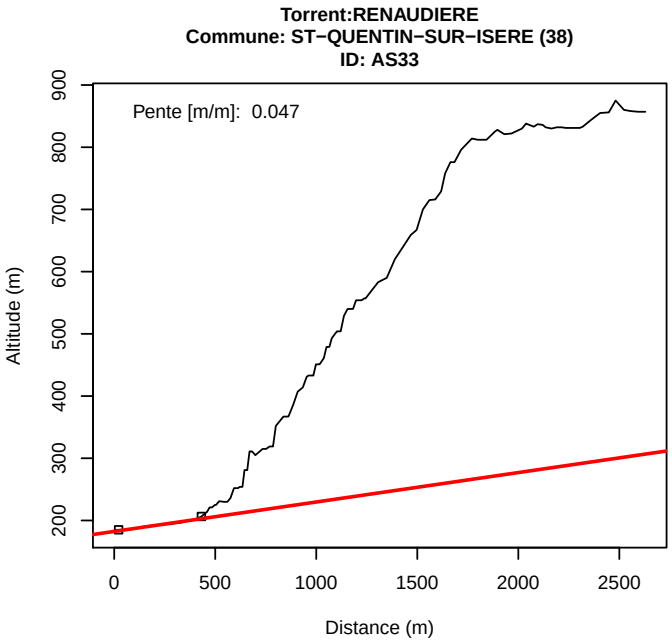
Torrent:MOULINS
Commune: ALLEMOND (38)
ID: AS27

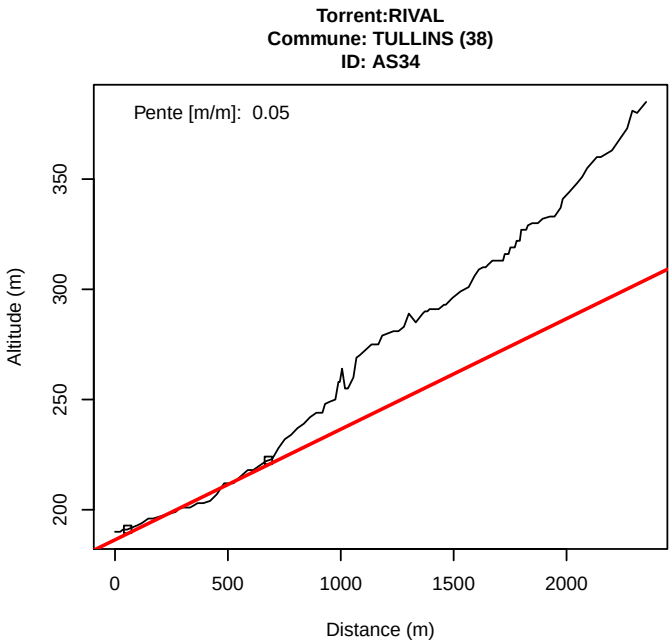


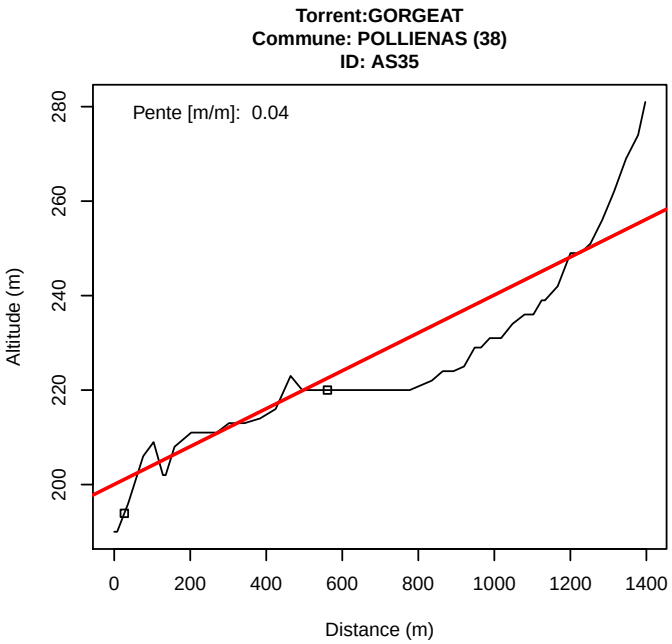

Torrent:TORRENT DU MANIVAL
Commune: ST−NAZAIRE−LES−EYMES (38)
ID: AS3
Pente [m/m]: 0.043
Altitude (m)
Distance (m)


Torrent:OLON
Commune: VOUREY (38)
ID: AS31
Pente [m/m]: 0.035
Altitude (m)
Distance (m)

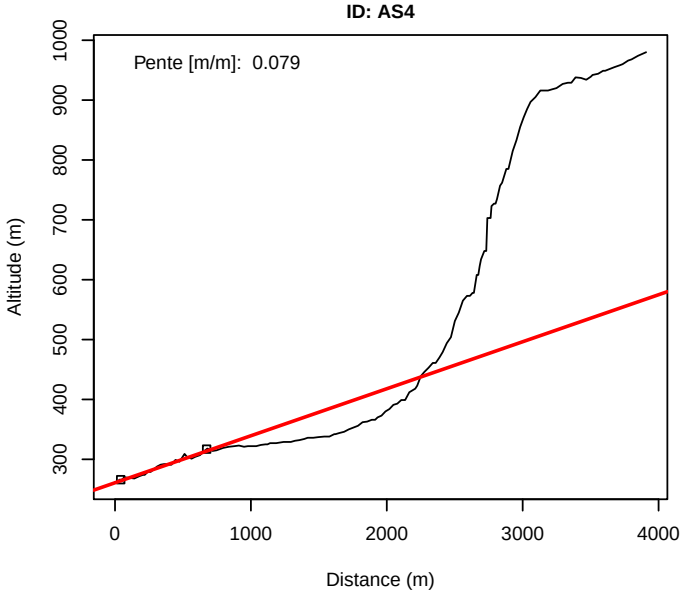

Torrent:ROMANETIERE
Commune: SAINT−QUENTIN−SUR−ISÈRE (38)
ID: AS32
Pente [m/m]: 0.027
Altitude (m)
Distance (m)


Torrent:RENAUDIERE
Commune: ST−QUENTIN−SUR−ISERE (38)
ID: AS33
Pente [m/m]: 0.047
Altitude (m)
Distance (m)

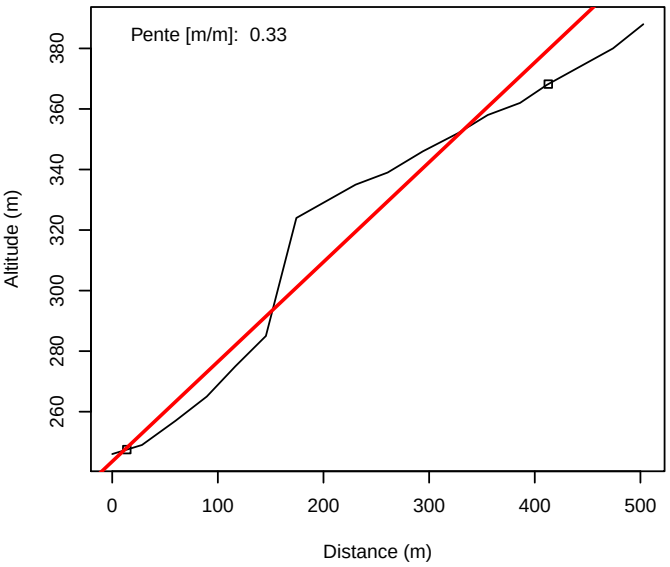

Torrent:RIVAL
Commune: TULLINS (38)
ID: AS34
Pente [m/m]: 0.05
Altitude (m)
Distance (m)


Torrent:GORGEAT
Commune: POLLIENAS (38)
ID: AS35
Pente [m/m]: 0.04
Altitude (m)
Distance (m)

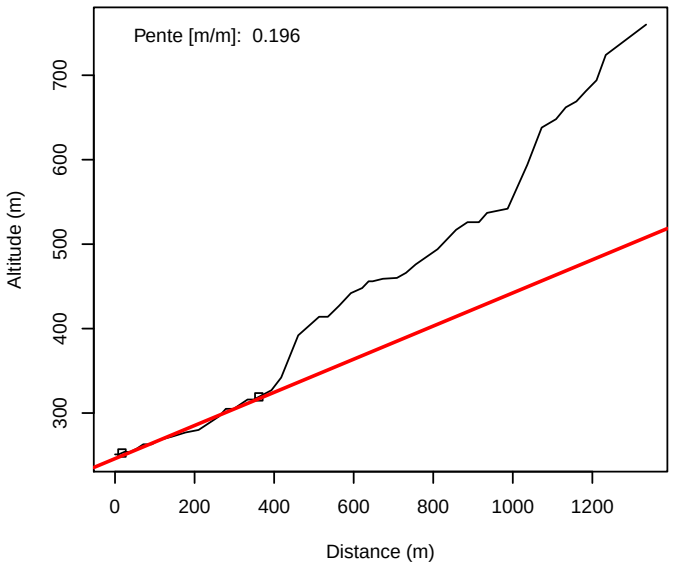
Torrent:MALADIERE
Commune: LA BUISSIERE (38)
ID: AS4



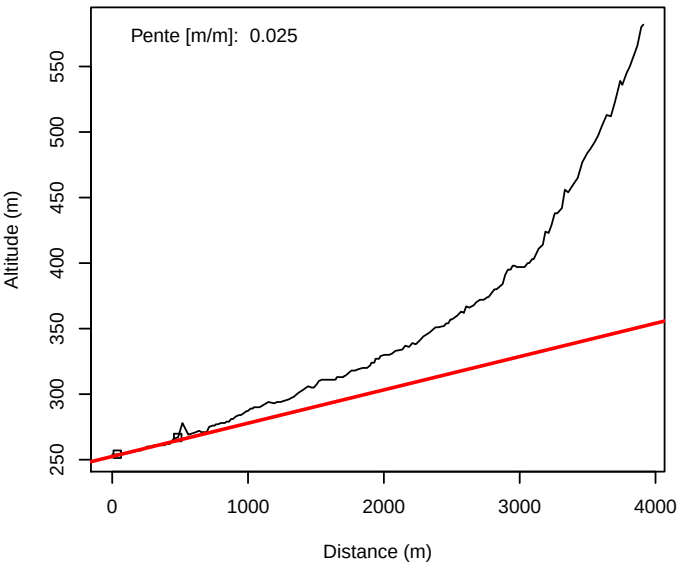
Torrent:ROTI
Commune: LE CHEYLAS (38)
ID: AS5



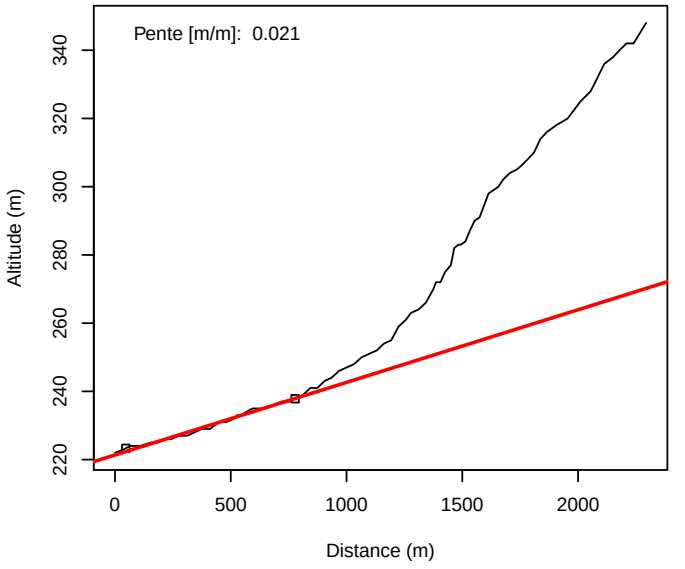
Torrent:CHAVANNES
Commune: GONCELIN (38)
ID: AS6



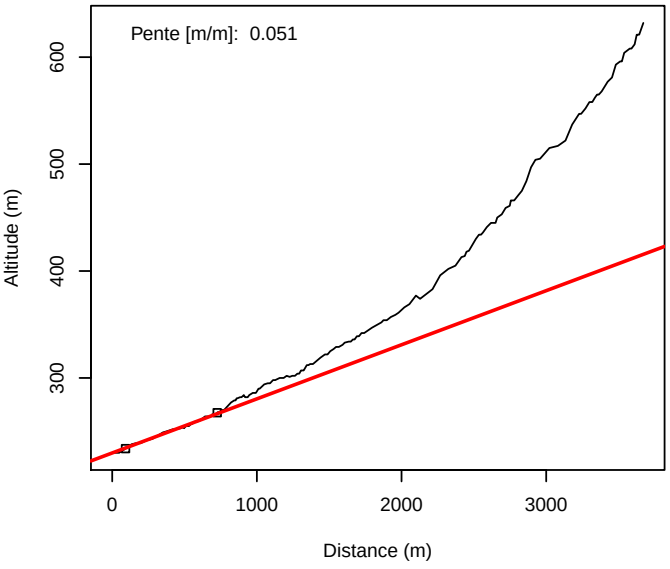
Torrent:RUISSEAU DE LA PERRIERE
Commune: PONTCHARRA (38)
ID: AS7



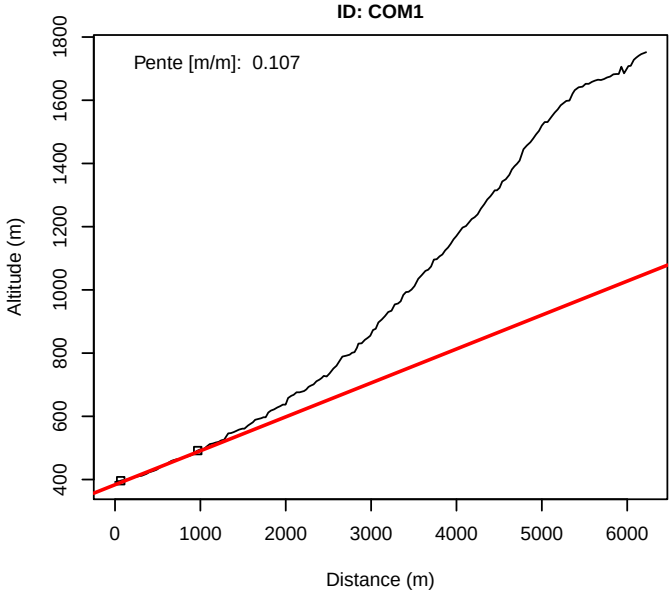
Torrent:GAMOND
Commune: MEYLAN (38)
ID: AS8



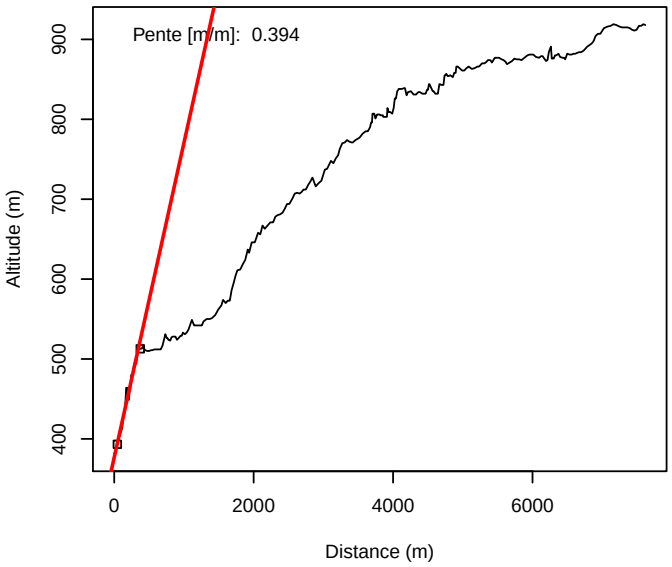
Torrent:CORBONNE
Commune: SAINT ISMIER (38)
ID: AS9



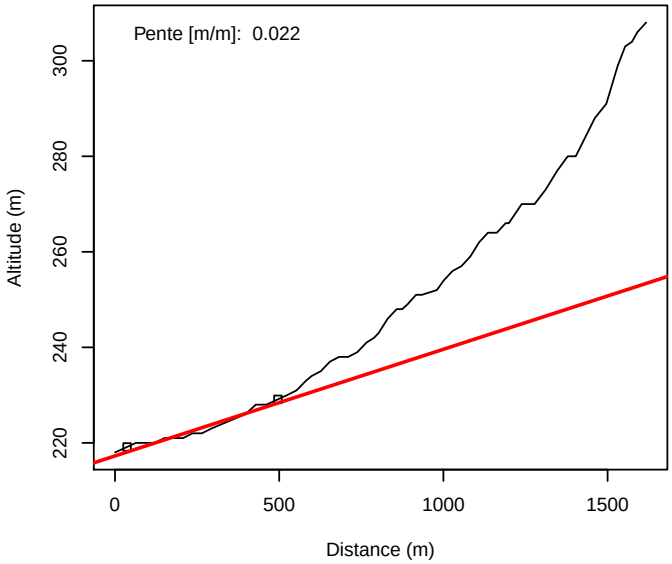
Torrent:PREMOL
Commune: VAULNAVEYS−LE−HAUT (38)
ID: COM1



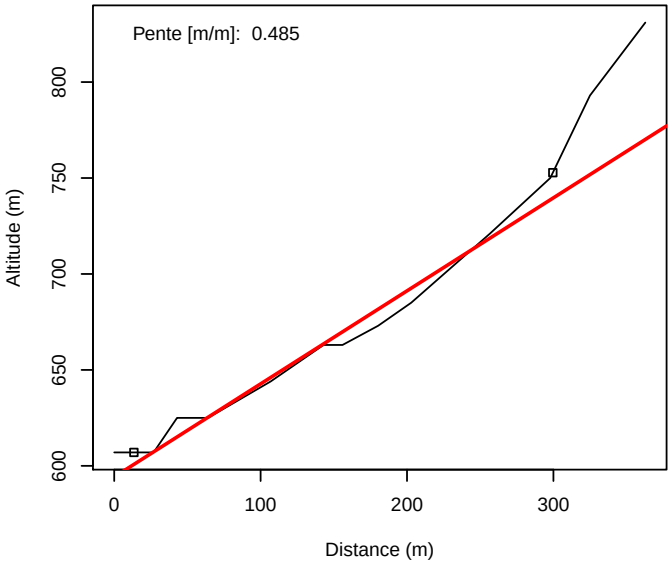
Torrent:FURON
Commune: SASSENAGE (38)
ID: COM2



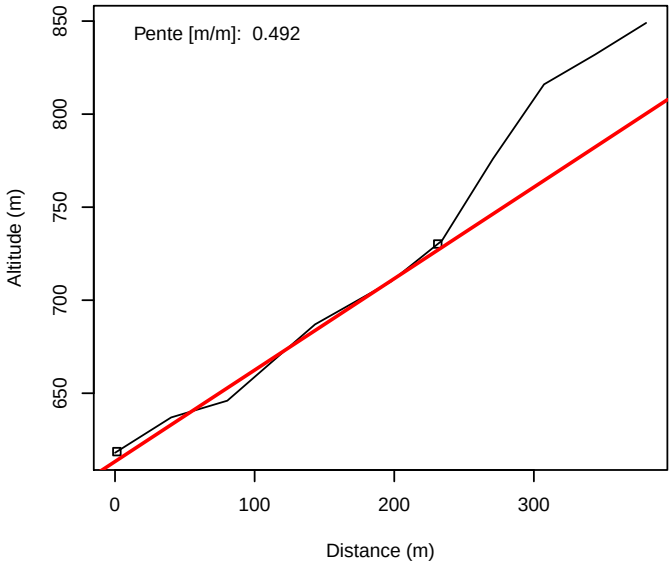
Torrent:LE CHARMEYRAN
Commune: LA TRONCHE (38)
ID: COM3



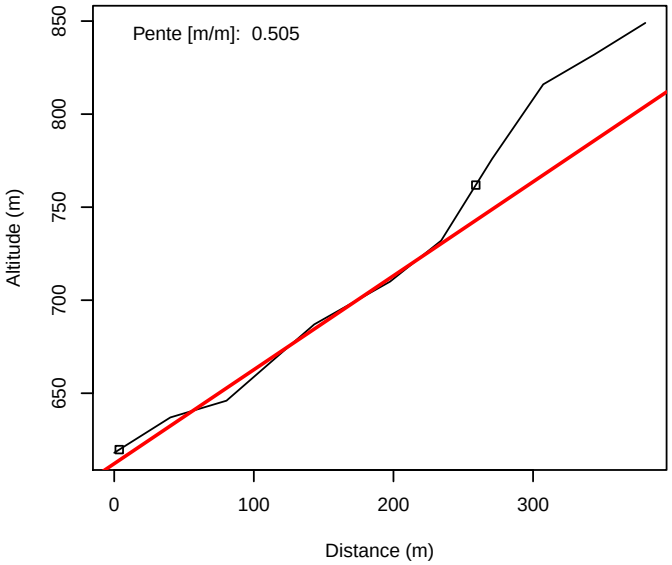
Torrent:TORRENT DE GAMOND (BIZENON I)
Commune: MEYLAN (38)
ID: ID105



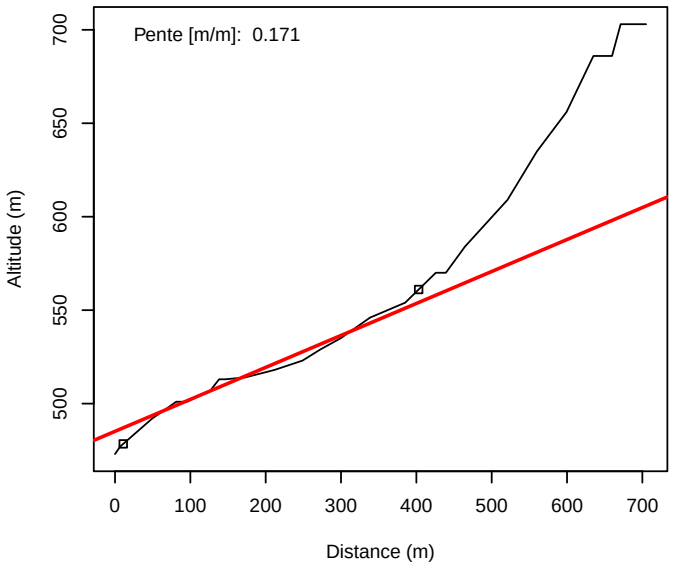
Torrent:TORRENT DE GAMOND (BIZENON II)
Commune: MEYLAN (38)
ID: ID106



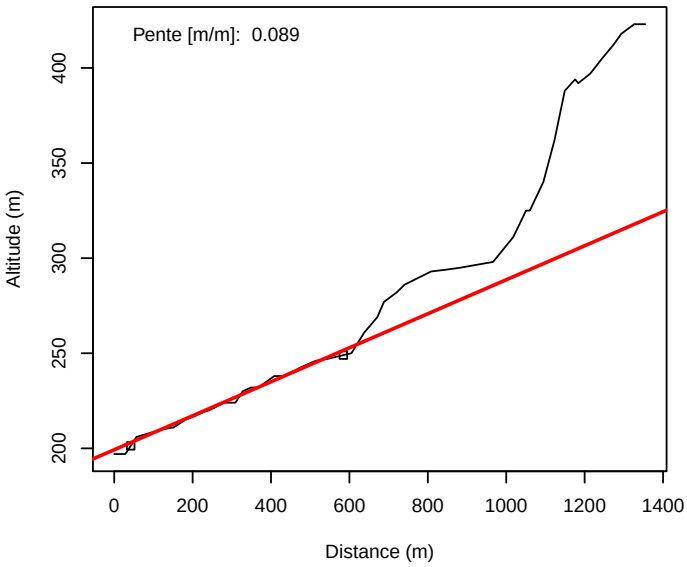
Torrent:TORRENT DE GAMOND (BIZENON III)
Commune: MEYLAN (38)
ID: ID107



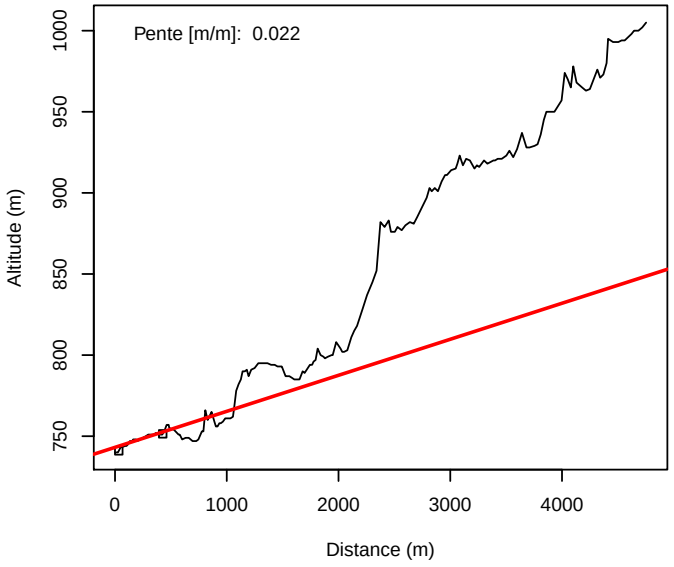
Torrent:TORRENT DE LA RUINE
Commune: MEYLAN (38)
ID: ID109



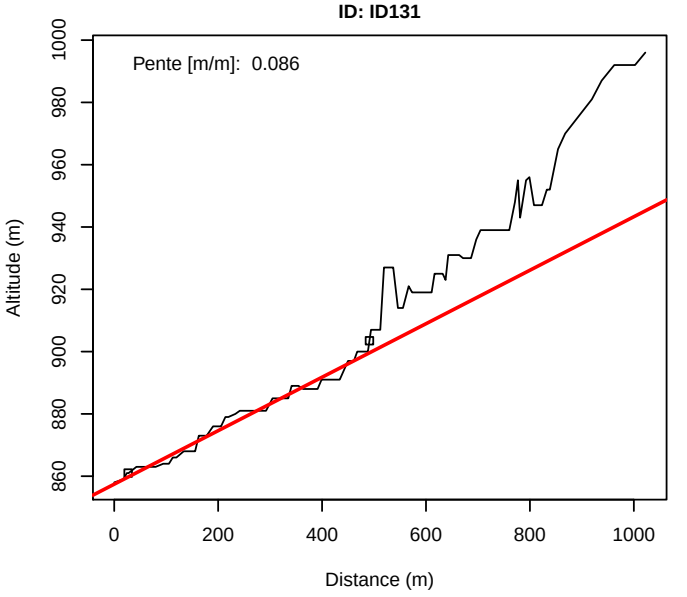
Torrent:EYRARD
Commune: NOYAREY (37)
ID: ID122



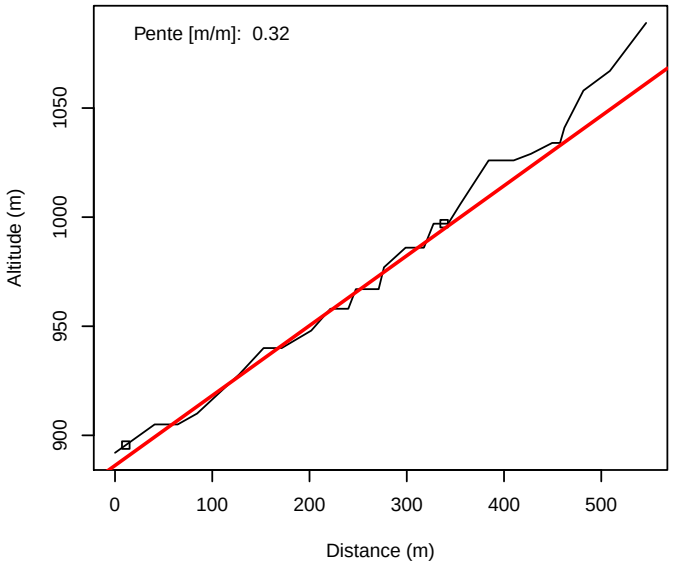
Torrent:TORRENT DE LA LIGNARRE
Commune: OULLES (38)
ID: ID123



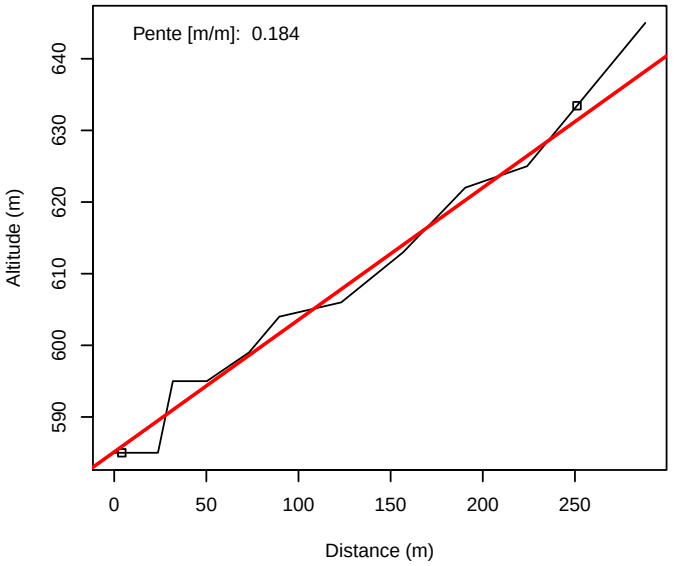
Torrent:LE RIFFOL
Commune: ROISSARD (38)
ID: ID131



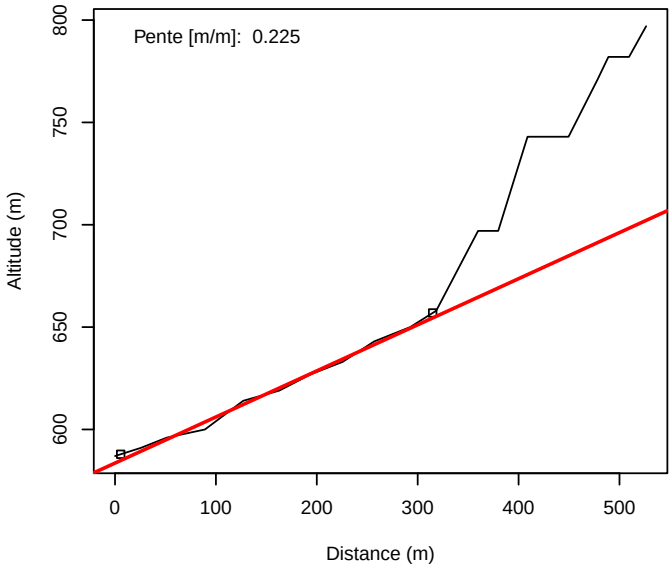
Torrent:TORRENT DU BRESSON
Commune: STE−MARIE−DU−MONT (38)
ID: ID140



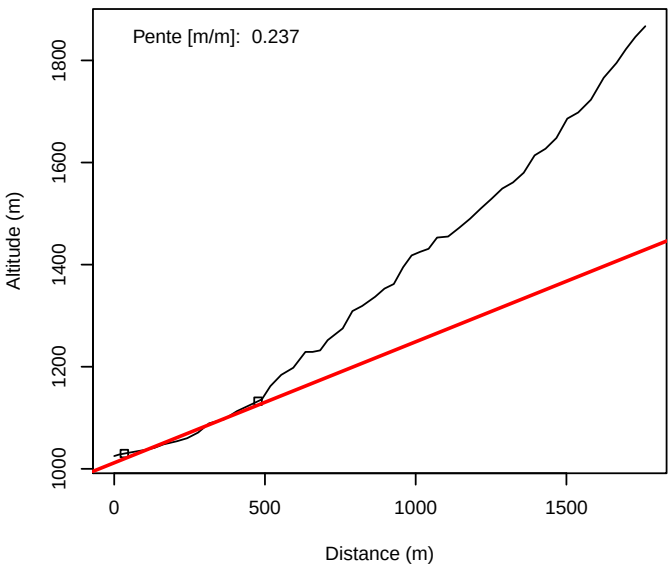
Torrent:RUISSEAU DE DARGUIL
Commune: ST−ISMIER (38)
ID: ID147



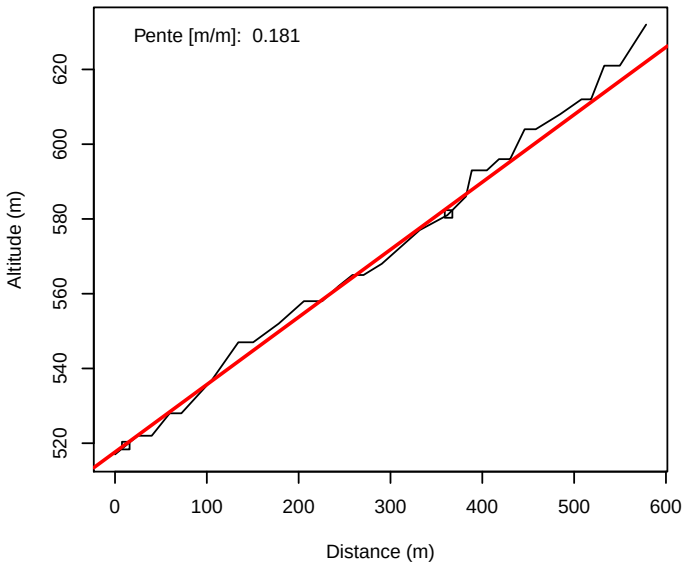
Torrent:RUISSEAU DE DARGUIL (LES ECORCHIERS)
Commune: ST−ISMIER (38)
ID: ID148



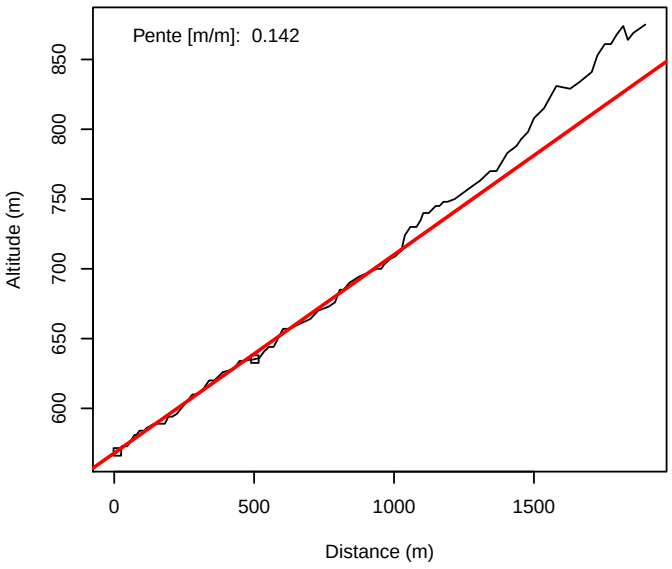
Torrent:RAVIN DE LA RUINE
Commune: LA ROCHE−DE−RAME (5)
ID: ID15



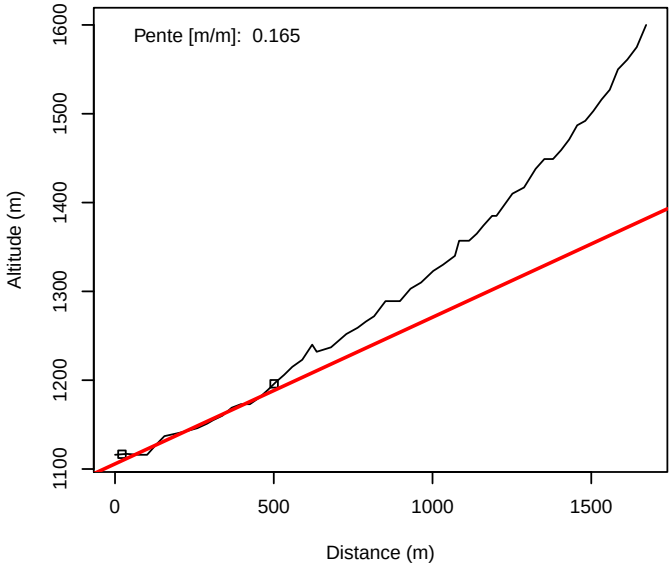
Torrent:TORRENT DE CORBONNE
Commune: ST−ISMIER (38)
ID: ID150



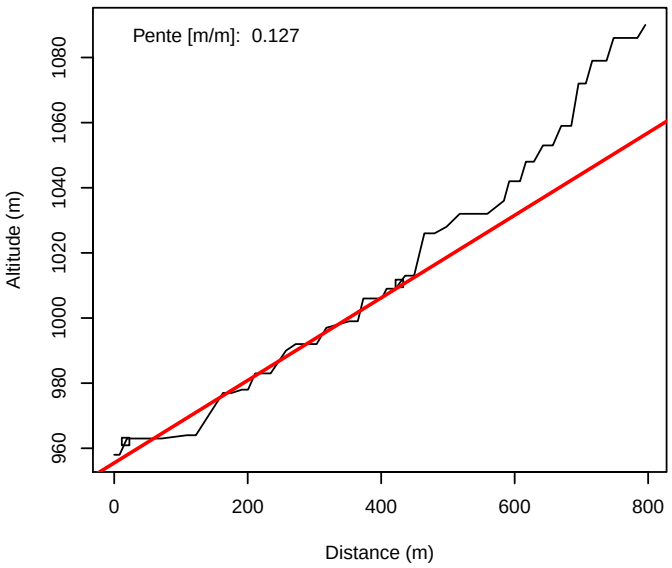
Torrent:TORRENT DU MANIVAL
Commune: ST−ISMIER (38)
ID: ID151



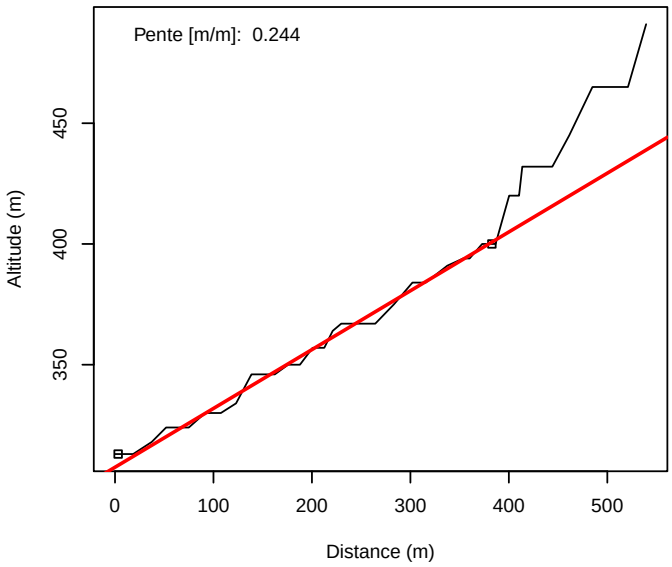
Torrent:RUISSEAU DE L'ARCHAT
Commune: ST−MAURICE−EN−TRIEVES (38)
ID: ID164



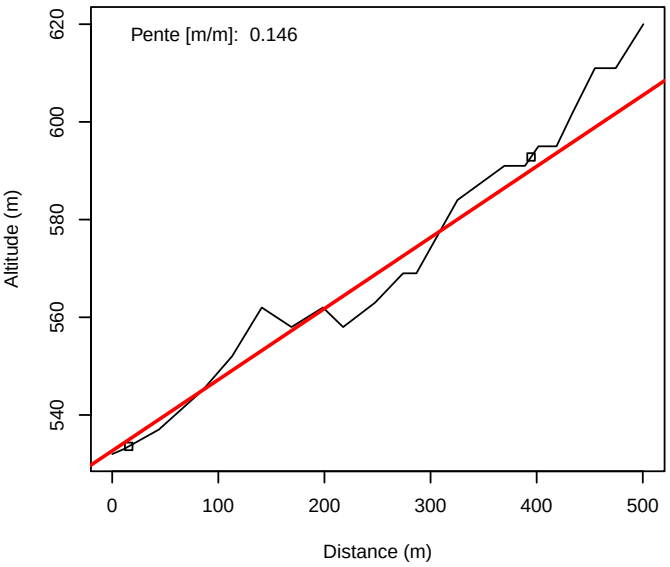
Torrent:RUISSEAU DE GORGETTE (1)
Commune: ST−PANCRASSE (38)
ID: ID171



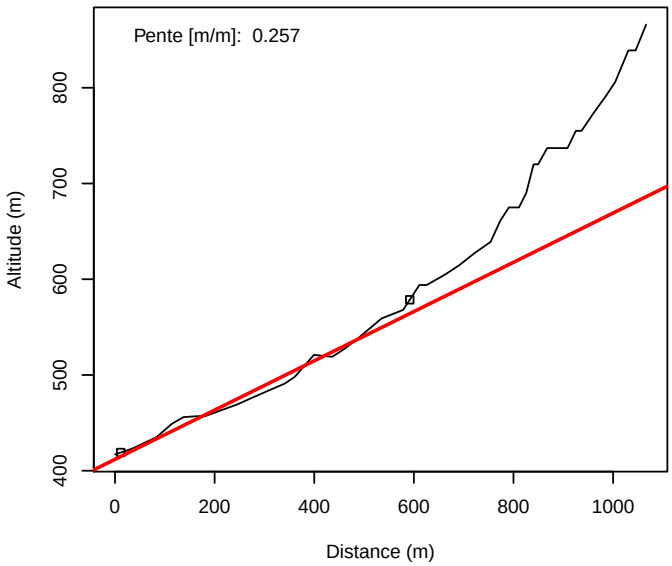
Torrent:LE RIONDET
Commune: ST−PAUL−DE−VARCES (38)
ID: ID174



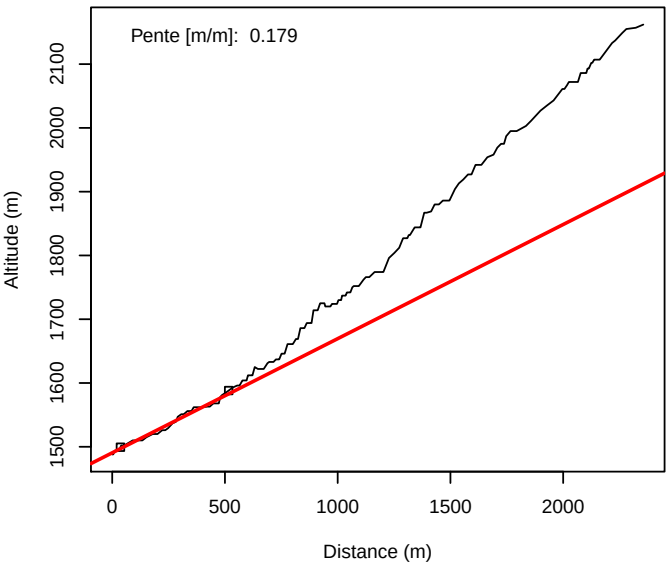
Torrent:LE LAVANCHON
Commune: ST−PAUL−DE−VARCES (38)
ID: ID175



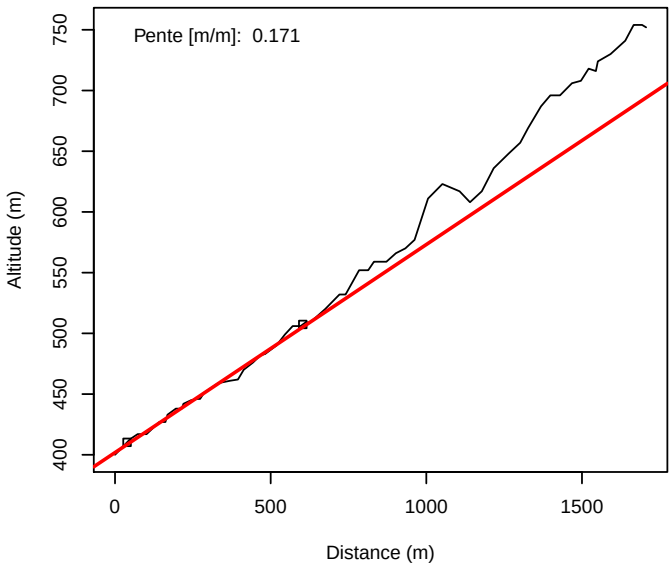
Torrent:TORRENT DE LA LAMPE
Commune: ST−PAUL−DE−VARCES (38)
ID: ID176



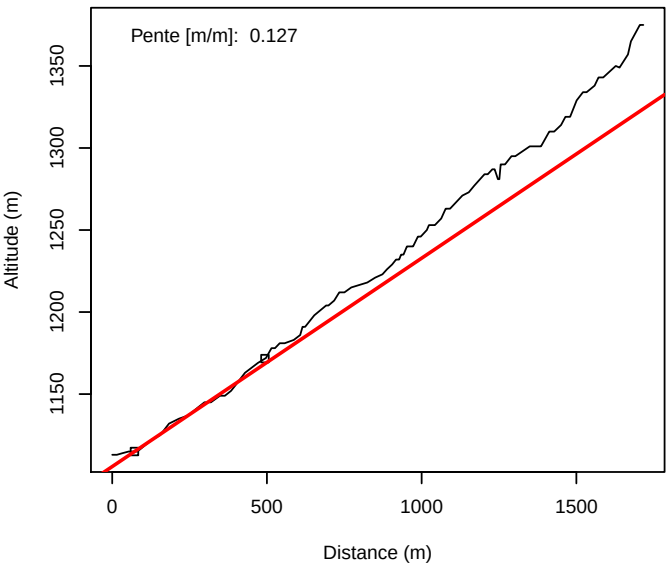
Torrent:LE VERDAREL
Commune: ST−CHAFFREY (5)
ID: ID18



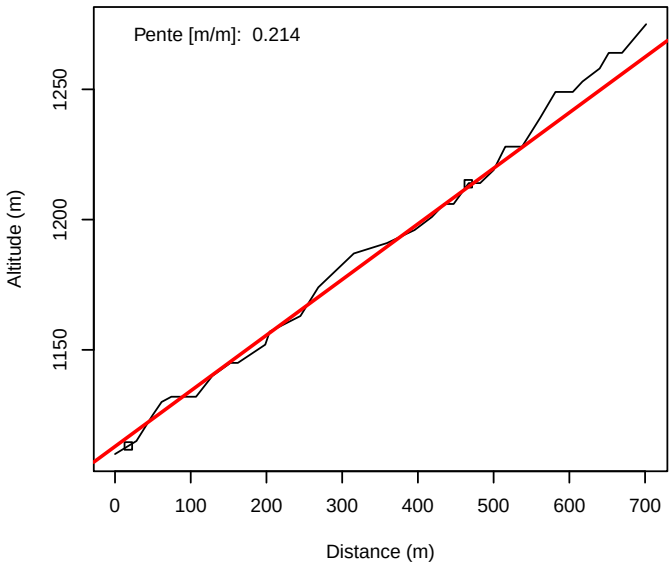
Torrent:TORRENT DU BRESSON
Commune: ST−VINCENT−DE−MERCUZE (38)
ID: ID180



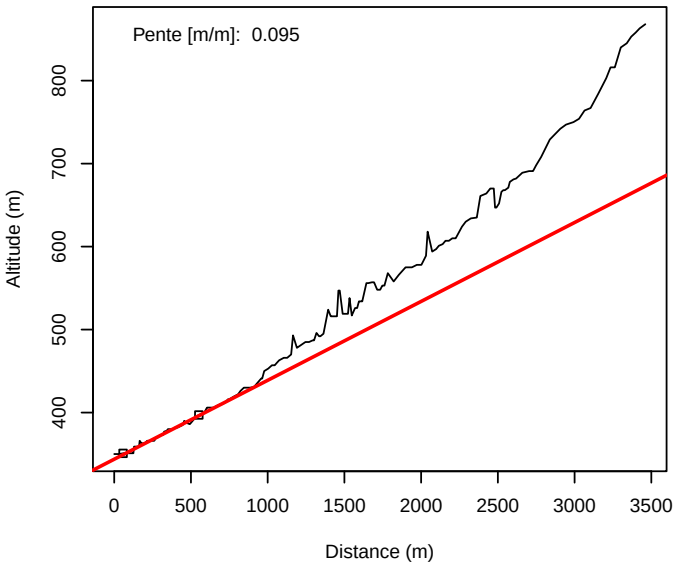
Torrent:L'EBRON
Commune: TREMINIS (38)
ID: ID185



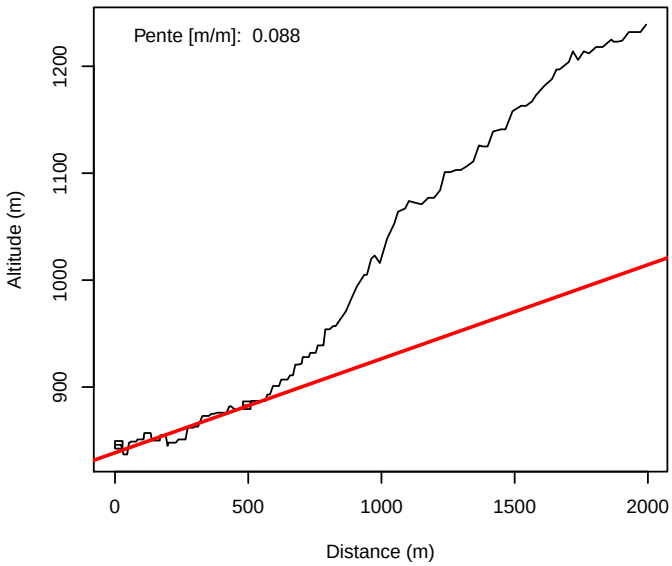
Torrent:LES SAGNES
Commune: TREMINIS (38)
ID: ID186



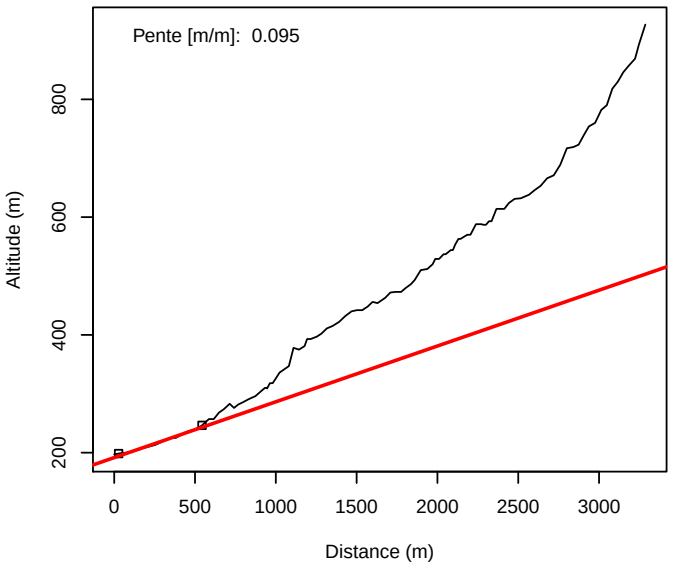
Torrent:LA ROIZE
Commune: VOREPPE (38)
ID: ID199



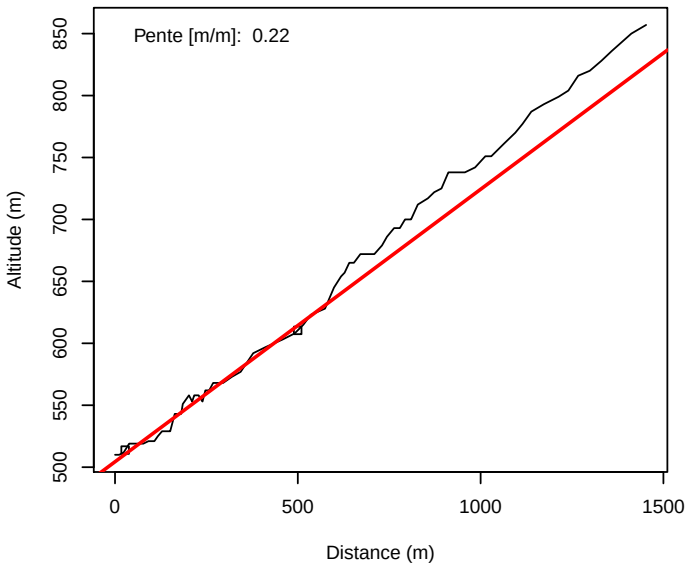
Torrent:TORRENT DE BONSECOURS
Commune: VENTAVON (5)
ID: ID20



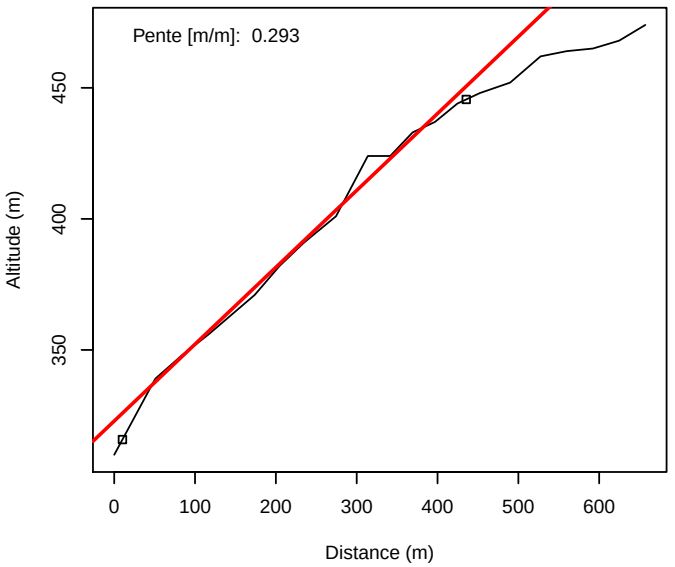
Torrent:MALSOUCHE
Commune: VOREPPE (38)
ID: ID200



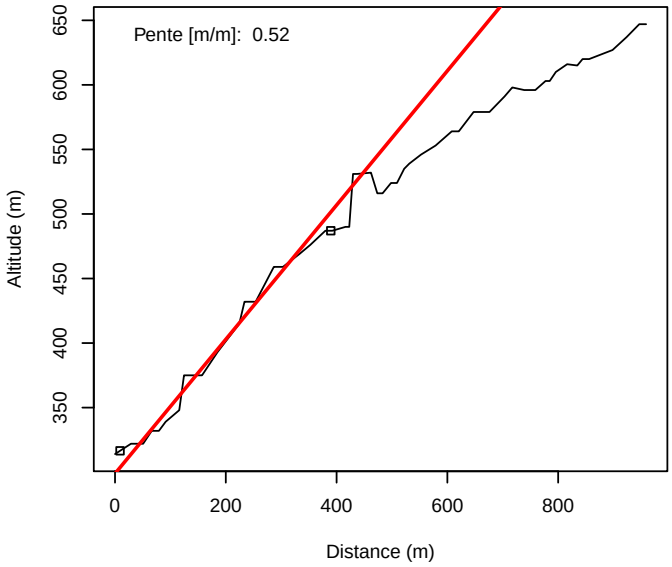
Torrent:LE MERDEREL
Commune: AIGUEBLANCHE (73)
ID: ID201



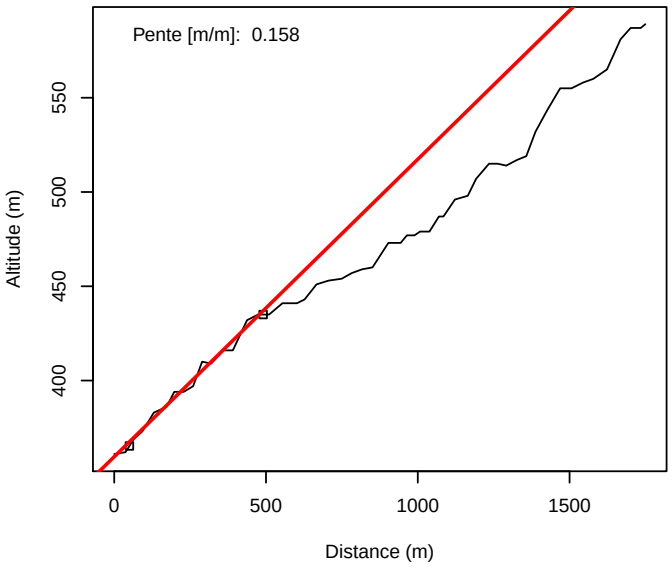
Torrent:LE CRETET
Commune: AITON (73)
ID: ID202



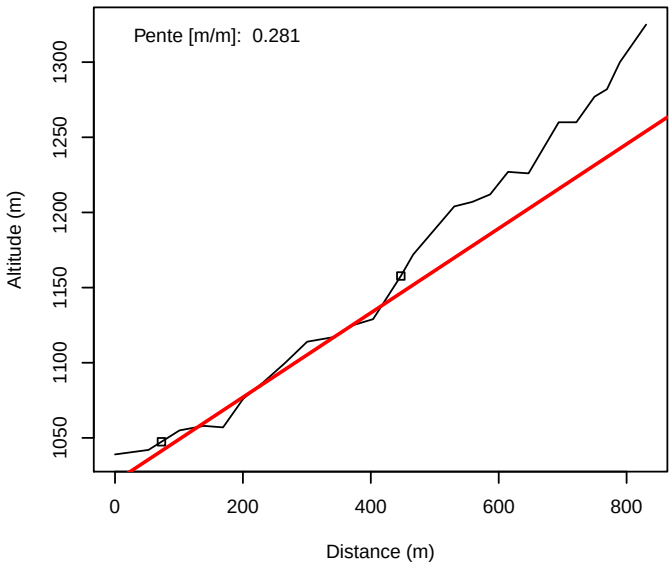
Torrent:RUISSEAU DU GROS CHENE
Commune: AITON (73)
ID: ID204



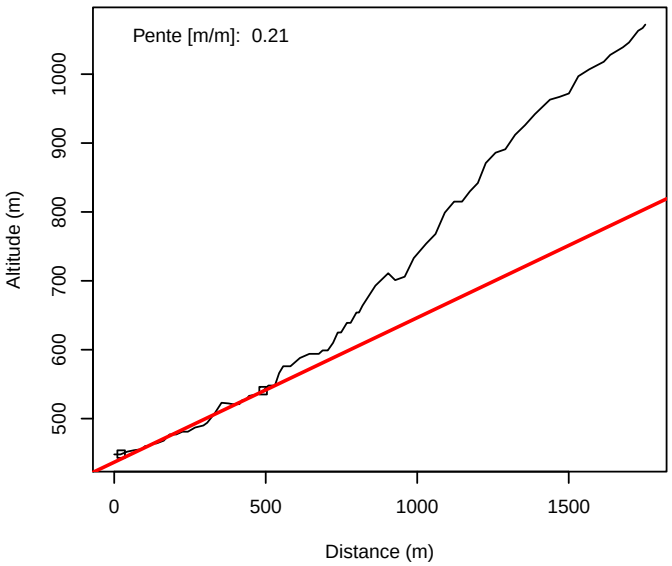
Torrent:LE NANT POTTIER
Commune: ALBERTVILLE (73)
ID: ID205



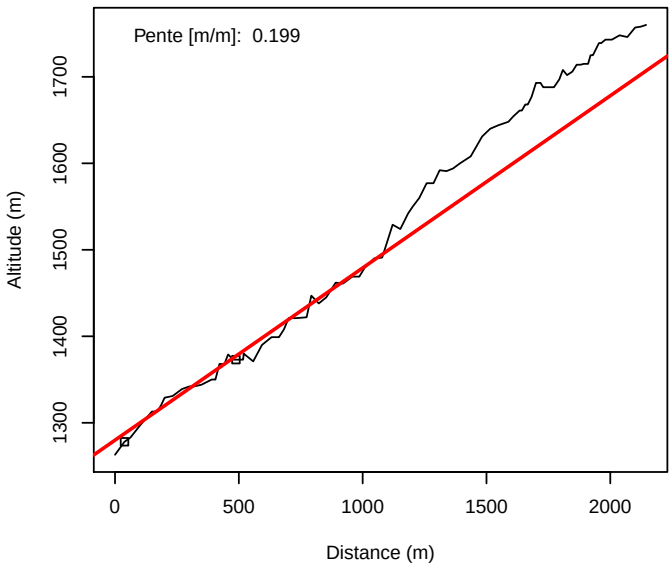
Torrent:RUISSEAU DES CARROZ
Commune: BEAUFORT (73)
ID: ID209



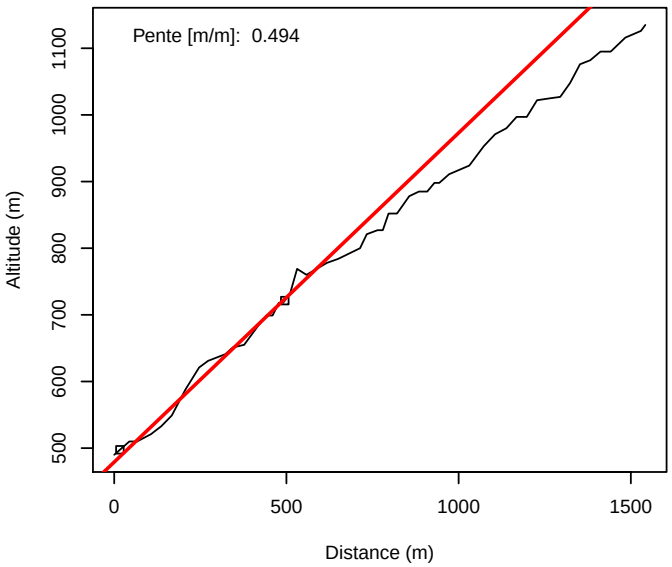
Torrent:LA GRUVAZ
Commune: CEVINS (73)
ID: ID217



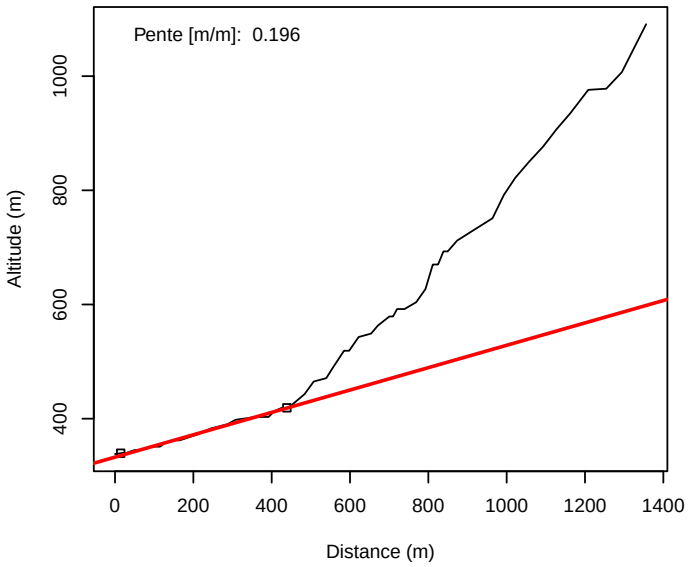
Torrent:LE RECLAZ
Commune: CHAMPAGNY EN VANOISE (73)
ID: ID219



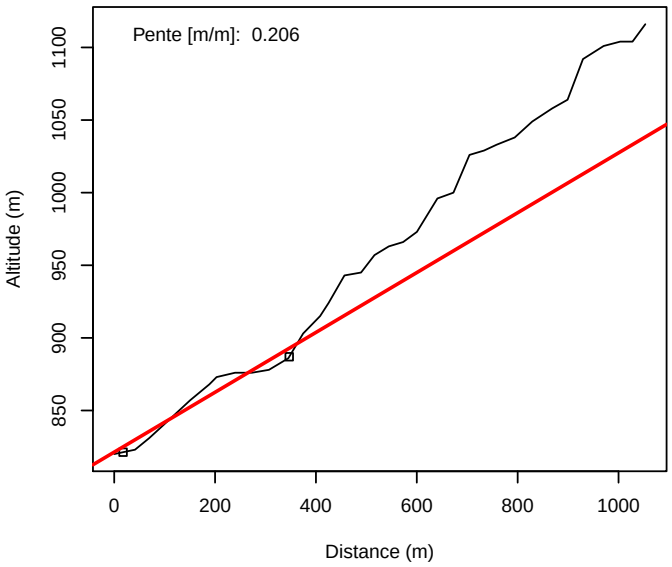
Torrent:RUISSEAU DES MOULINS (1)
Commune: EPIERRE (73)
ID: ID222



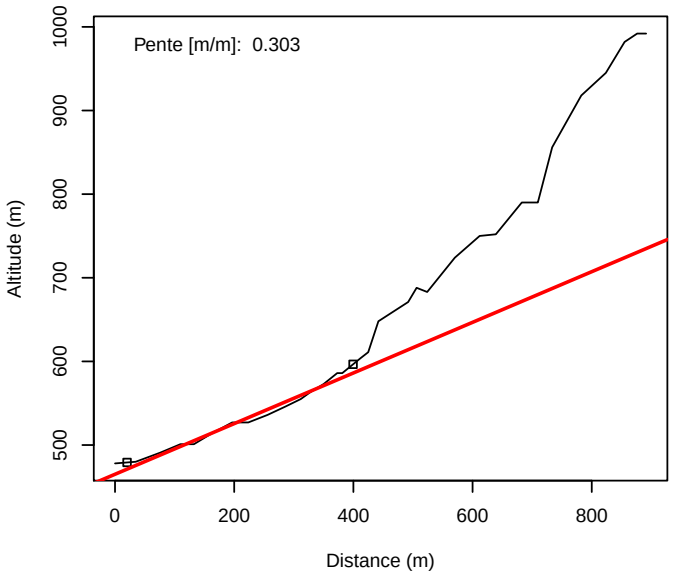
Torrent:RUISSEAU DE CRUET
Commune: FRETERIVE (73)
ID: ID225



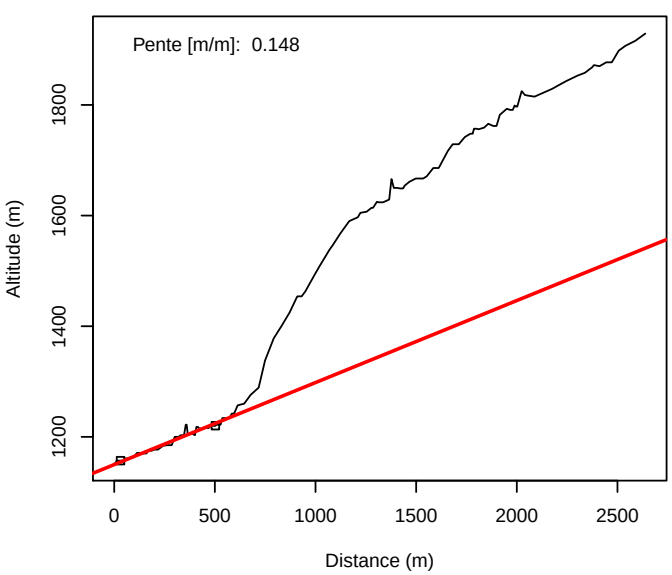
Torrent:RUISSEAU DE MÂCOT
Commune: MÂCOT−LA−PLAGNE (73)
ID: ID237



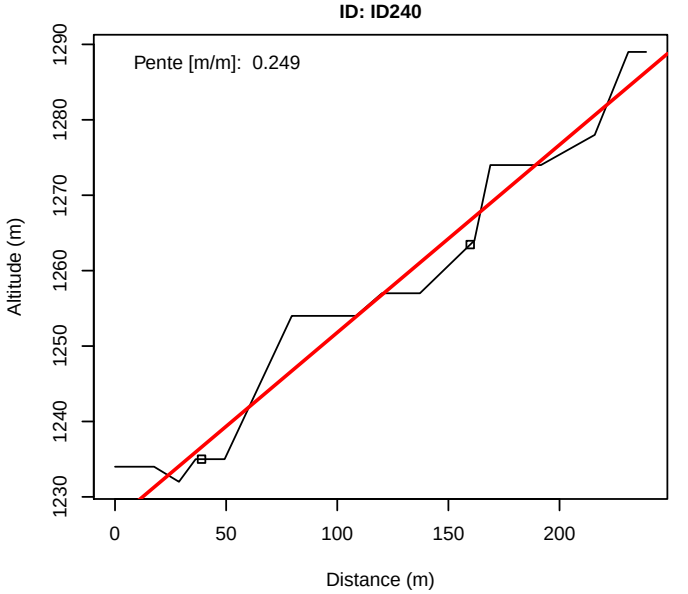
Torrent:LE REVERS
Commune: MERY (73)
ID: ID238



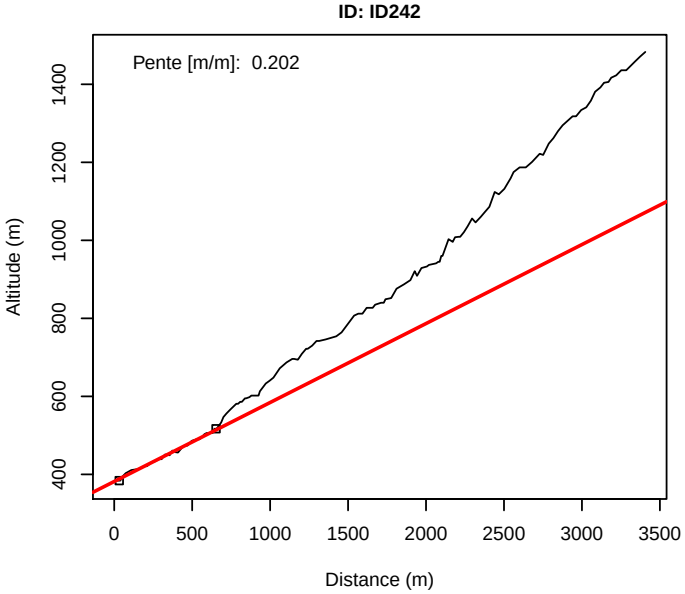
Torrent:ST−ANTOINE
Commune: MODANE (73)
ID: ID239



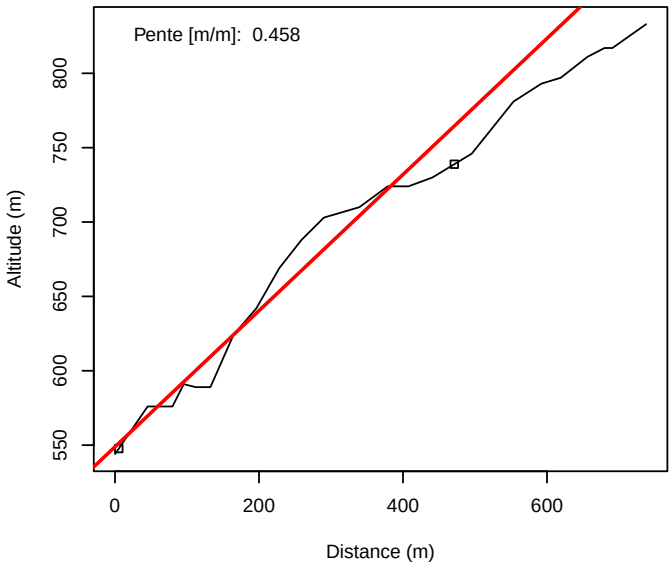
Torrent:RUISSEAU DU RIEU−ROUX
Commune: MODANE (73)
ID: ID240



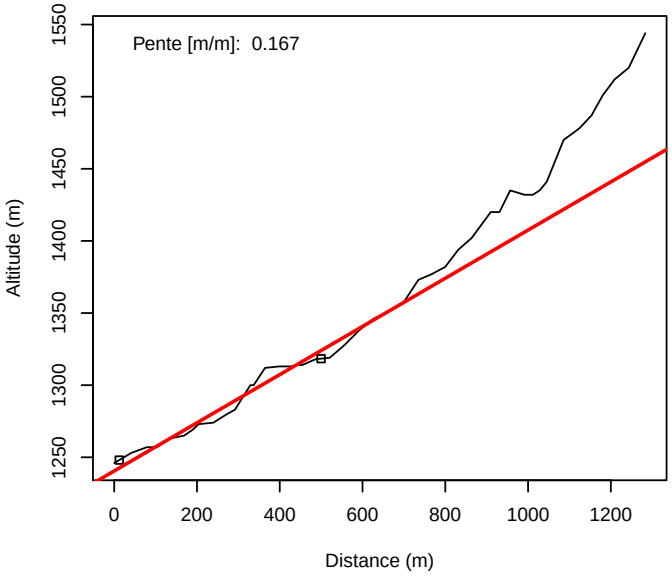
Torrent:TORRENT DE LA COMBAZ
Commune: NOTRE−DAME−DES−MILLIERES (73)
ID: ID242



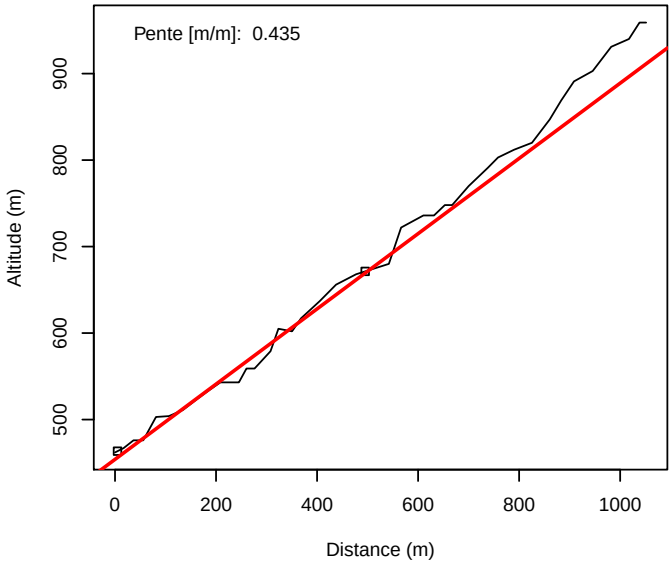
Torrent:LE CLINEL
Commune: PONTAMAFREY (73)
ID: ID245



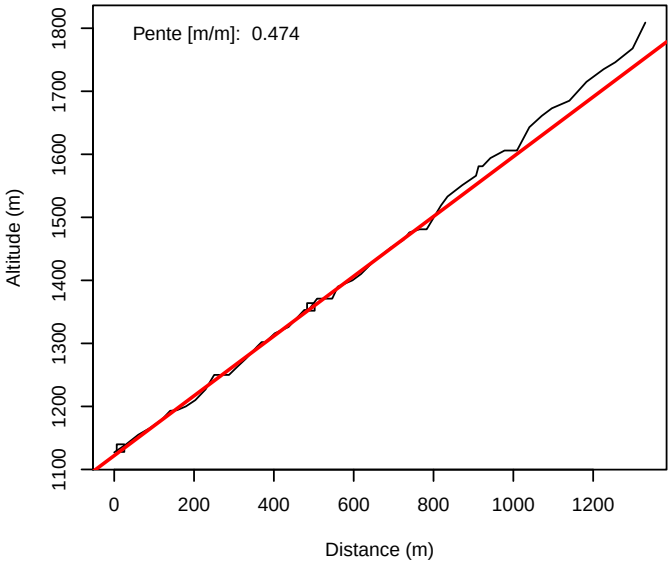
Torrent:LA RAVOIRE
Commune: PONTAMAFREY (73)
ID: ID246



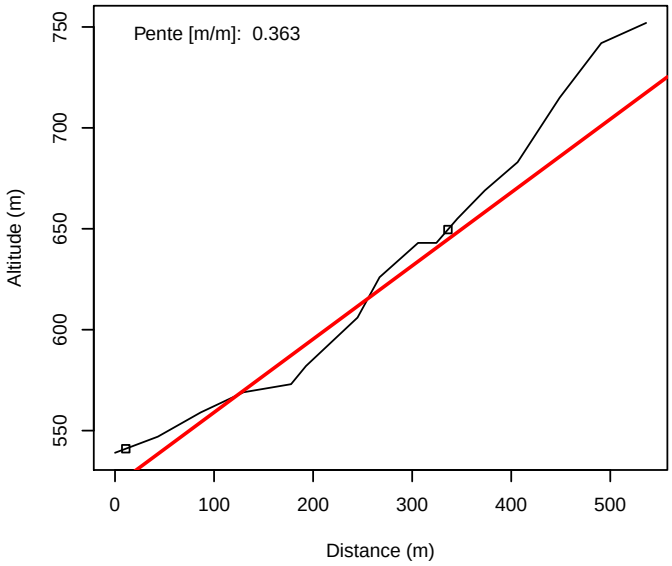
Torrent:LE NANT CLEMENT
Commune: ROGNAIX (73)
ID: ID247



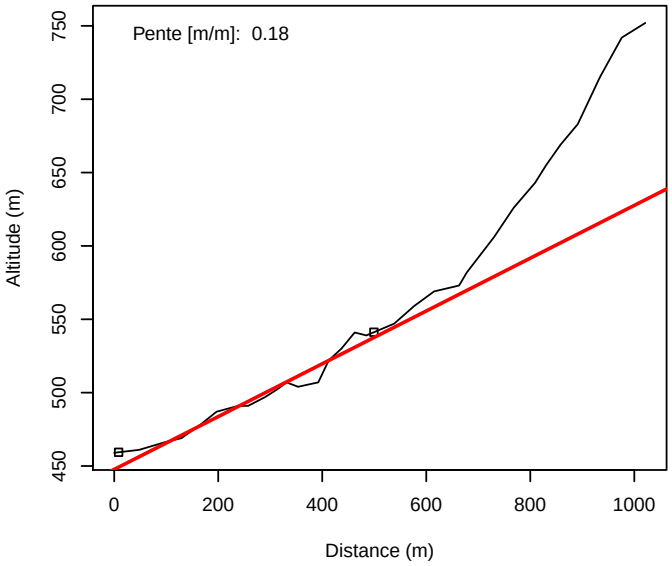
Torrent:TORRENT DU RIOU SEC
Commune: L'ARGENTIERE−LA BESSEE ; SAINT−MARTIN−DE−QUEYRIERES
ID: ID25



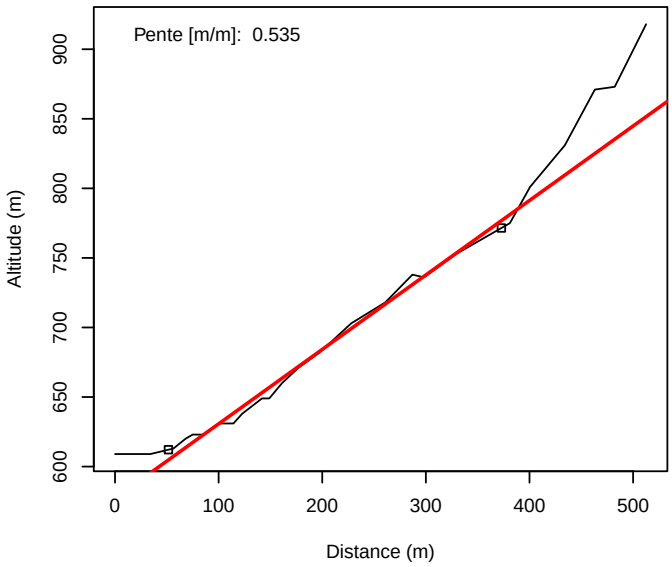
Torrent:LE NANTUEL (AMONT)
Commune: SAINT−AVRE (73)
ID: ID250



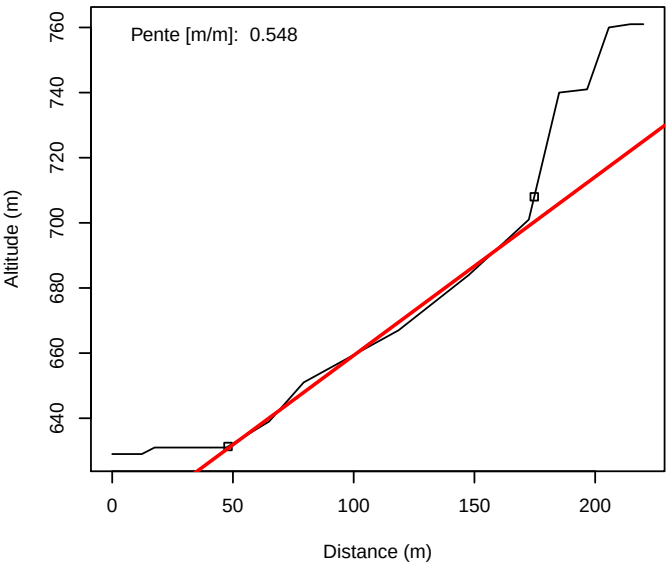
Torrent:LE NANTUEL (AVAL)
Commune: SAINT−AVRE (73)
ID: ID251



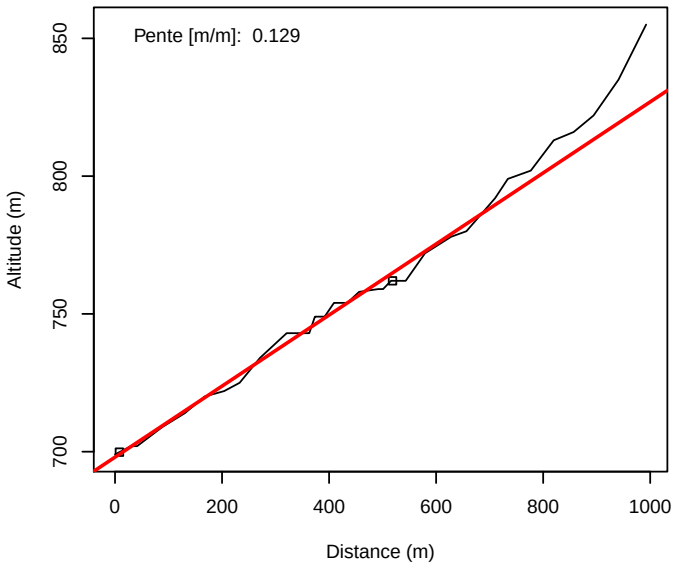
Torrent:COMBE PAILLARDE (AMONT)
Commune: SAINT−JEAN−DE−MAURIENNE (73)
ID: ID255



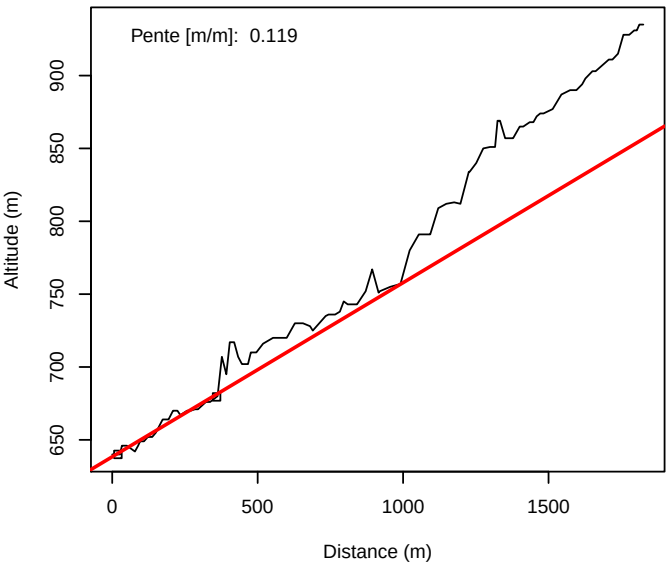
Torrent:COMBE VARCIN (ET COMBE CHENAL)
Commune: SAINT−JEAN−DE−MAURIENNE (73)
ID: ID257



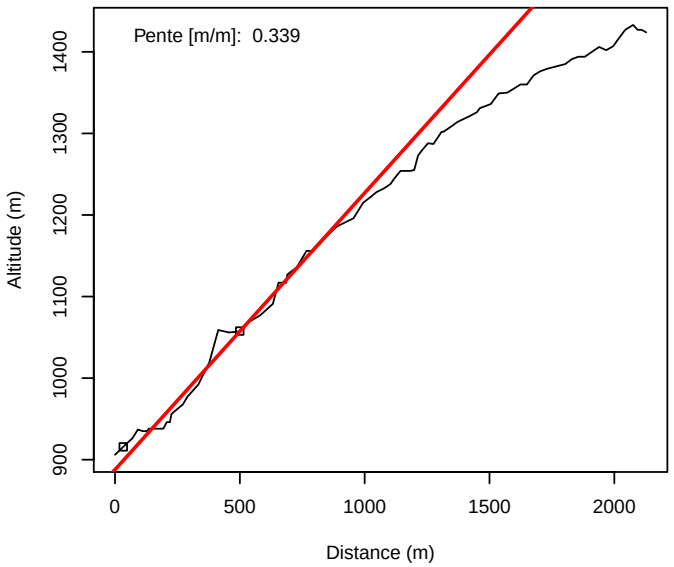
Torrent:CLARET
Commune: SAINT−JULIEN−DE−MONTDENIS (73)
ID: ID258



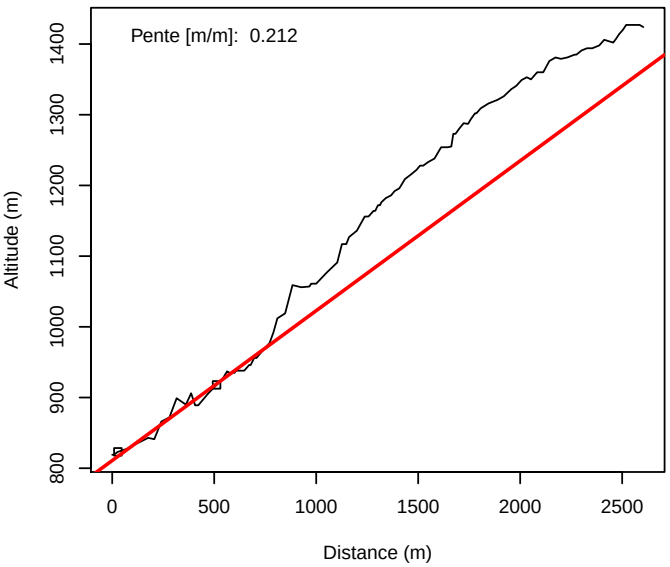
Torrent:LE MERDEREL
Commune: SAINT−MARTIN−LA−CHAMBRE (73)
ID: ID260



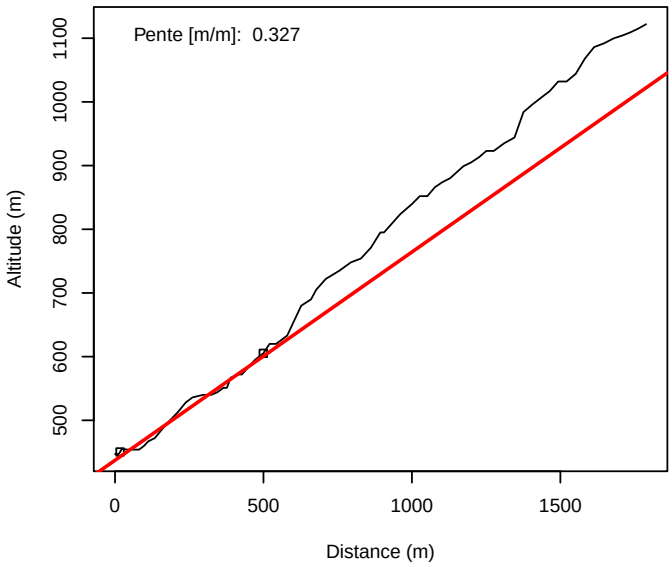
Torrent:TORRENT DU ST−BERNARD OU ST−MARTIN (AMONT)
Commune: SAINT−MARTIN−DE−LA−PORTE (73)
ID: ID261



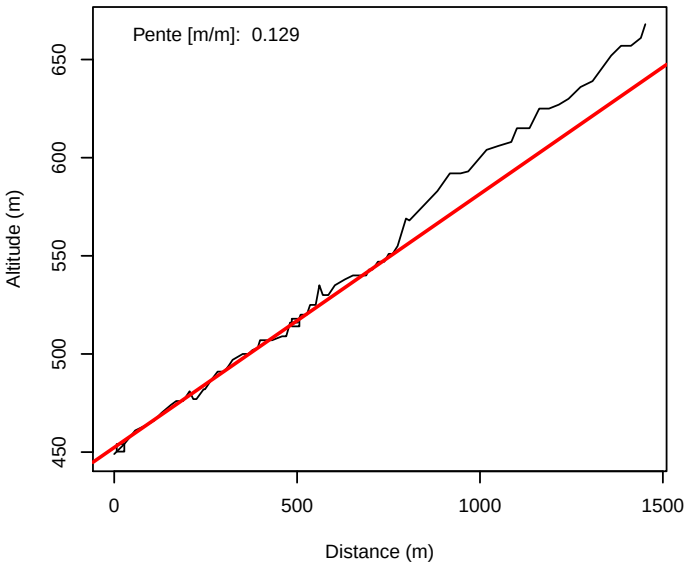
Torrent:TORRENT DU ST−BERNARD OU ST−MARTIN (AVAL)
Commune: SAINT−MARTIN−DE−LA−PORTE (73)
ID: ID262



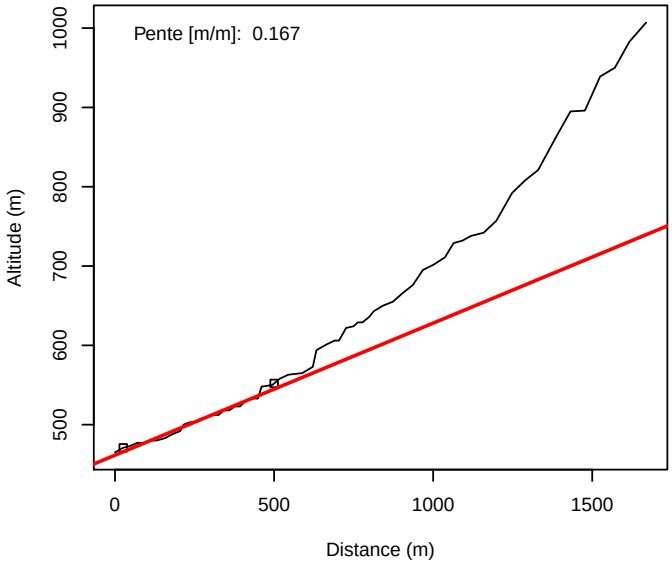
Torrent:RUISSEAU DES MOULINS
Commune: SAINT−PAUL−SUR−ISERE (73)
ID: ID264



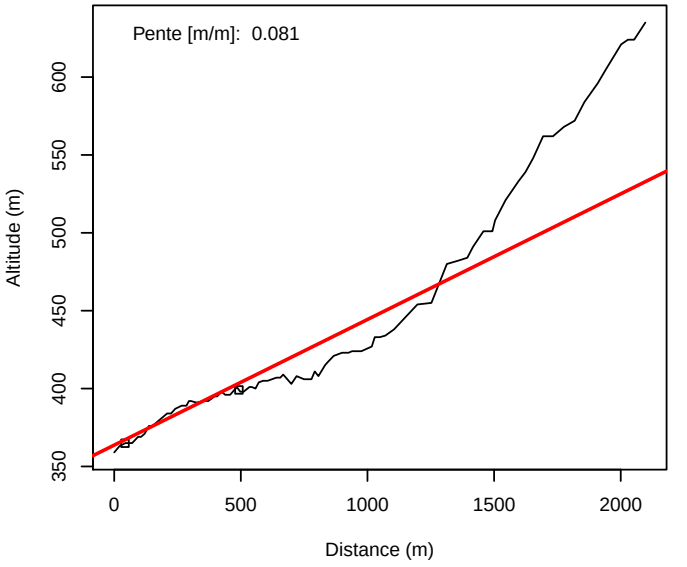
Torrent:LE GARGOT
Commune: SAINT−PIERRE−D'ALBIGNY (73)
ID: ID265



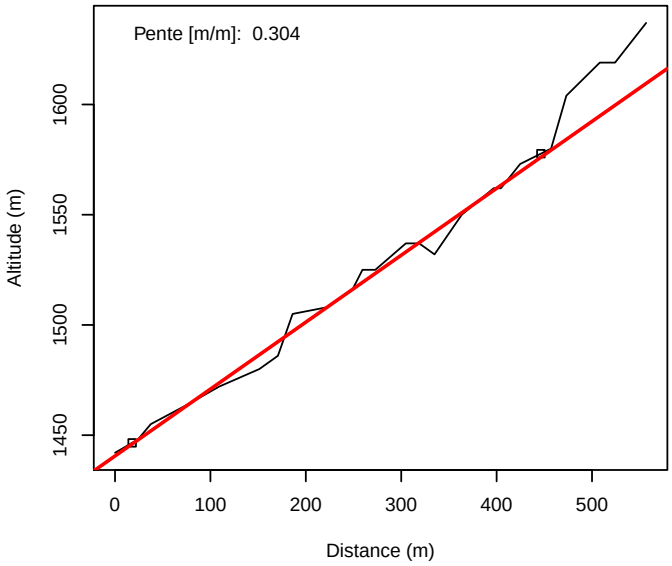
Torrent:LE FAVASSET (AVAL)
Commune: SAINT−PIERRE−D'ALBIGNY (73)
ID: ID266



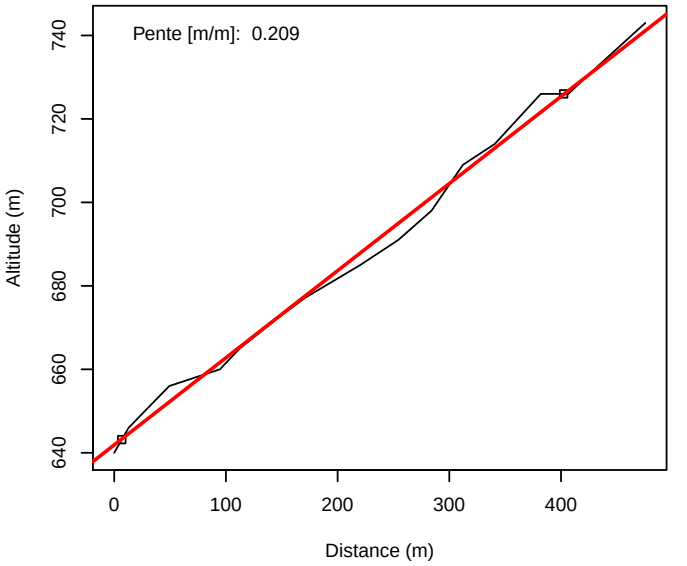
Torrent:LE NANT BRUYANT
Commune: SAINTE−HELENE−SUR−ISERE (73)
ID: ID268



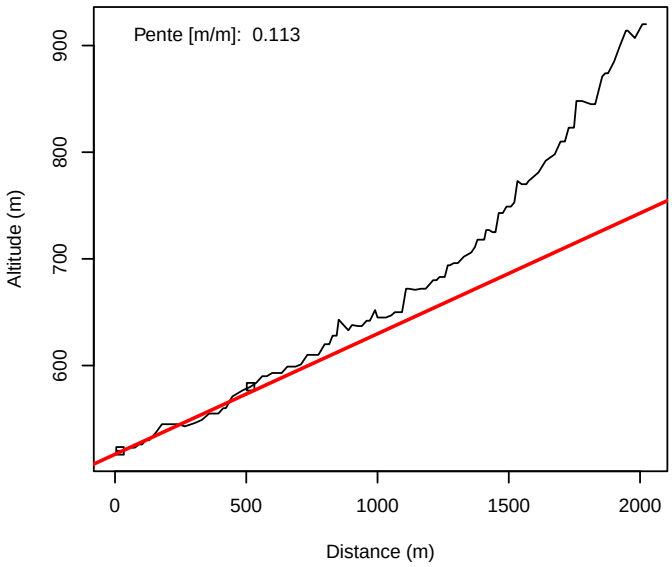
Torrent:TORRENT DU BEY OU RUISSEAU DE BANDY
Commune: TERMIGNON (73)
ID: ID272



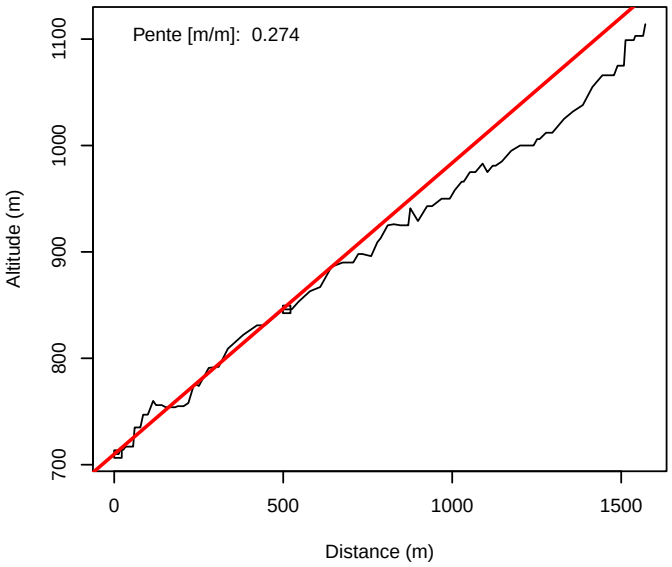
Torrent:LE NANT CROEX
Commune: UGINE (73)
ID: ID278



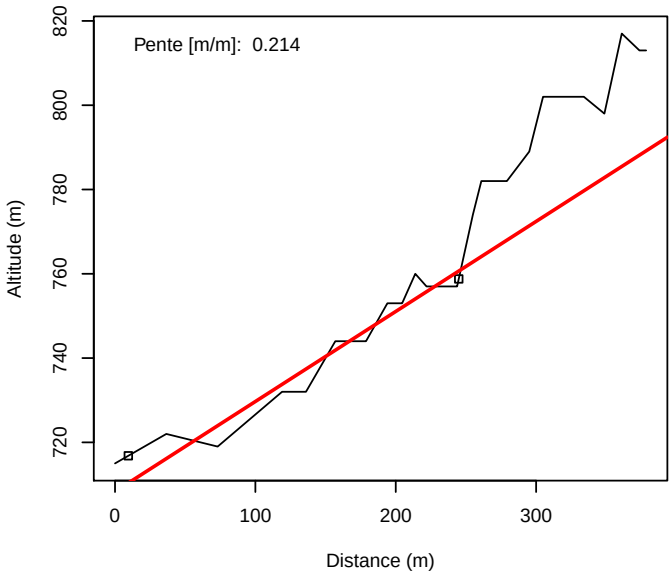
Torrent:LE NANT PUGIN
Commune: UGINE (73)
ID: ID279



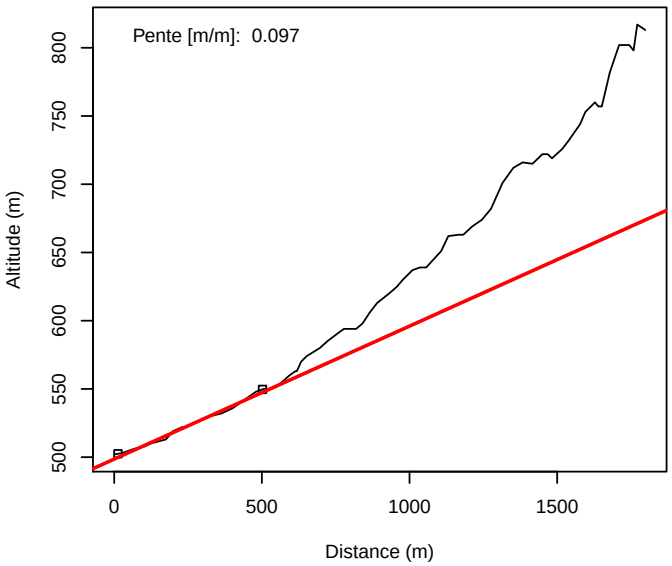
Torrent:LE RIEUBEL
Commune: VILLARGONDRAN (73)
ID: ID281



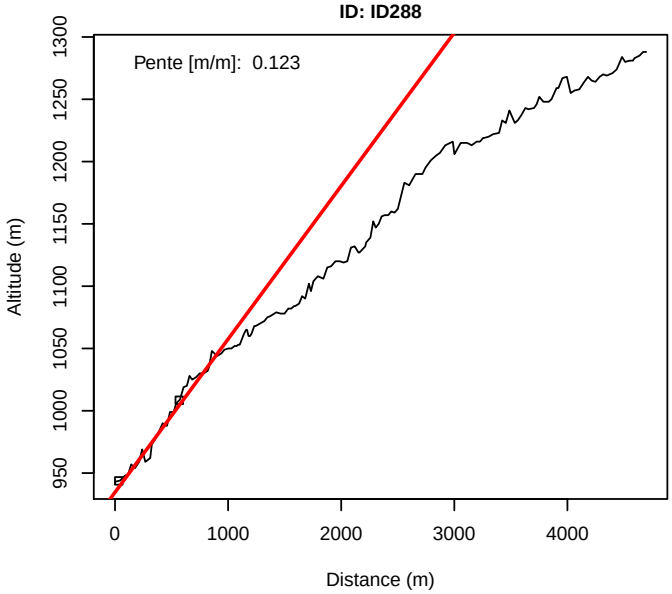
Torrent:LE PIEZAN (AMONT)
Commune: CONS−STE−COLOMBE (74)
ID: ID286



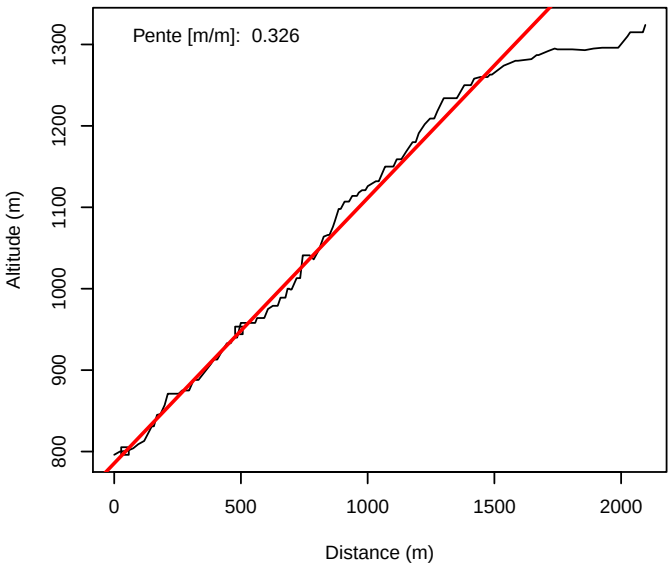
Torrent:LE PIEZAN (AVAL)
Commune: CONS−STE−COLOMBE (74)
ID: ID287



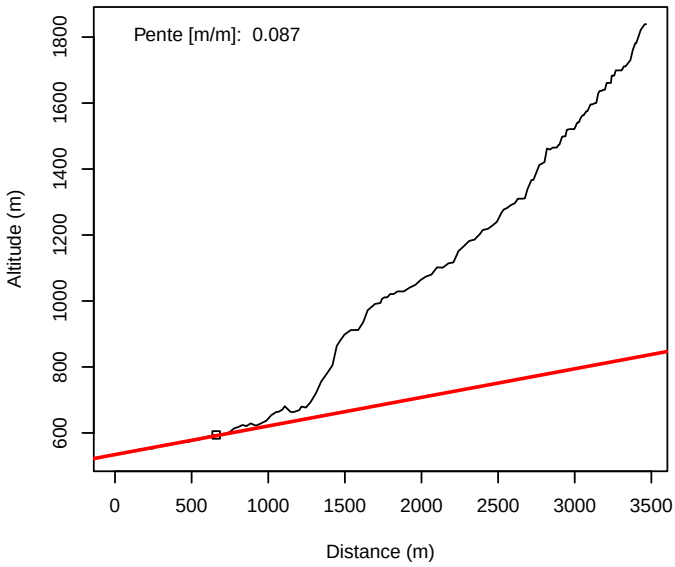
Torrent:LE CHINAILLON
Commune: LE GRAND−BORNAND (74)
ID: ID288



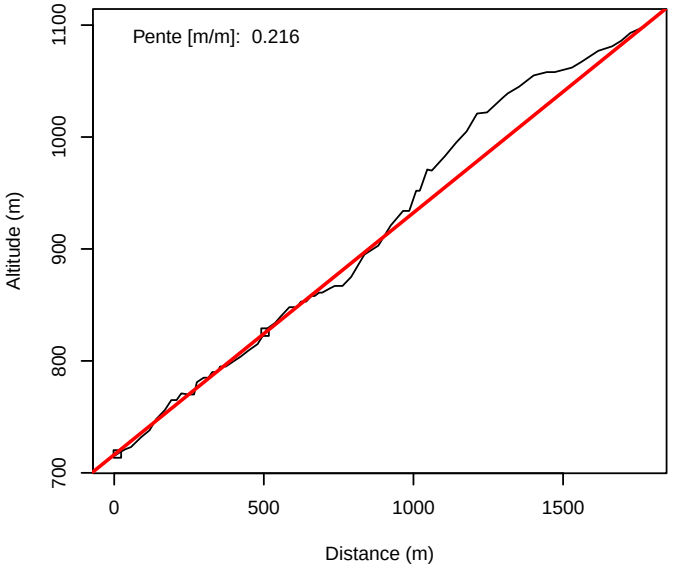
Torrent:LE NANT BORDON
Commune: PASSY (74)
ID: ID292



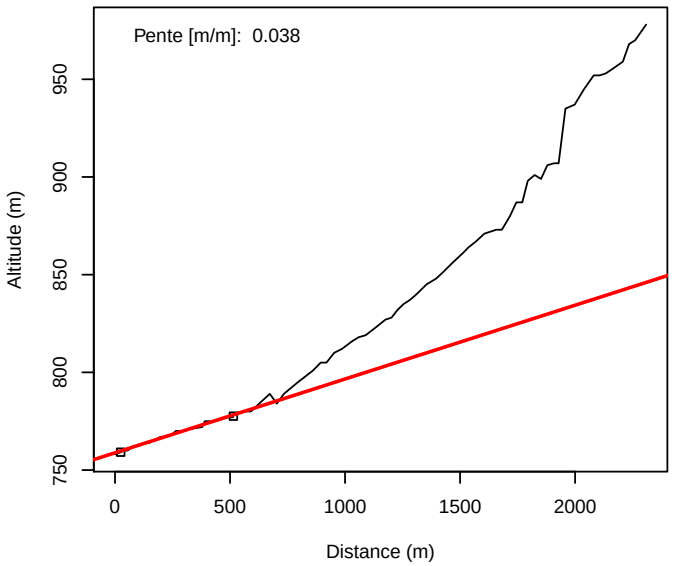
Torrent:TORRENT DE RENINGE
Commune: SALLANCHES (74)
ID: ID296



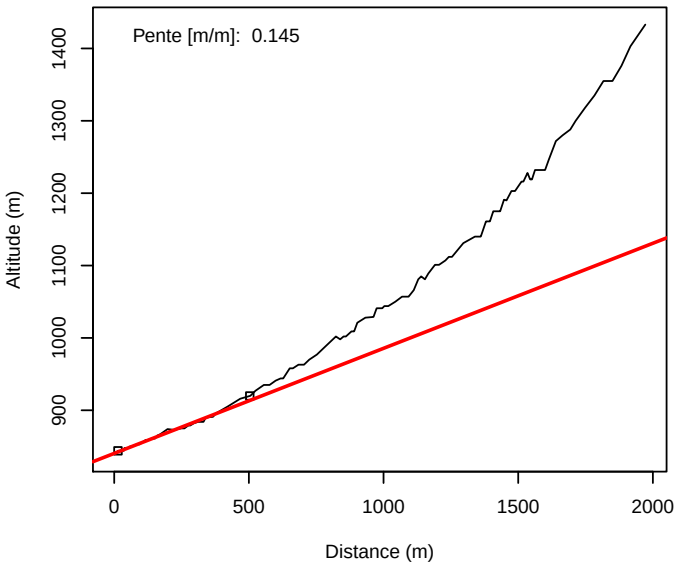
Torrent:RUISSEAU DE BEROUZE
Commune: SAMOËNS (74)
ID: ID299



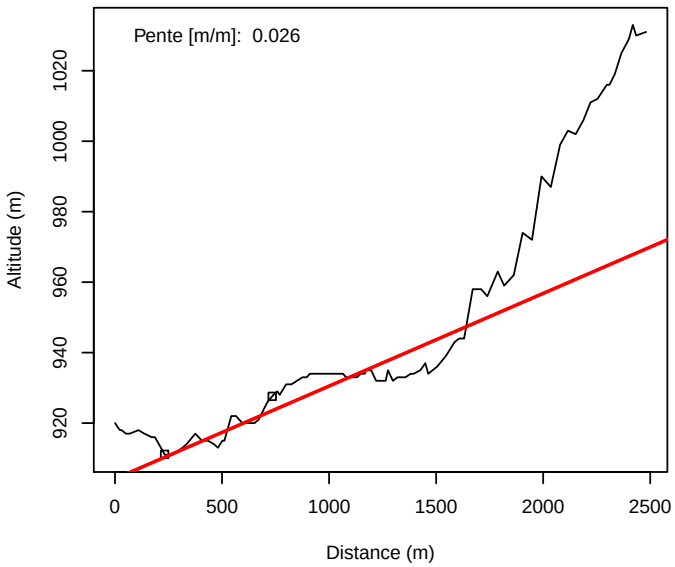
Torrent:LE CLEVIEUX
Commune: SAMOËNS (74)
ID: ID300



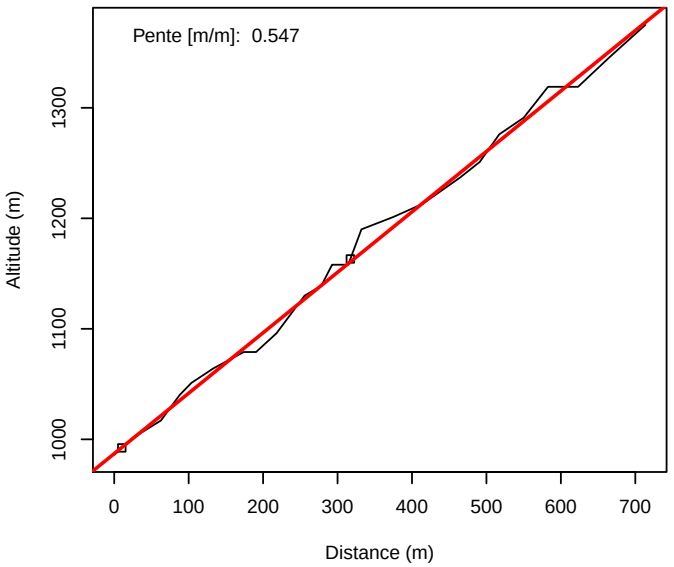
Torrent:NANT SEC
Commune: SIXT−FER−A−CHEVAL (74)
ID: ID305



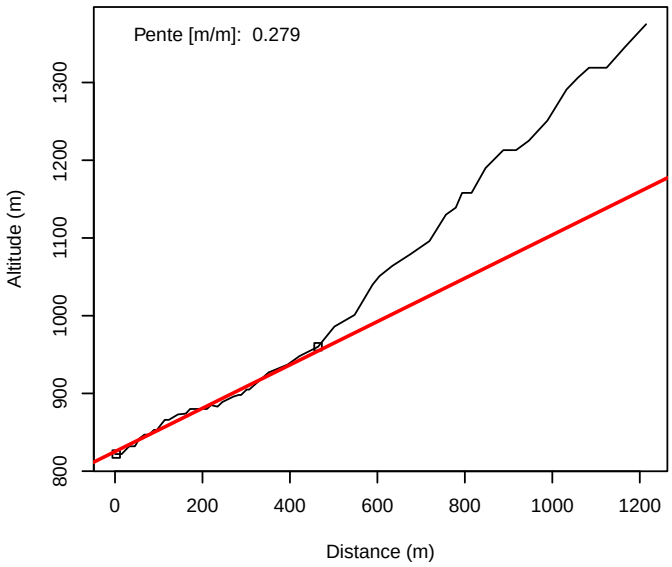
Torrent:TORRENT DE DORJON
Commune: MEGEVETTE (74)
ID: ID308



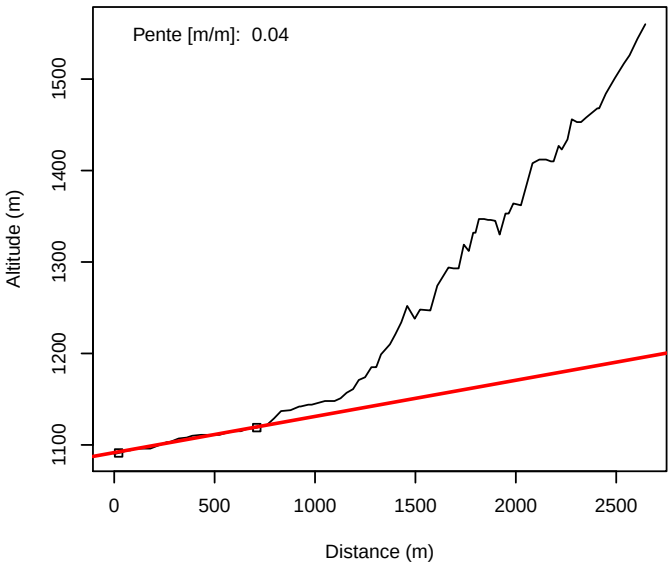
Torrent:TORRENT DU DARD (AMONT)
Commune: ST−GERVAIS−LES−BAINS (74)
ID: ID317



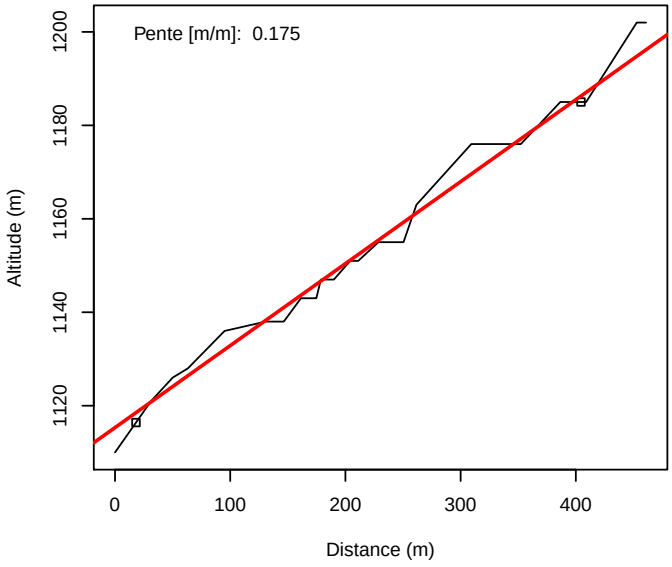
Torrent:TORRENT DU DARD (AVAL)
Commune: ST−GERVAIS−LES−BAINS (74)
ID: ID318



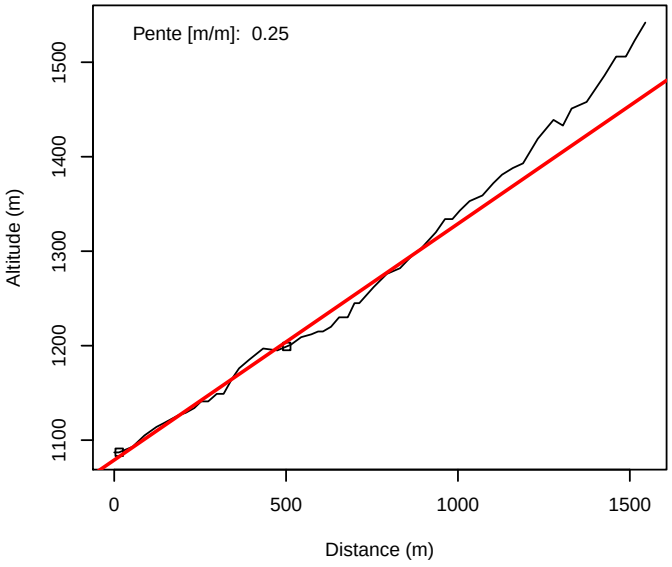
Torrent:ARVEYRON DE LA MER DE GLACE
Commune: CHAMONIX−MONT−BLANC (74)
ID: ID319



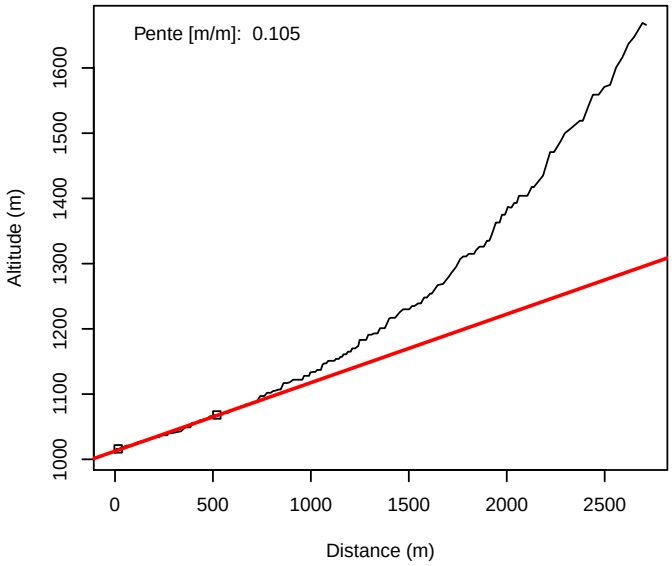
Torrent:LES FAVRANDS
Commune: CHAMONIX−MONT−BLANC (74)
ID: ID320



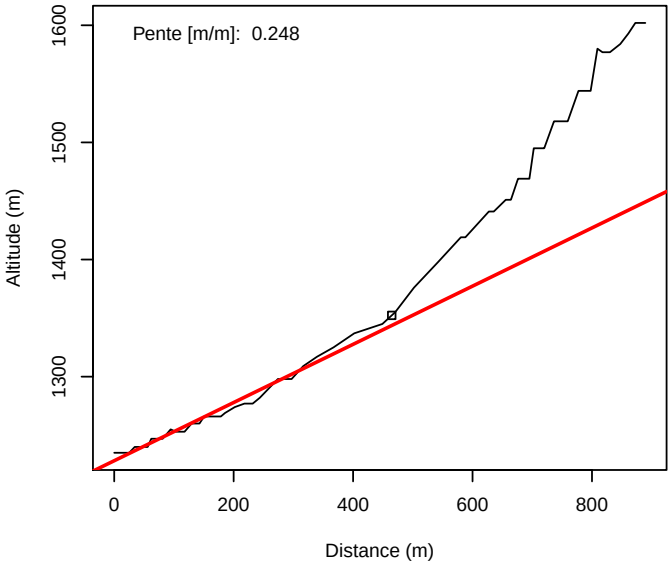
Torrent:TACONNAZ
Commune: CHAMONIX−MONT−BLANC (69)
ID: ID322



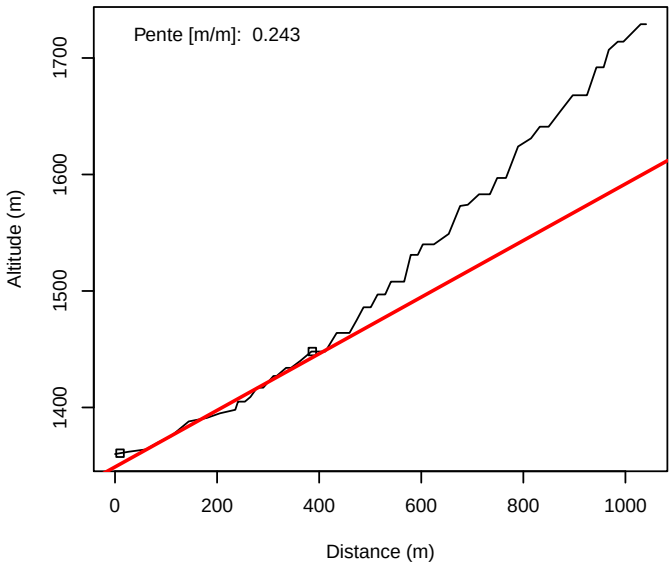
Torrent:LA CREUSAZ
Commune: CHAMONIX−MONT−BLANC (74)
ID: ID323



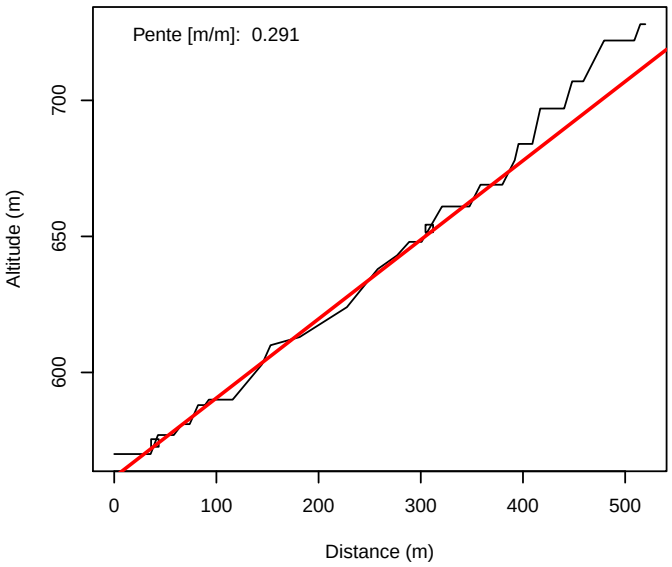
Torrent:LE BOURGEAT
Commune: LES HOUCHES (74)
ID: ID326



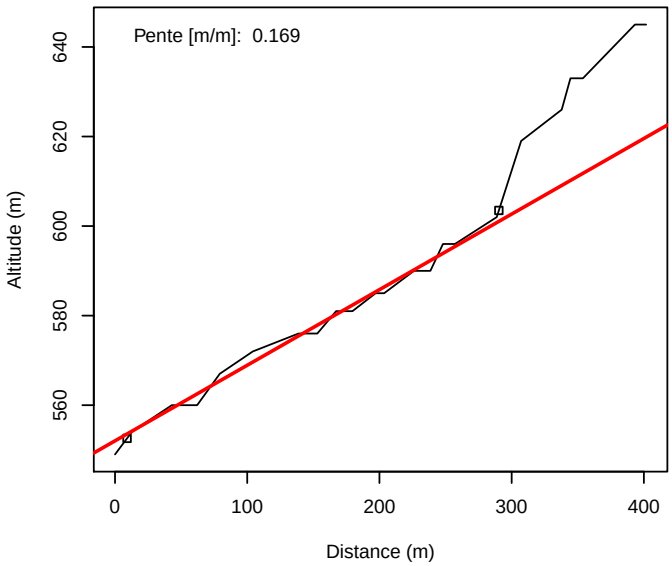
Torrent:LE NANT BORDON (2)
Commune: PASSY (74)
ID: ID329



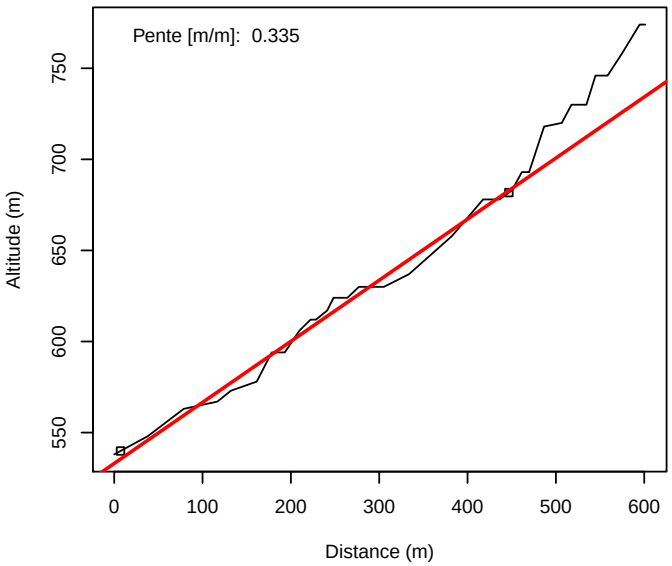
Torrent:TORRENT DE L'AIGUILLE
Commune: BIVIERS (38)
ID: ID40



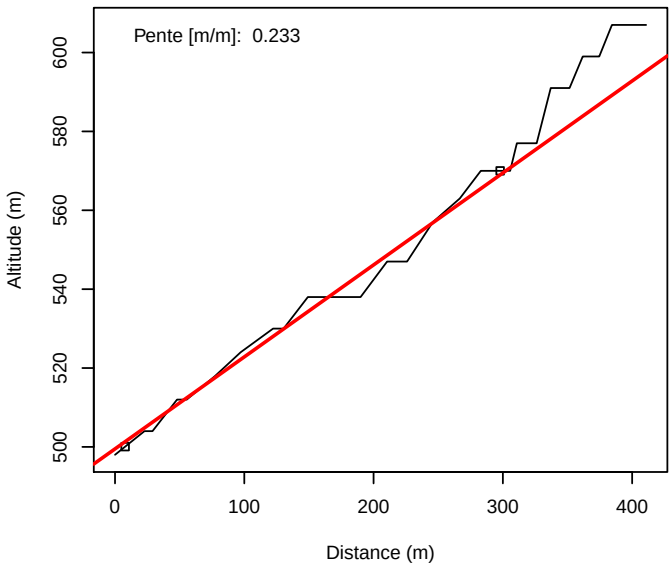
Torrent:TORRENT DES GUICHARDS
Commune: BIVIERS (38)
ID: ID43



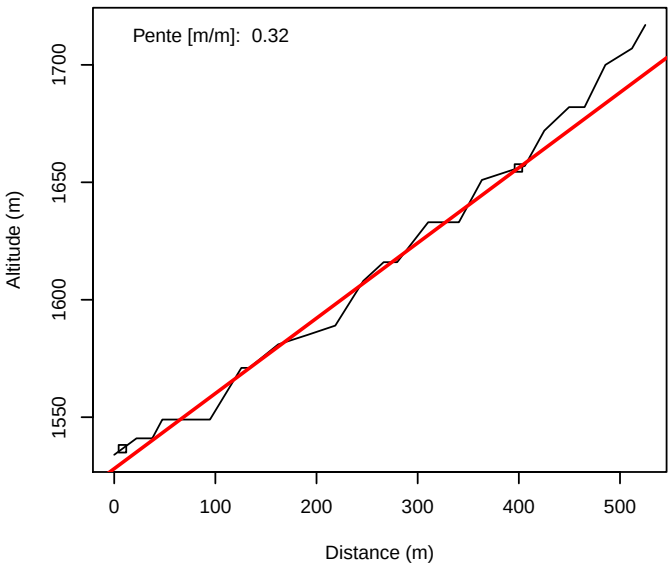
Torrent:TORRENT DE CREPON
Commune: BIVIERS (38)
ID: ID44



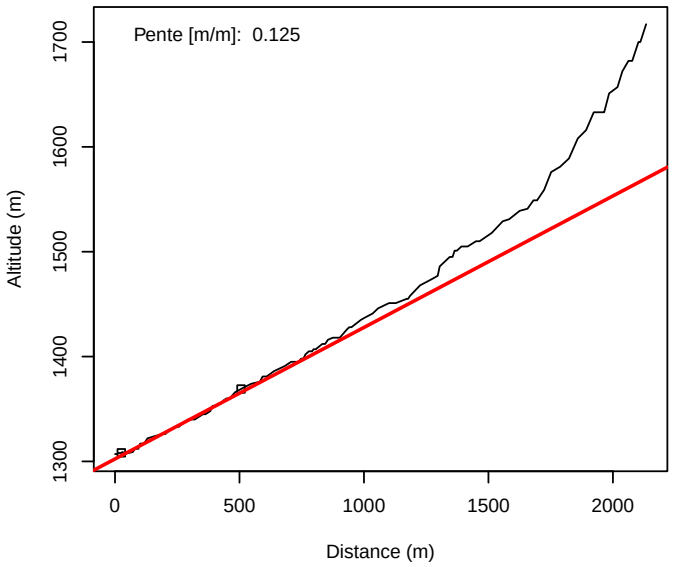
Torrent:TORRENT DE GAMOND (ST−HUGUES)
Commune: BIVIERS (38)
ID: ID47



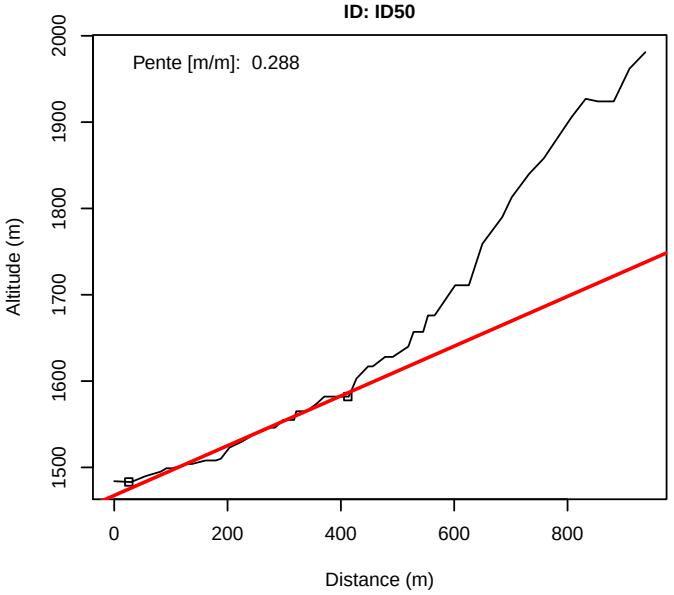
Torrent:LE MERDARET (AMONT)
Commune: CHANTELOUVE (38)
ID: ID48



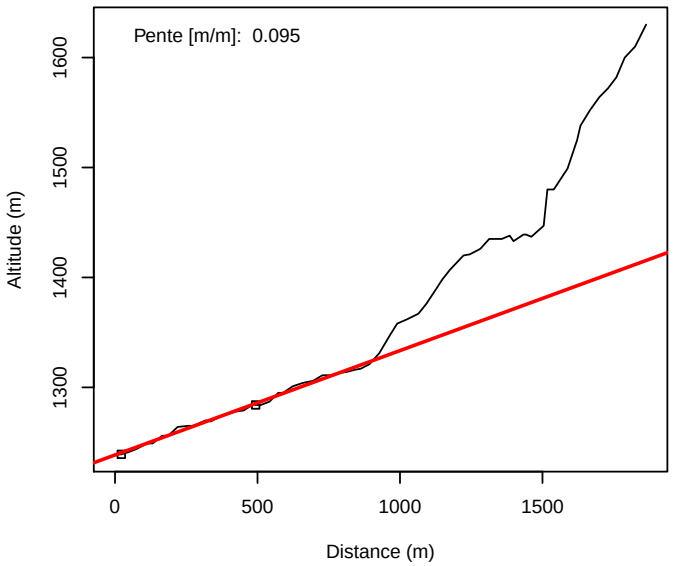
Torrent:LE MERDARET (AVAL)
Commune: CHANTELOUVE (38)
ID: ID49



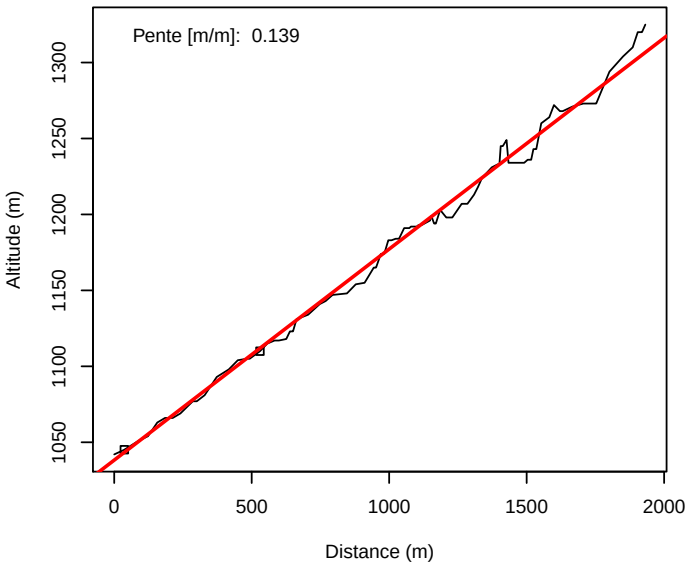
Torrent:RAVIN DES PÂLES
Commune: CHANTELOUVE (38)
ID: ID50



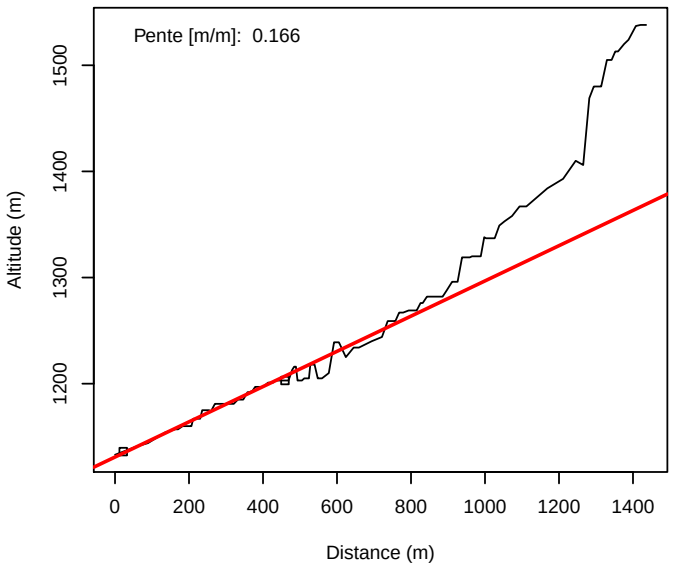
Torrent:ARVEYRON ARGENTIERE
Commune: CHAMONIX (74)
ID: ID501



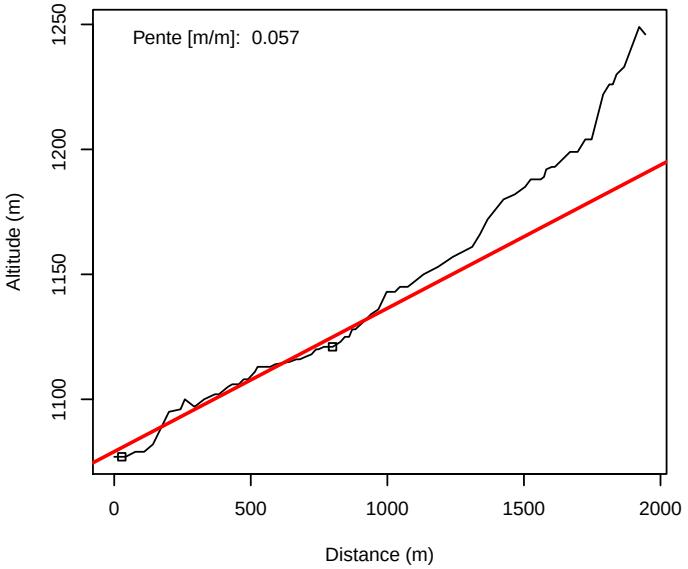
Torrent:RUISSEAU DES ARCHES
Commune: CHICHILIANNE (38)
ID: ID57



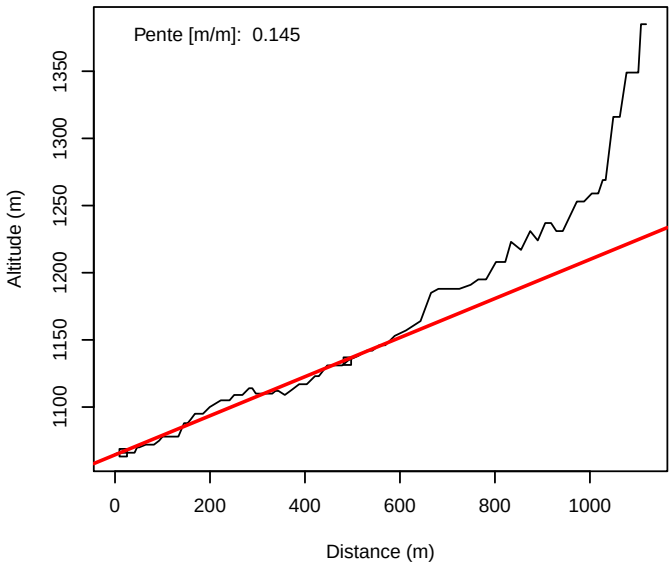
Torrent:RUISSEAU DES FRACHES
Commune: CHICHILIANNE (38)
ID: ID58



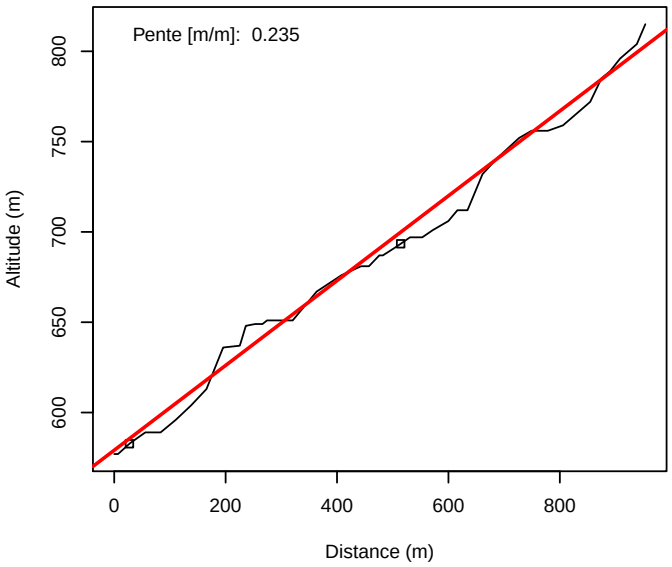
Torrent:RUISSEAU DES FRACHES
Commune: CHICHILIANNE (38)
ID: ID59



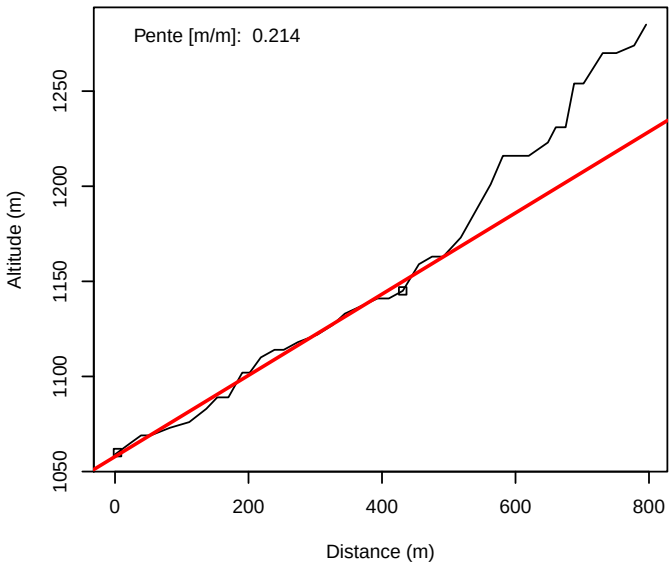
Torrent:TORRENT DE LA BERNARDIERE
Commune: CHICHILIANNE (38)
ID: ID60



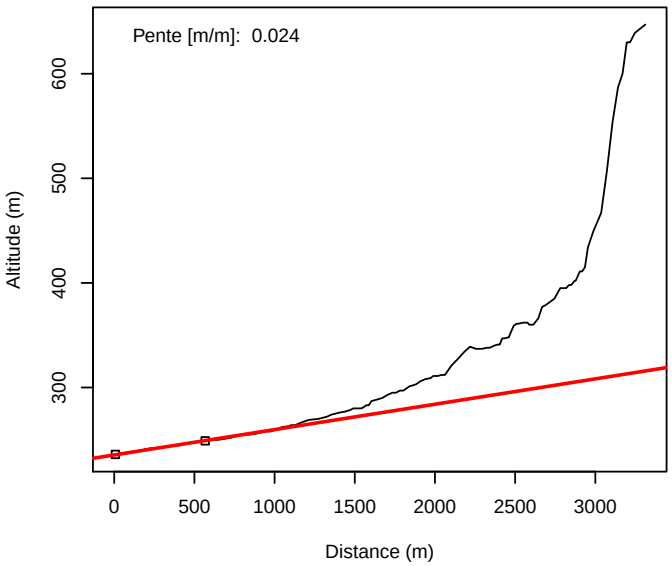
Torrent:LE RIF TALON
Commune: CLAIX (38)
ID: ID64



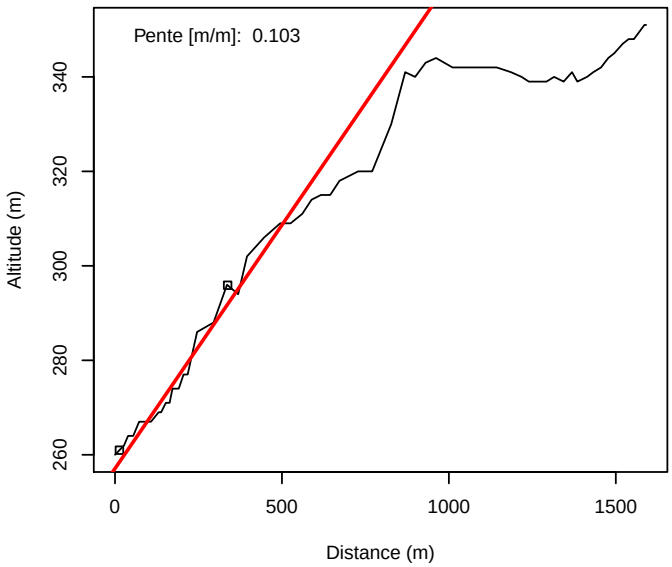
Torrent:RUISSEAU DE CHALANNE
Commune: CORDEAC (38)
ID: ID65



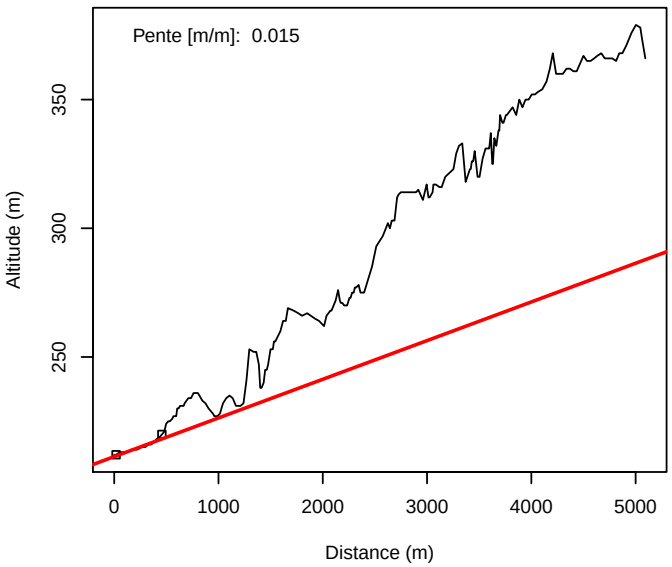
Torrent:LE CRAPONOZ
Commune: CROLLES (38)
ID: ID74



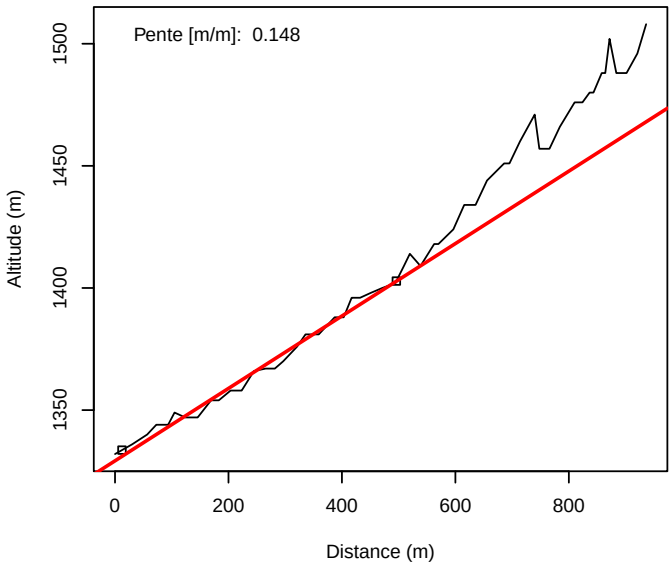
Torrent:VERDERET
Commune: EYBENS (38)
ID: ID76



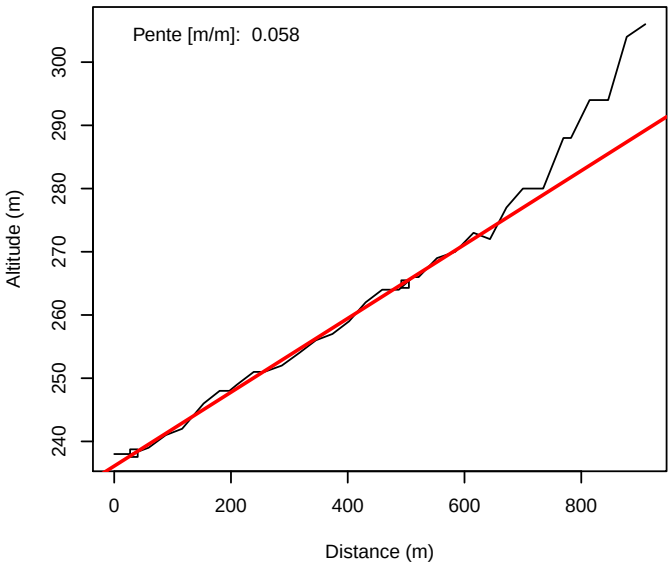
Torrent:SONNANT
Commune: GIERES (38)
ID: ID79



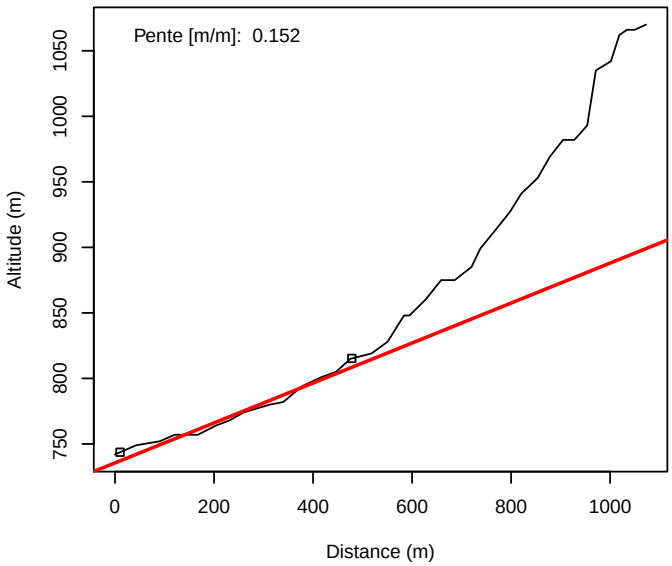
Torrent:LA GRESSE
Commune: GRESSE−EN−VERCORS (38)
ID: ID80



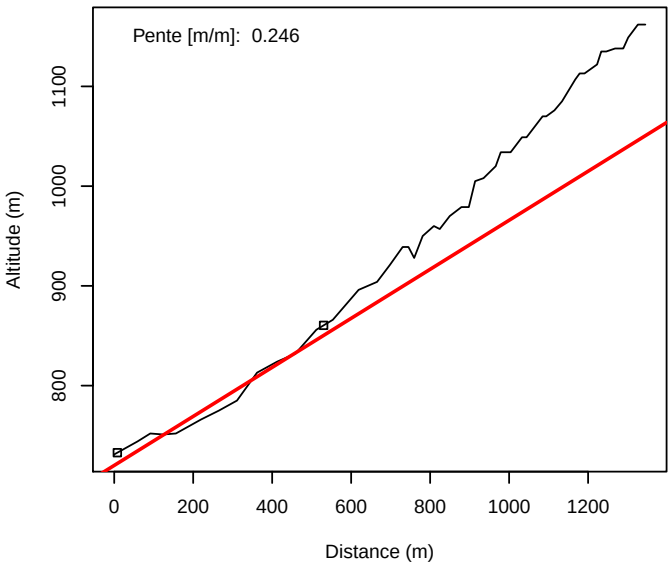
Torrent:LE CHARMEYRAN
Commune: LA TRONCHE (38)
ID: ID88



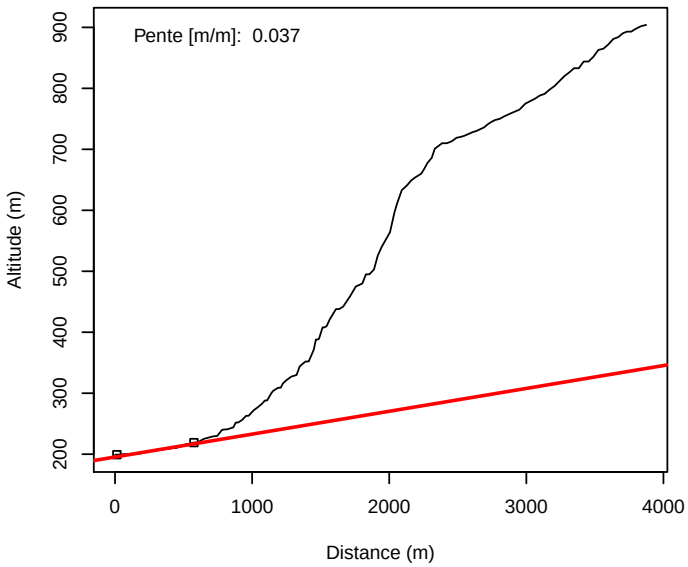
Torrent:LE SAINT−ANTOINE
Commune: LE BOURG D'OISANS (38)
ID: ID96



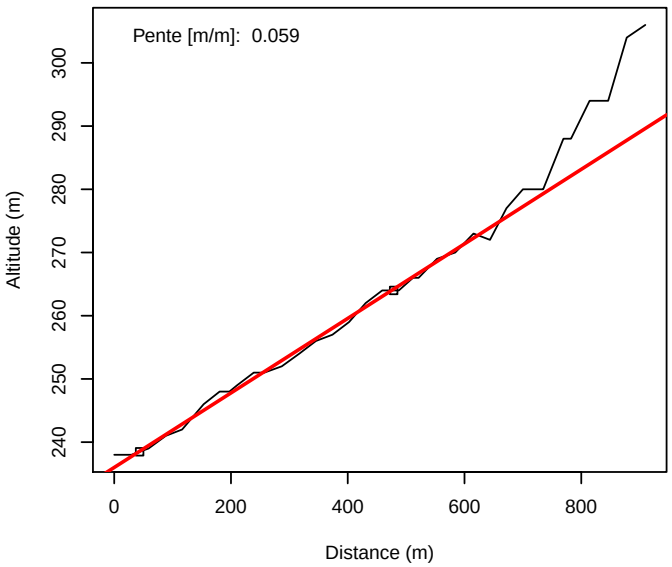
Torrent:LE TREUIL
Commune: LE BOURG D'OISANS (38)
ID: ID98



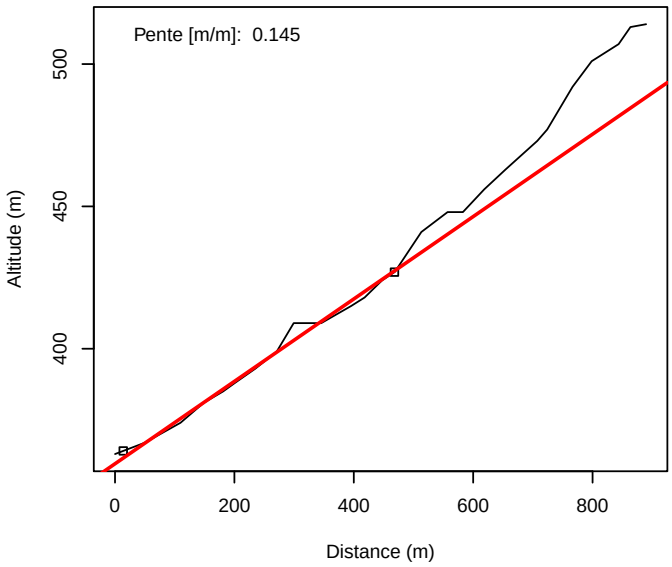
Torrent:LANFREY
Commune: FONTANIL−CORNILLON (38)
ID: METRO1



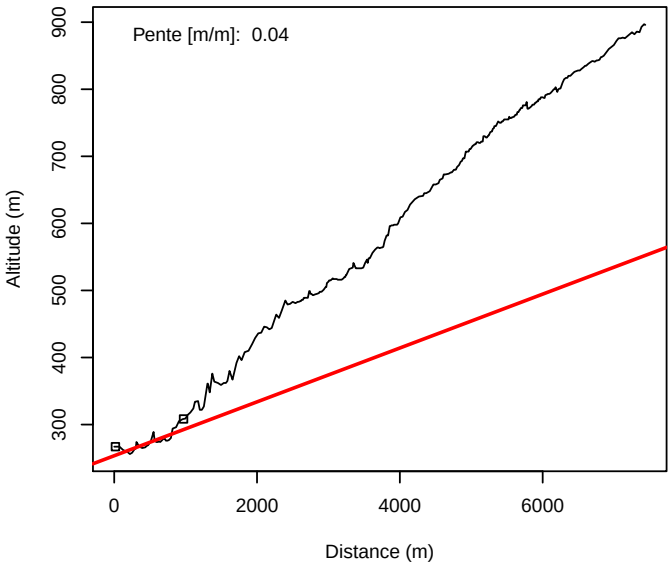
Torrent:CHARMEYRAN
Commune: LA TRONCHE (38)
ID: METRO2



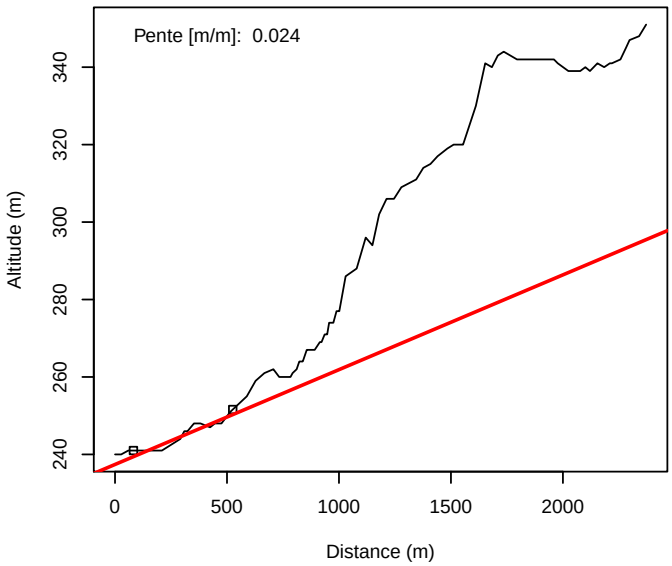
Torrent:JAILLIERES
Commune: MEYLAN (38)
ID: METRO3



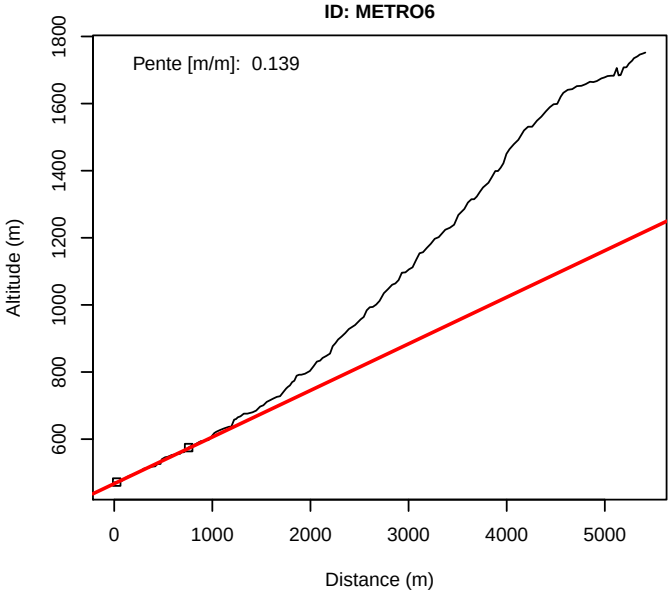
Torrent:DOMEYNON
Commune: DOMENE (38)
ID: METRO4



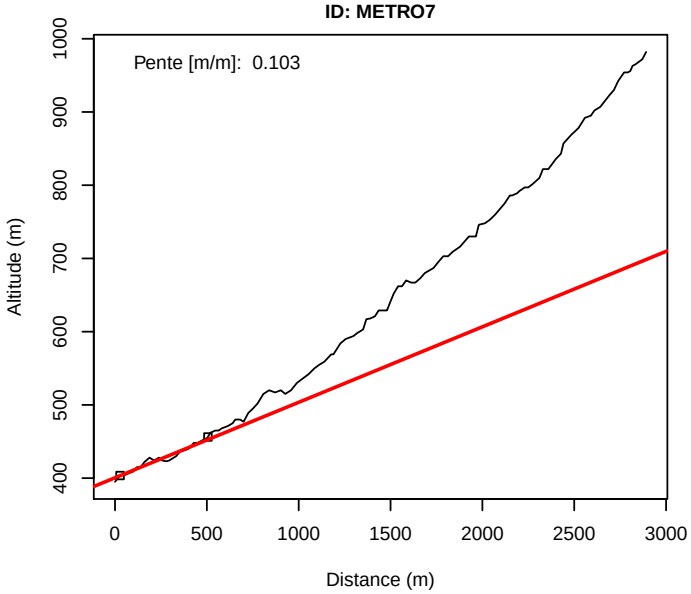
Torrent:VERDERET
Commune: EYBENS (38)
ID: METRO5



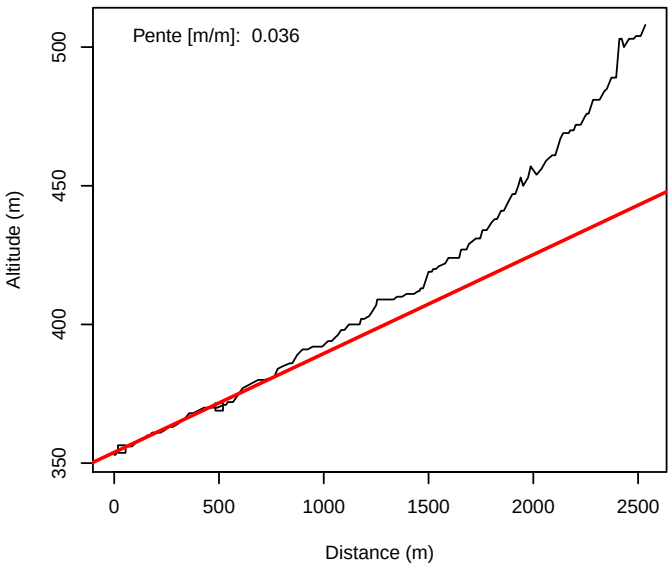
Torrent:VERNON
Commune: VAULNAVEYS−LE−HAUT (38)
ID: METRO6



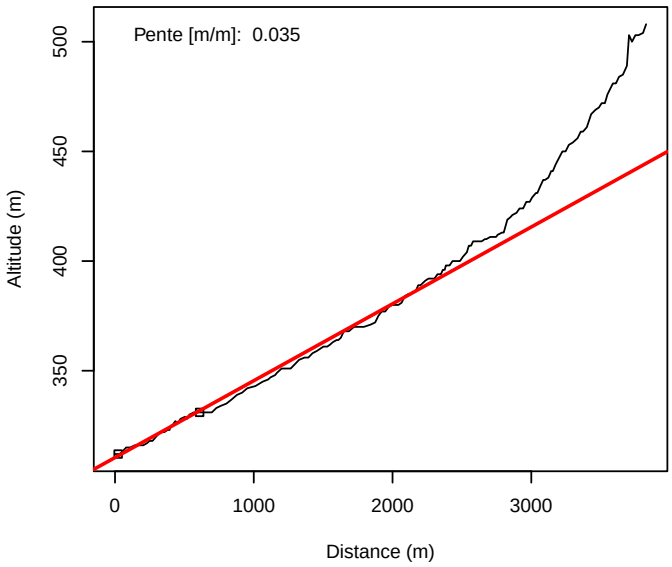
Torrent:PREMOL
Commune: VAULNAVEYS−LE−HAUT (38)
ID: METRO7



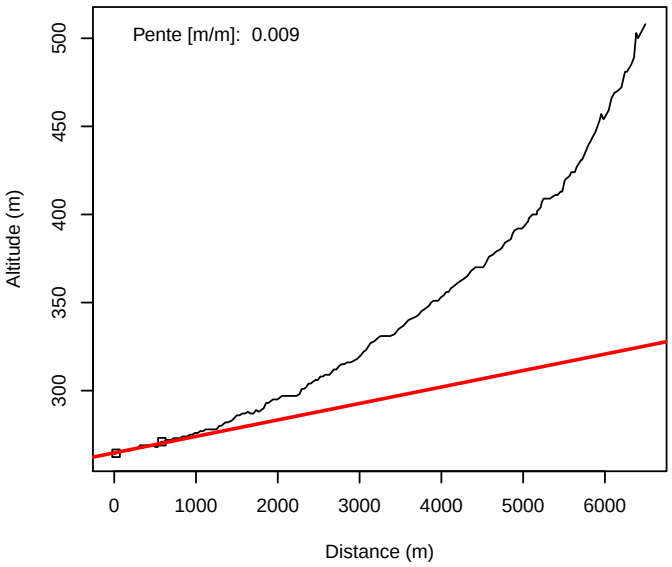
Torrent:LE LAVANCHON
Commune: SAINT−PAUL−DE−VARCES (38)
ID: METRO8a



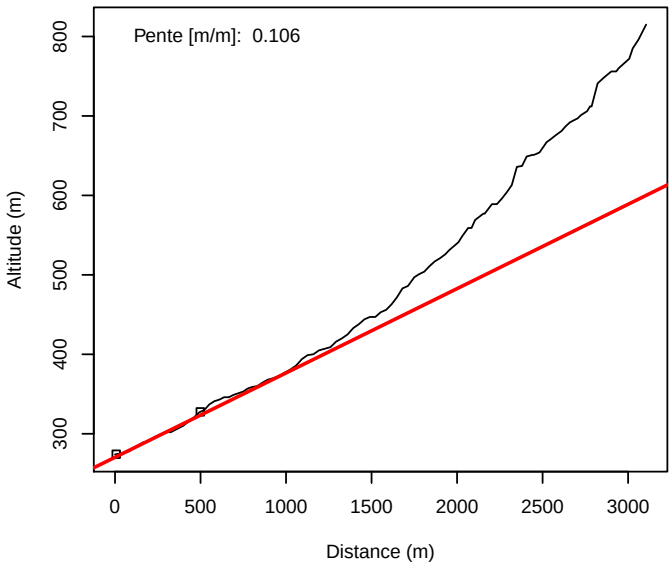
Torrent:LE LAVANCHON
Commune: SAINT−PAUL−DE−VARCES (38)
ID: METRO8b



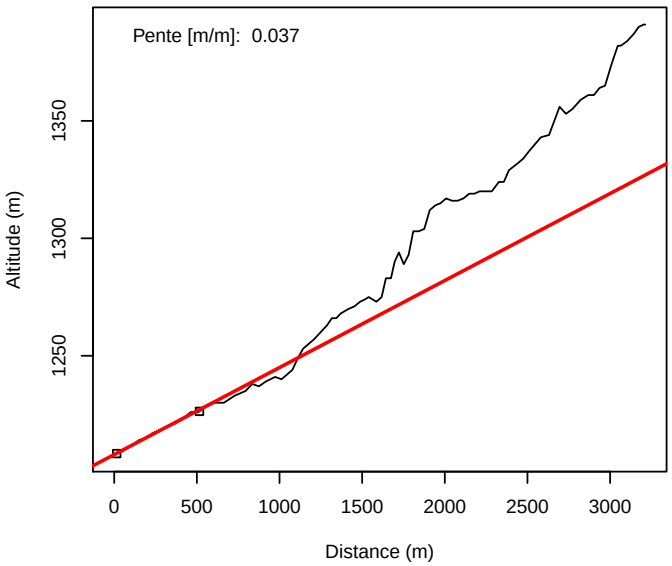
Torrent:LE LAVANCHON
Commune: VARCES−ALLIERES−ET−RISSET (38)
ID: METRO8c



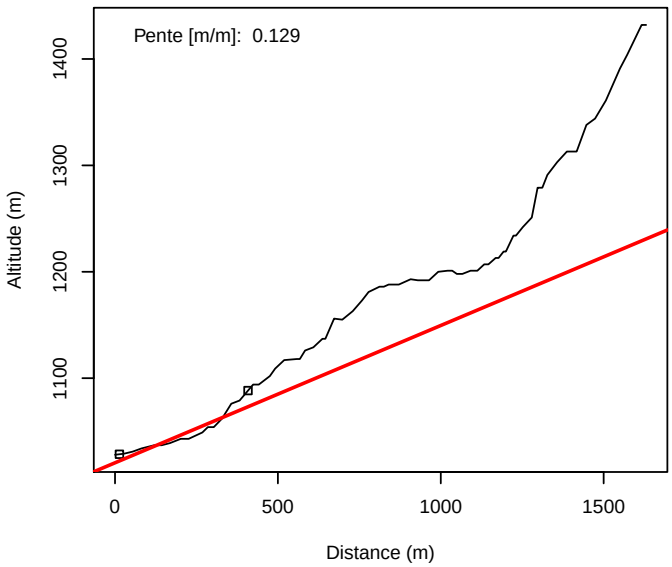
Torrent:LE RIF TALON
Commune: CLAIX (38)
ID: METRO9



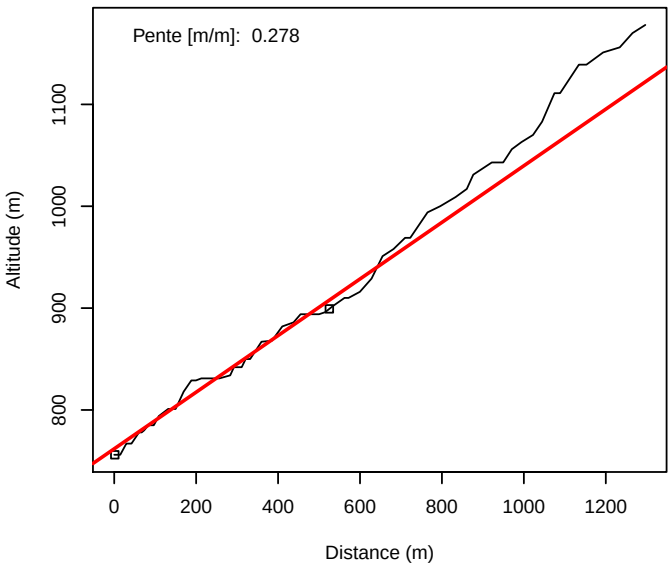
Torrent:ARVE
Commune: CHAMONIX (74)
ID: SMA1



Torrent:BOSSONS
Commune: CHAMONIX (74)
ID: SMA2



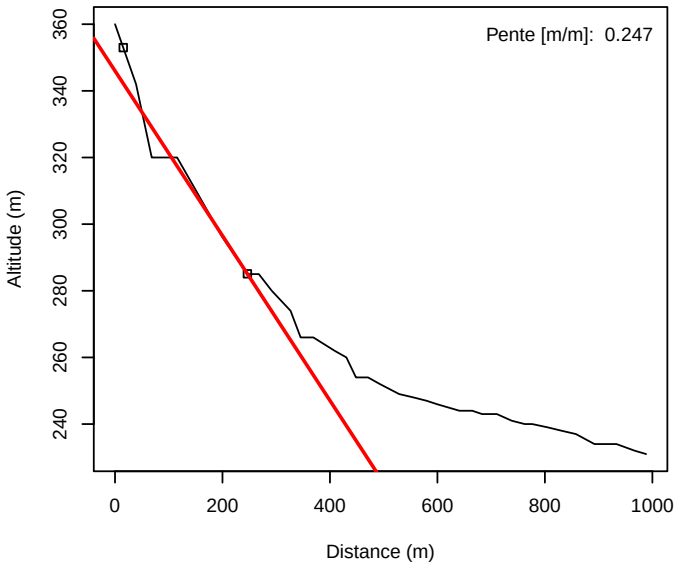
Torrent:FERNEY
Commune: SAINT GERVAIS LES BAINS (74)
ID: SMA3



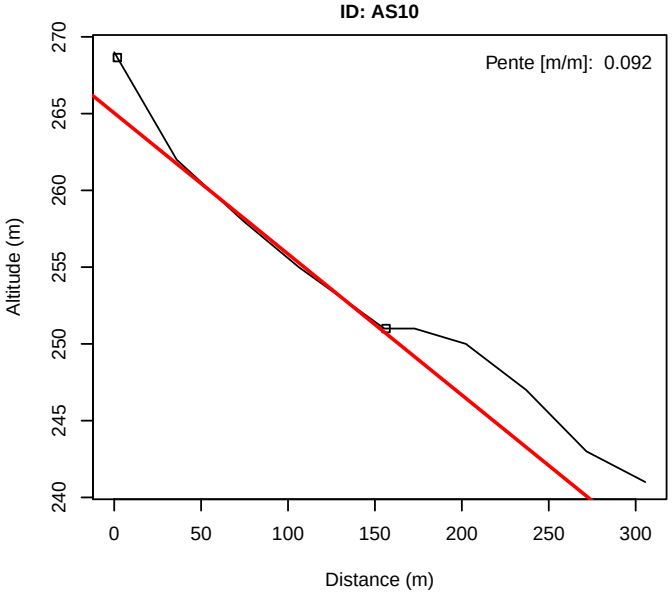
D Pentes des cônes de déjection

Profil en long du cône de déjection de chaque bassin versant (données d'altitude : IGN BD ALTI 25 m, implantation cartographique des axes des cours d'eau : IGN BD TOPO) et estimation de la pente de l'apex.

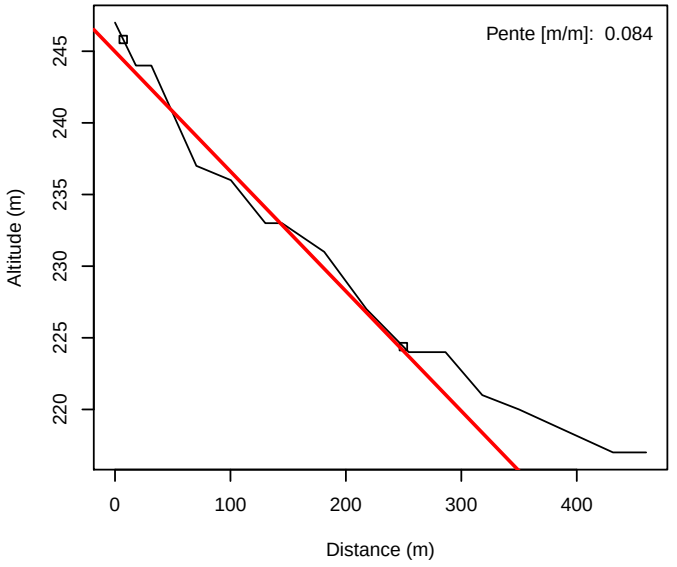
Torrent:MONFORT
Commune: CROLLES (38)
ID: AS1



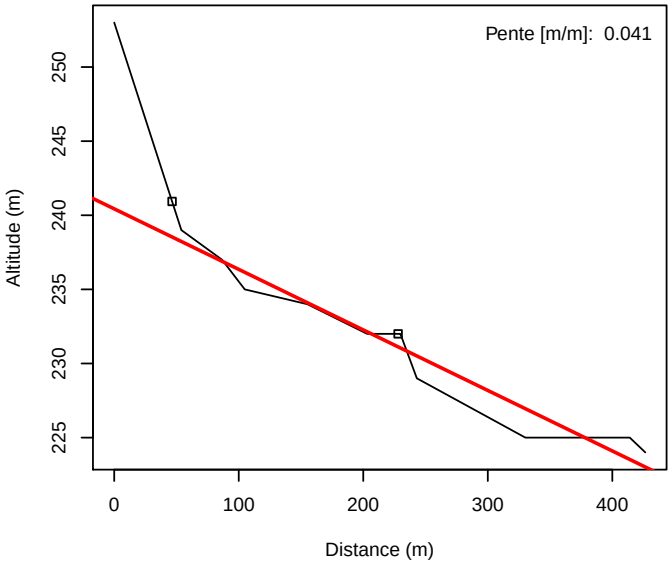
Torrent:HURTIERES
Commune: LA PIERRE (38)
ID: AS10



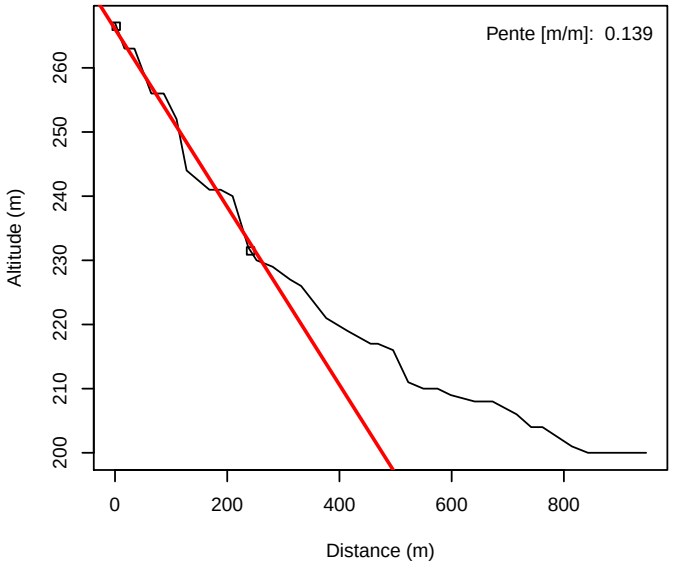
Torrent:MURIANETTE
Commune: MURIANETTE (38)
ID: AS11



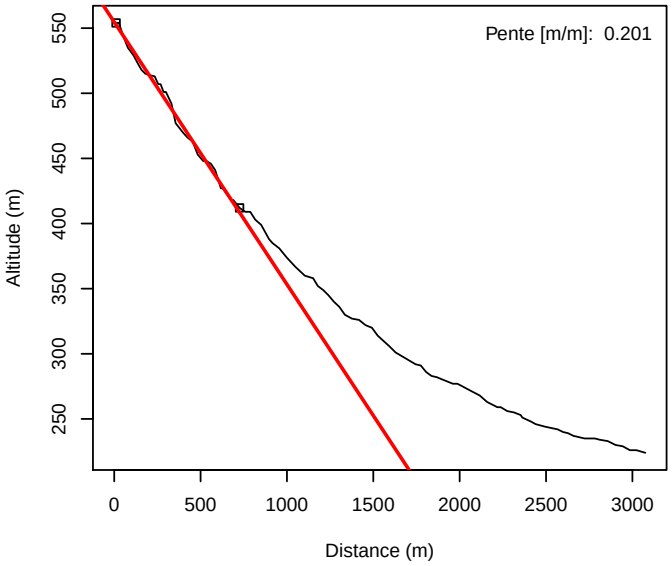
Torrent:VERSOUD
Commune: LE VERSOUD (38)
ID: AS12



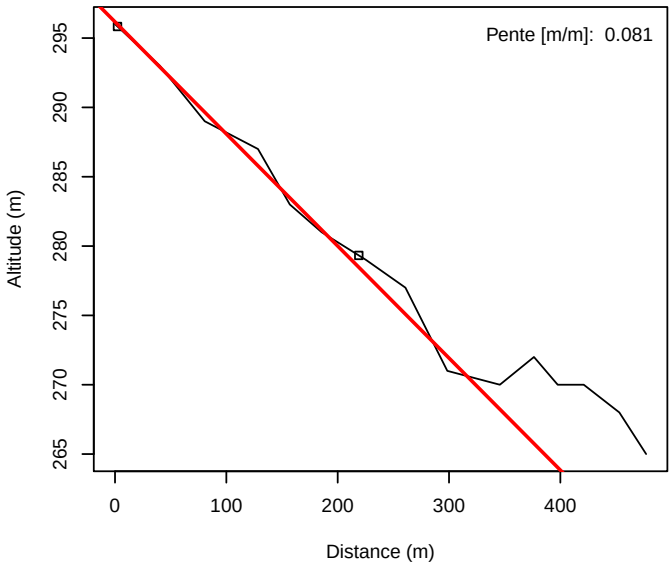
Torrent:LANFREY
Commune: FONTANIL−CORNILLON (38)
ID: AS14



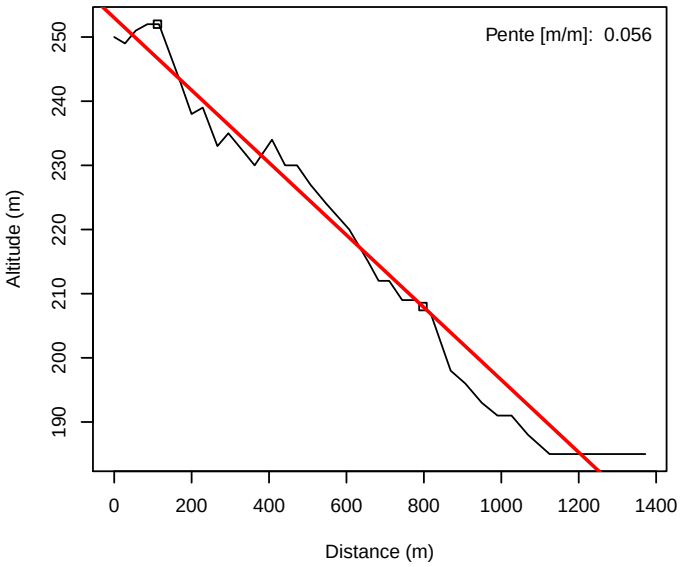
Torrent:JAILLIERES
Commune: MEYLAN (38)
ID: AS15



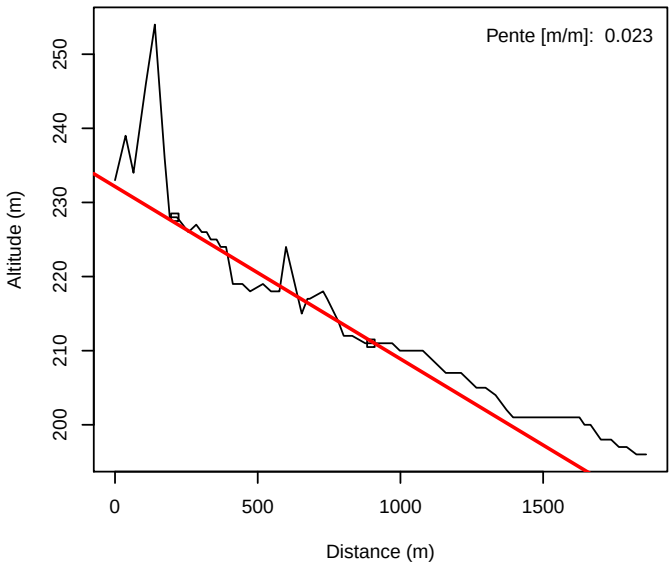
Torrent:VILLARD NOIR
Commune: PONTCHARRA (38)
ID: AS16



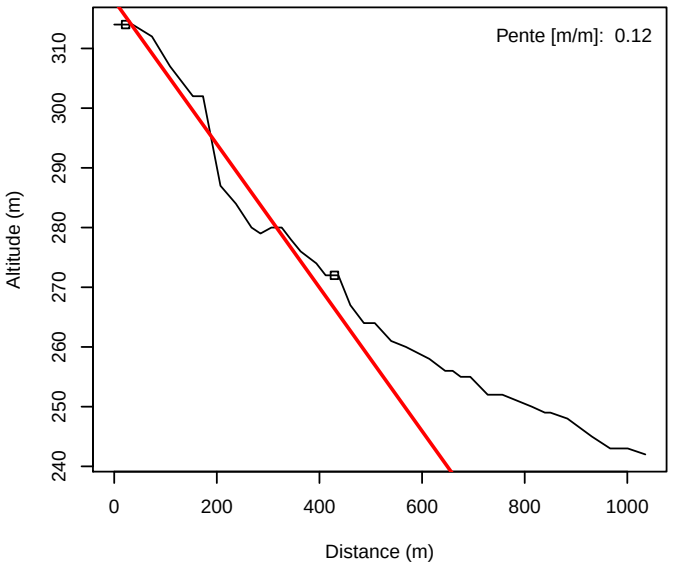
Torrent:GRANDE RIGOLE
Commune: POLIENAS (38)
ID: AS18



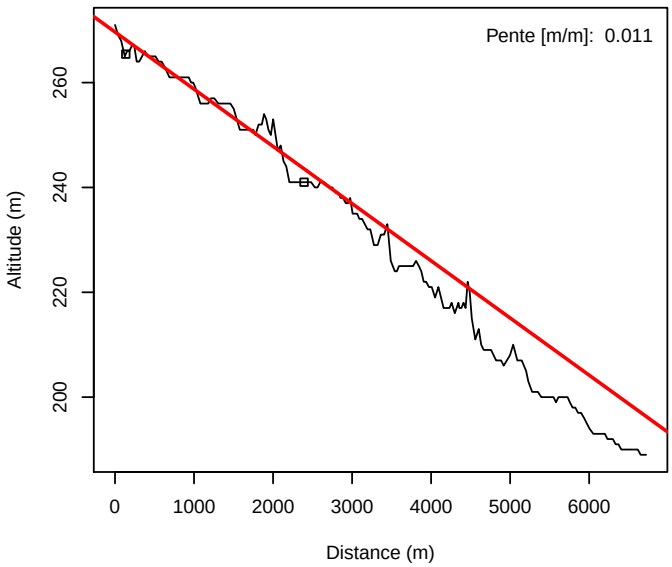
Torrent:LA FURE
Commune: TULLINS (38)
ID: AS19



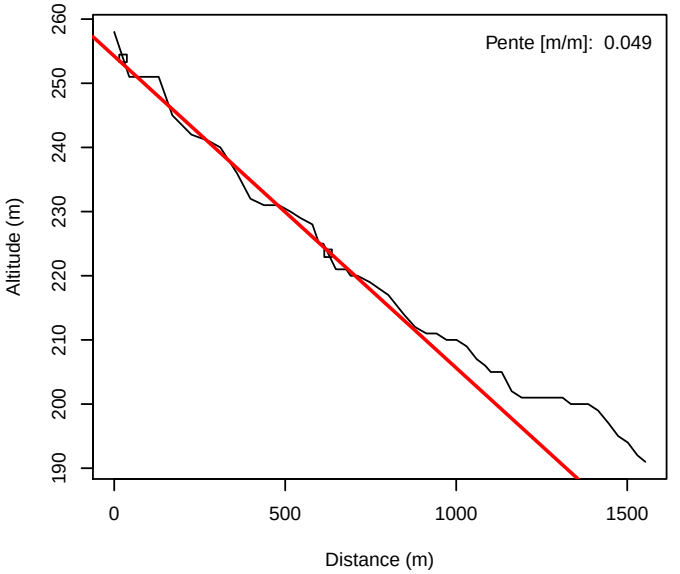
Torrent:CROLLES
Commune: CROLLES (38)
ID: AS2



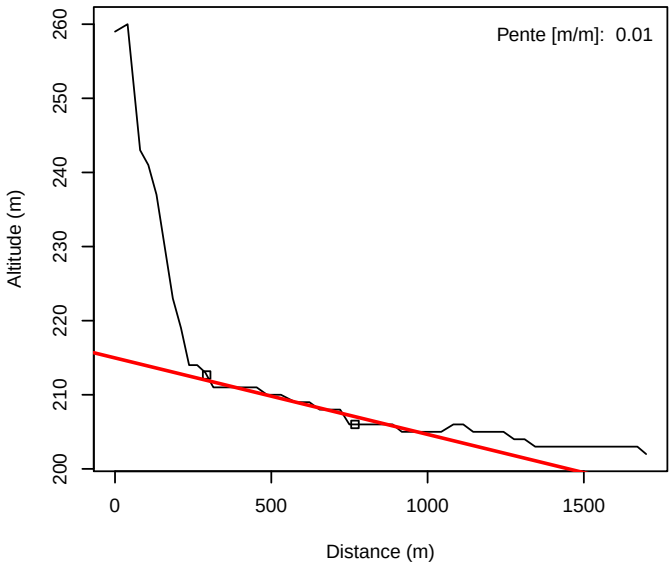
Torrent:LA MORGE
Commune: MOIRANS (38)
ID: AS20



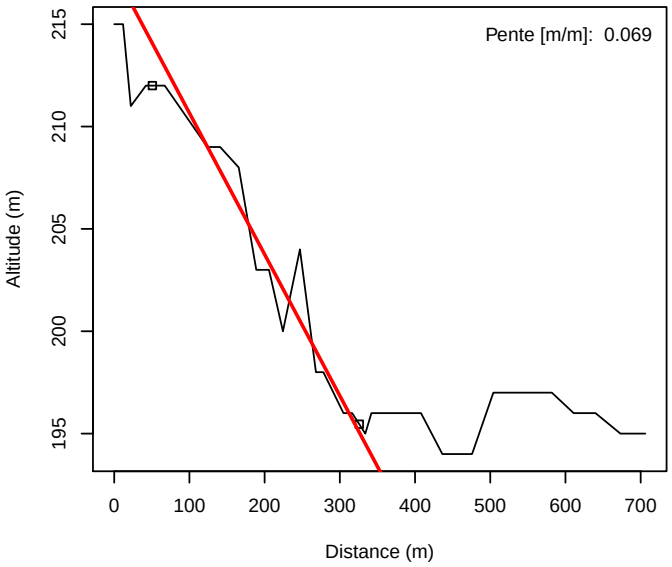
Torrent:ROIZE
Commune: VOREPPE (38)
ID: AS21



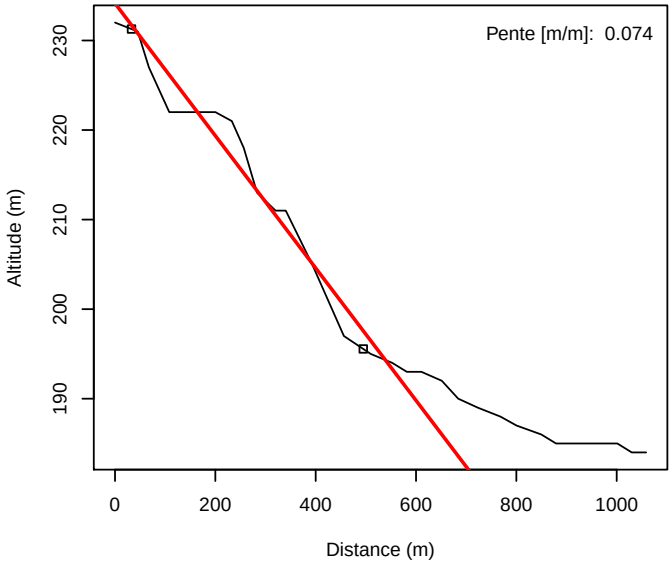
Torrent:FURON
Commune: SASSENAGE (38)
ID: AS22



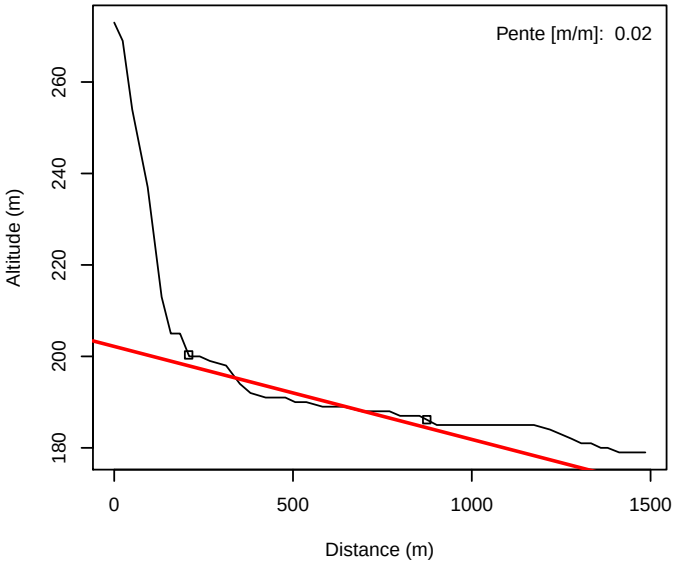
Torrent:VOROIZE
Commune: VEUREY (38)
ID: AS23



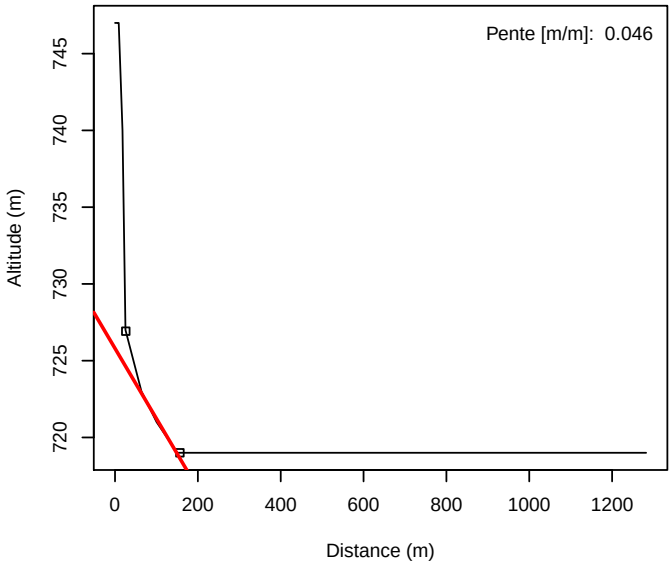
Torrent:MARTINET
Commune: SAINT−QUENTIN−SUR−ISÈRE (38)
ID: AS24



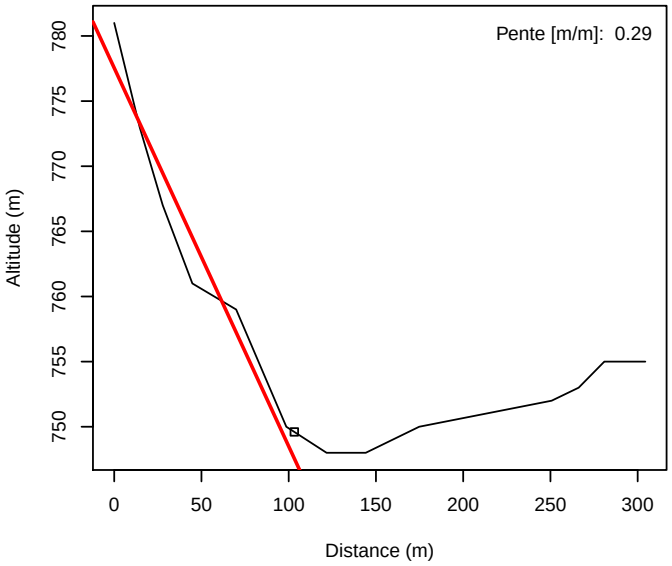
Torrent:VERSOUD
Commune: LA RIVIÈRE (38)
ID: AS25



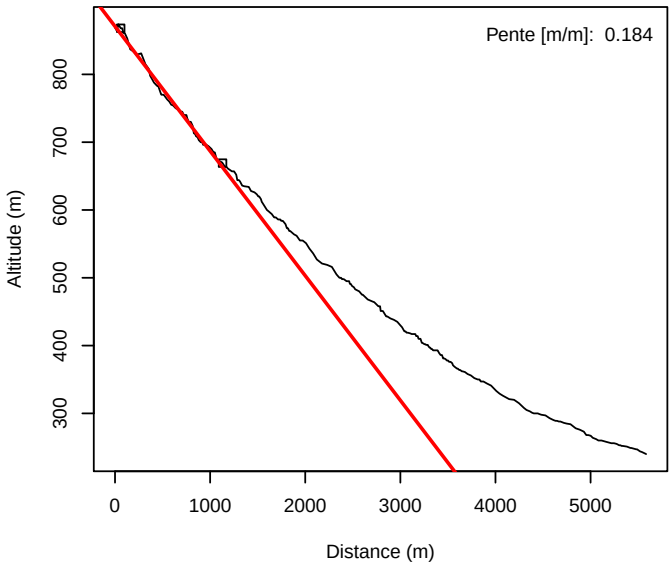
Torrent:SARENNE
Commune: BOURG−D'OISANS (38)
ID: AS26



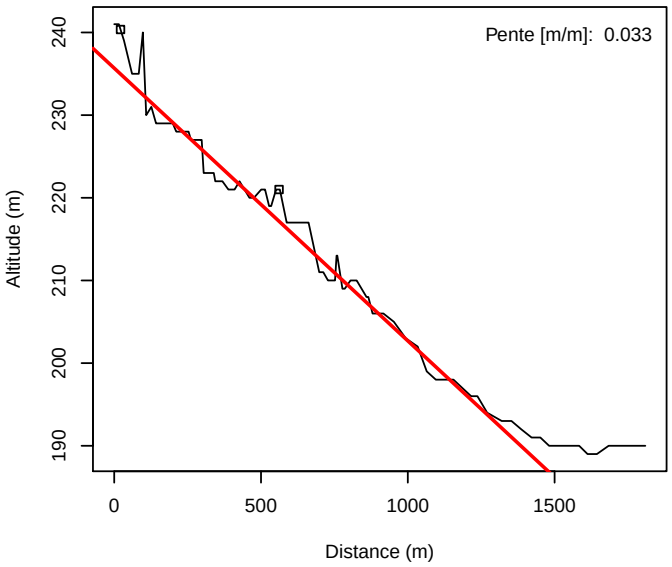
Torrent:MOULINS
Commune: ALLEMOND (38)
ID: AS27



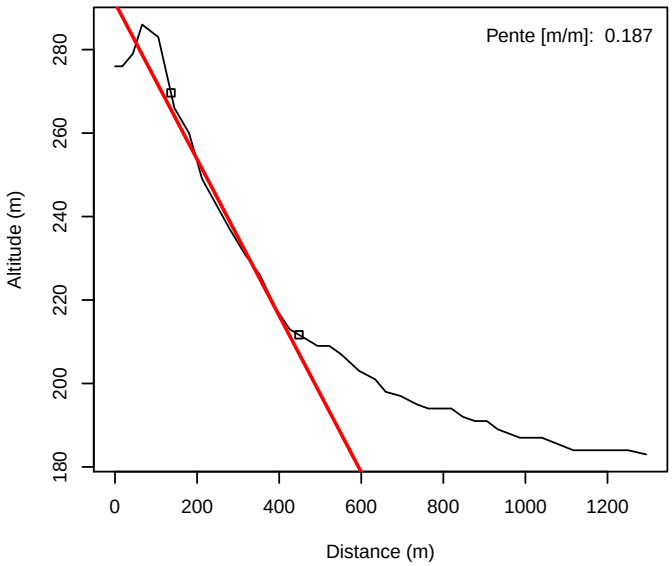
Torrent:TORRENT DU MANIVAL
Commune: ST−NAZAIRE−LES−EYMES (38)
ID: AS3



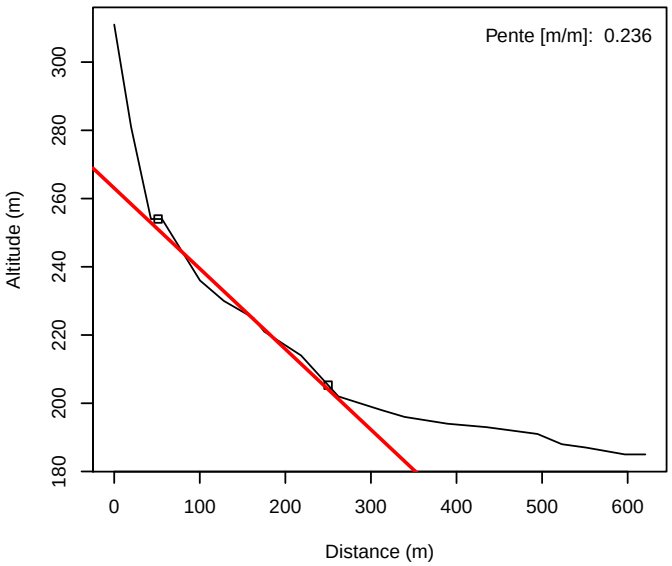
Torrent:OLON
Commune: VOUREY (38)
ID: AS31



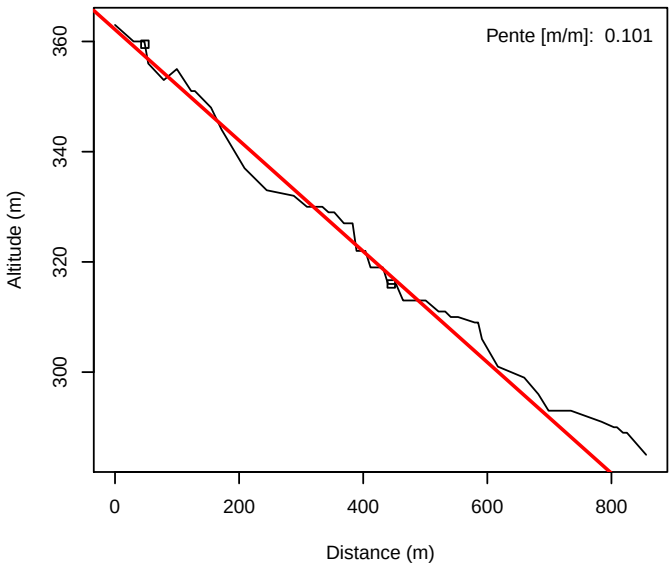
Torrent:ROMANETIERE
Commune: SAINT−QUENTIN−SUR−ISÈRE (38)
ID: AS32



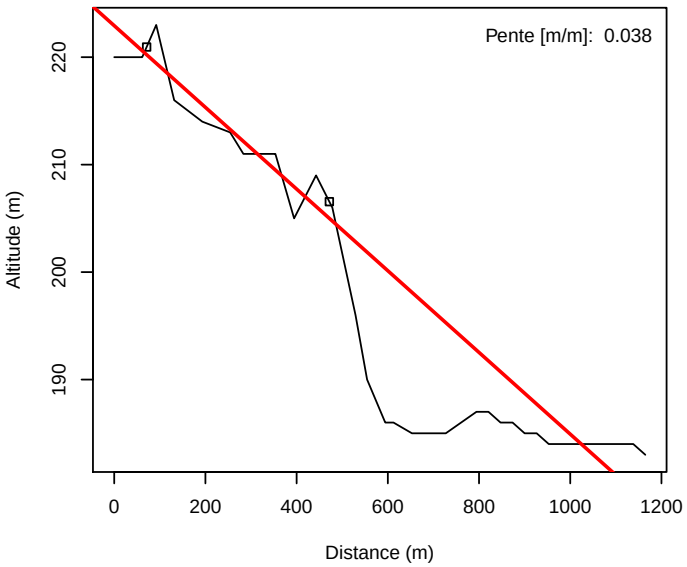
Torrent:RENAUDIERE
Commune: ST−QUENTIN−SUR−ISERE (38)
ID: AS33



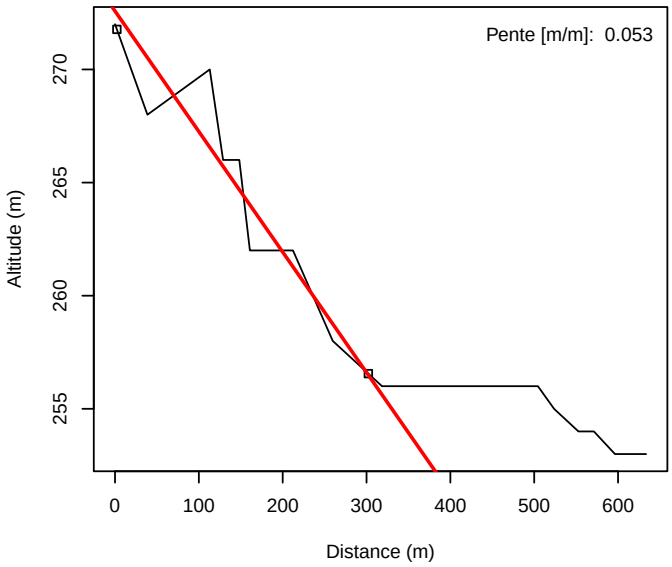
Torrent:RIVAL
Commune: TULLINS (38)
ID: AS34



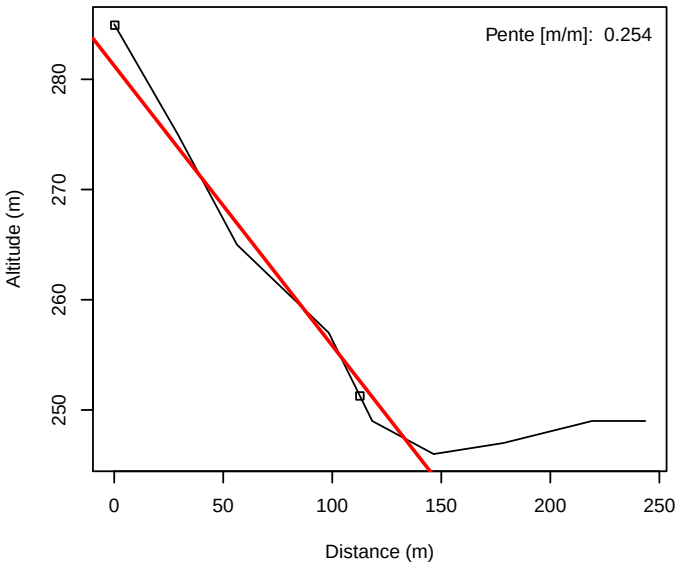
Torrent:GORGEAT
Commune: POLLIENAS (38)
ID: AS35



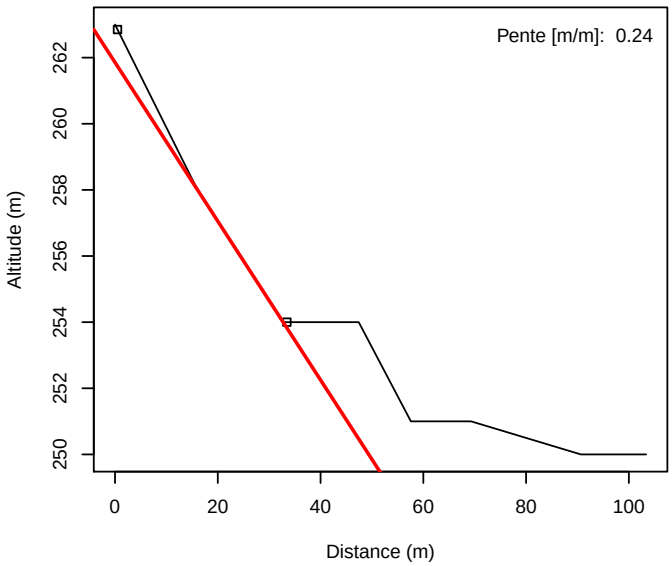
Torrent:MALADIERE
Commune: LA BUISSIERE (38)
ID: AS4



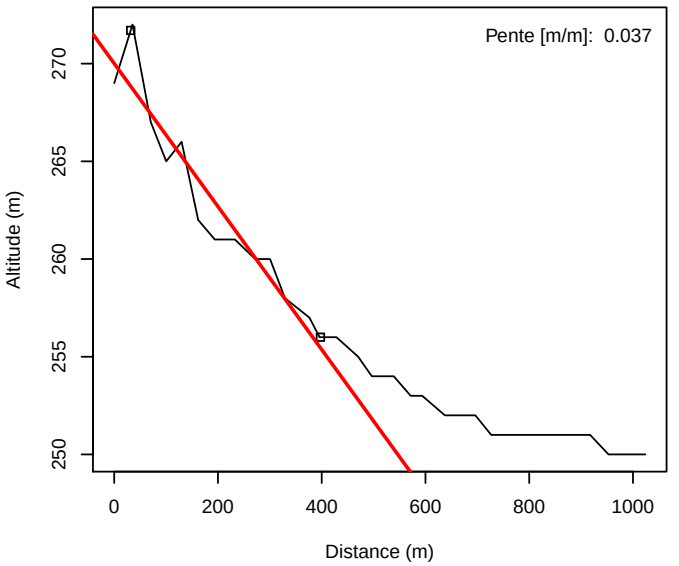
Torrent:ROTI
Commune: LE CHEYLAS (38)
ID: AS5



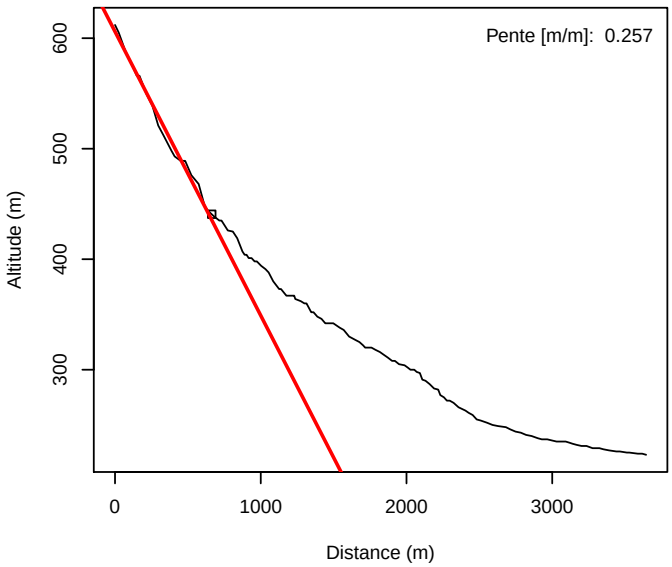
Torrent:CHAVANNES
Commune: GONCELIN (38)
ID: AS6



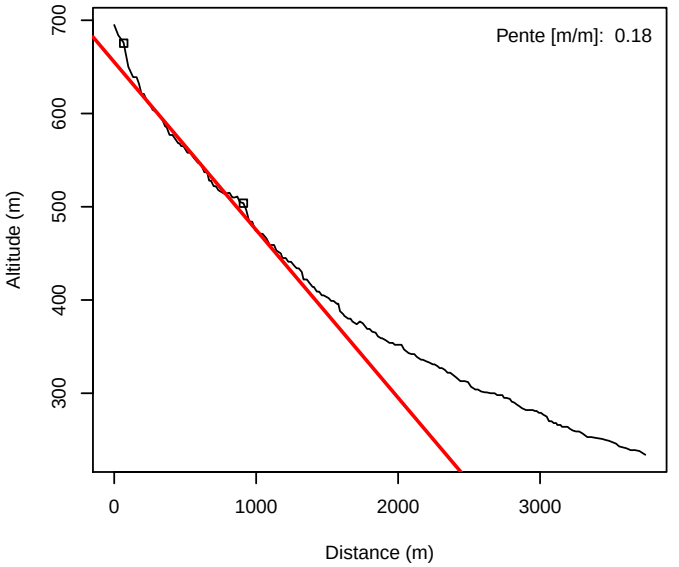
Torrent:RUISSEAU DE LA PERRIERE
Commune: PONTCHARRA (38)
ID: AS7



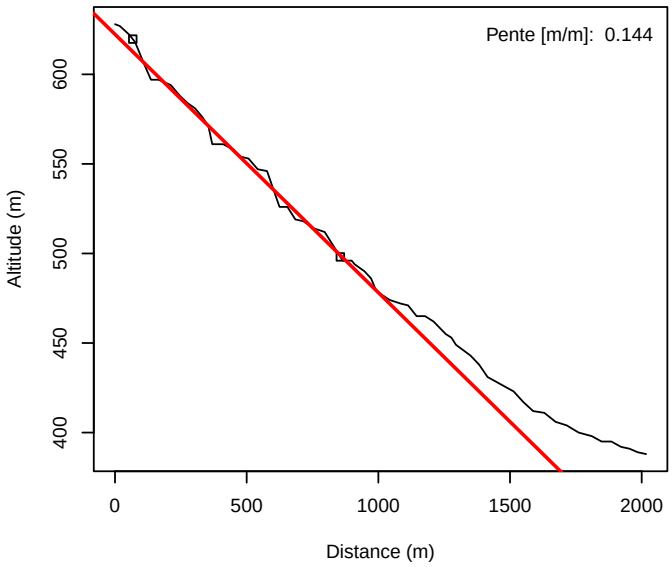
Torrent:GAMOND
Commune: MEYLAN (38)
ID: AS8



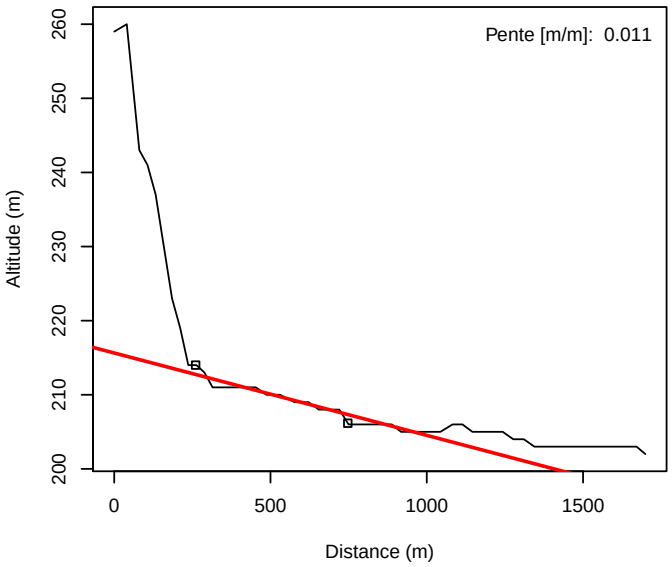
Torrent:CORBONNE
Commune: SAINT ISMIER (38)
ID: AS9



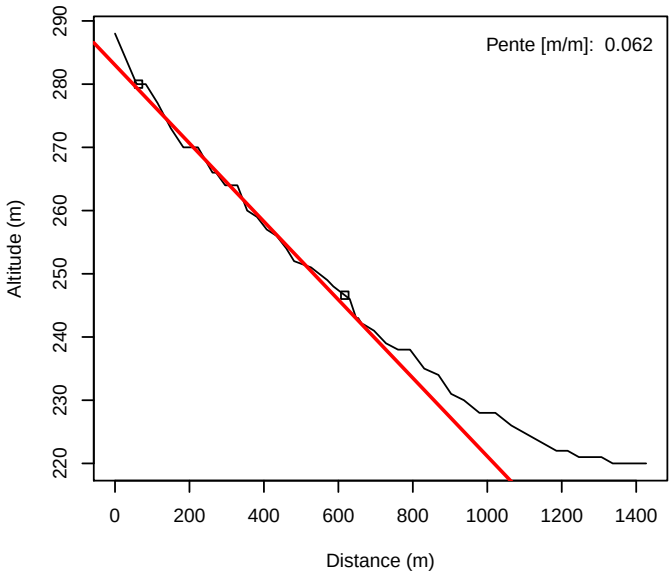
Torrent:PREMOL
Commune: VAULNAVEYS−LE−HAUT (38)
ID: COM1



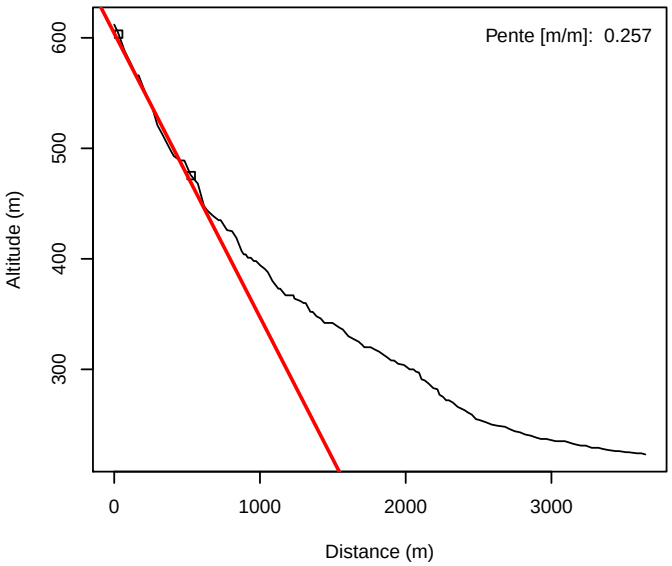
Torrent:FURON
Commune: SASSENAGE (38)
ID: COM2



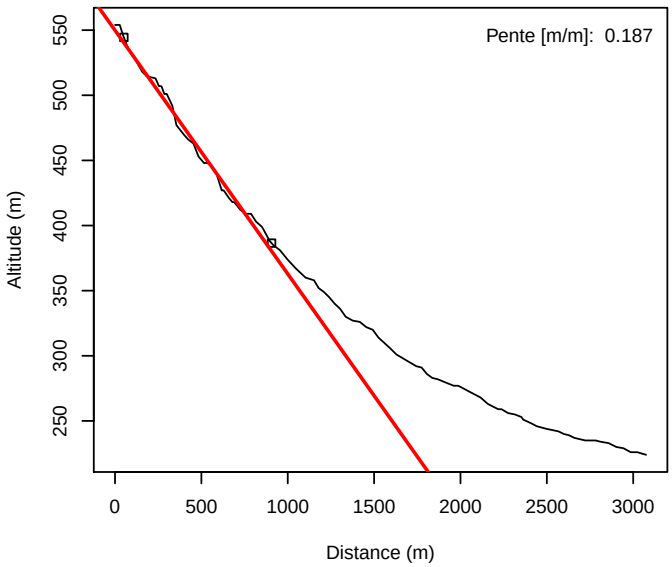
Torrent:LE CHARMEYRAN
Commune: LA TRONCHE (38)
ID: COM3



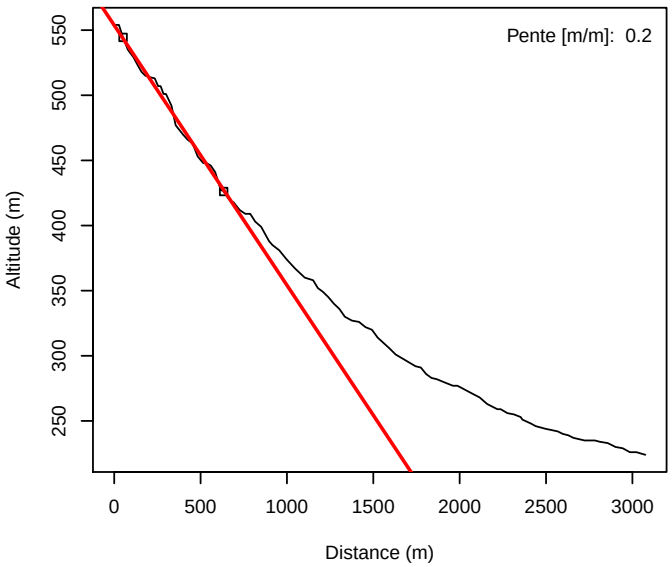
Torrent:TORRENT DE GAMOND (BIZENON I)
Commune: MEYLAN (38)
ID: ID105



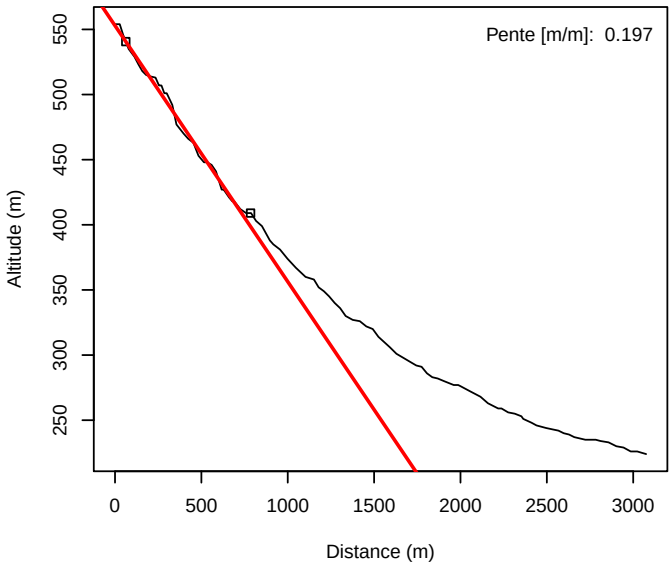
Torrent:TORRENT DE GAMOND (BIZENON II)
Commune: MEYLAN (38)
ID: ID106



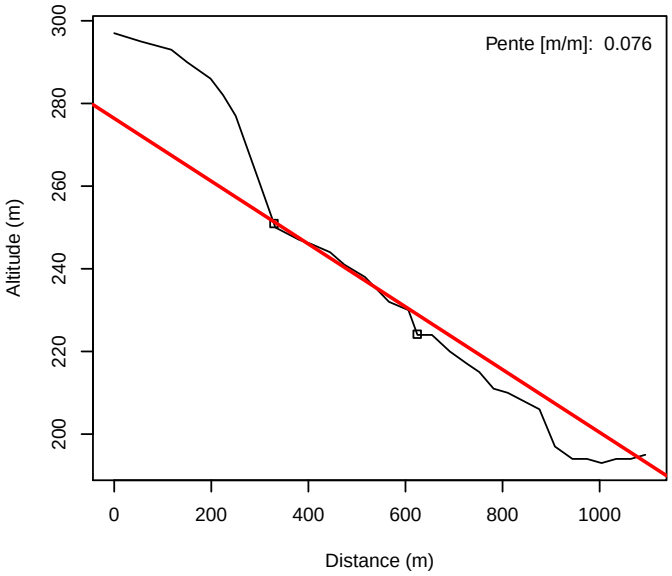
Torrent:TORRENT DE GAMOND (BIZENON III)
Commune: MEYLAN (38)
ID: ID107



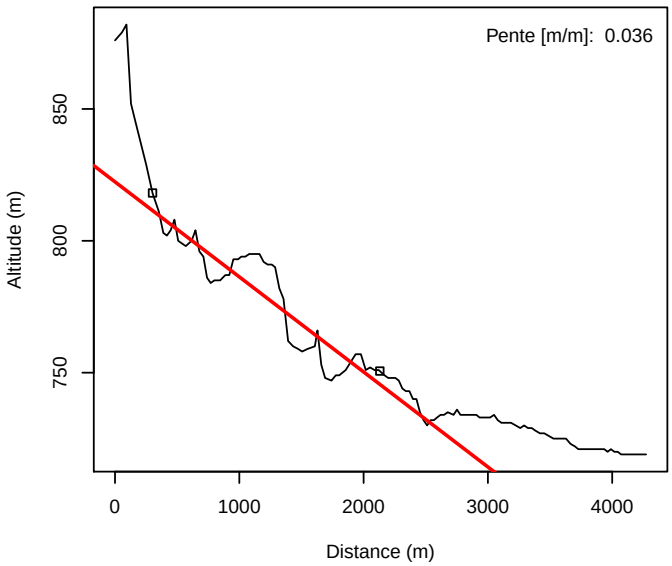
Torrent:TORRENT DE LA RUINE
Commune: MEYLAN (38)
ID: ID109



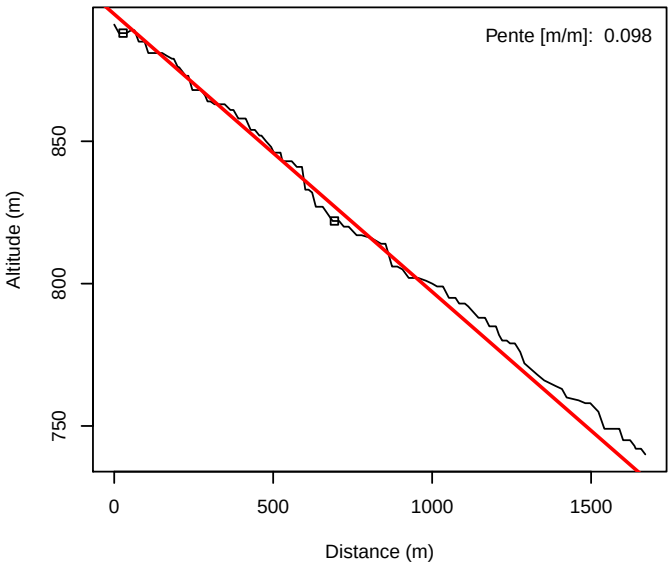
Torrent:EYRARD
Commune: NOYAREY (37)
ID: ID122



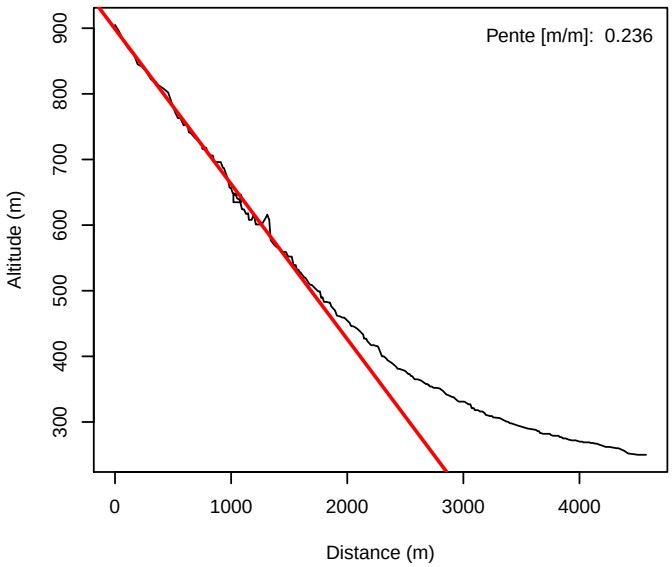
Torrent:TORRENT DE LA LIGNARRE
Commune: OULLES (38)
ID: ID123



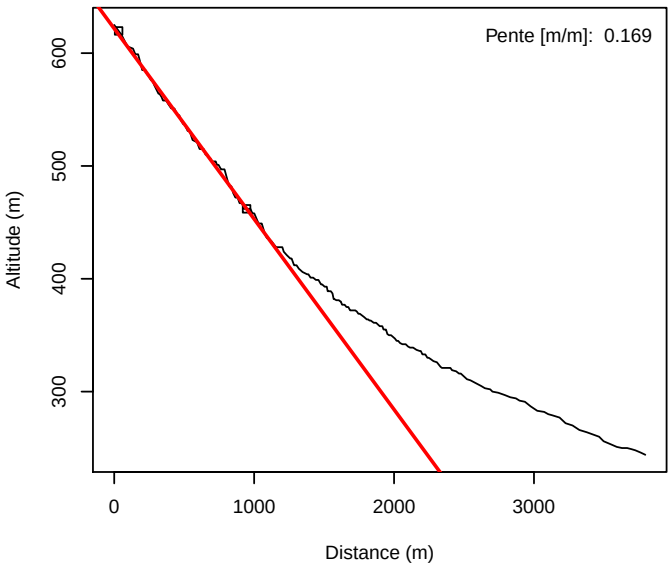
Torrent:LE RIFFOL
Commune: ROISSARD (38)
ID: ID131



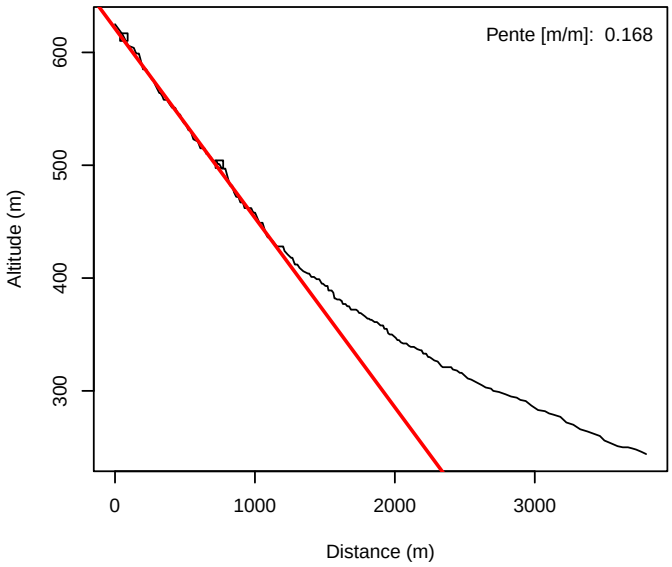
Torrent:TORRENT DU BRESSON
Commune: STE−MARIE−DU−MONT (38)
ID: ID140



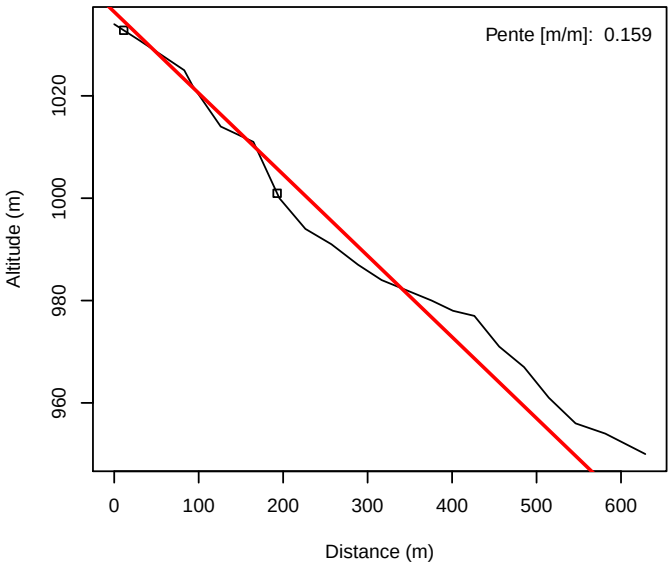
Torrent:RUISSEAU DE DARGUIL
Commune: ST−ISMIER (38)
ID: ID147



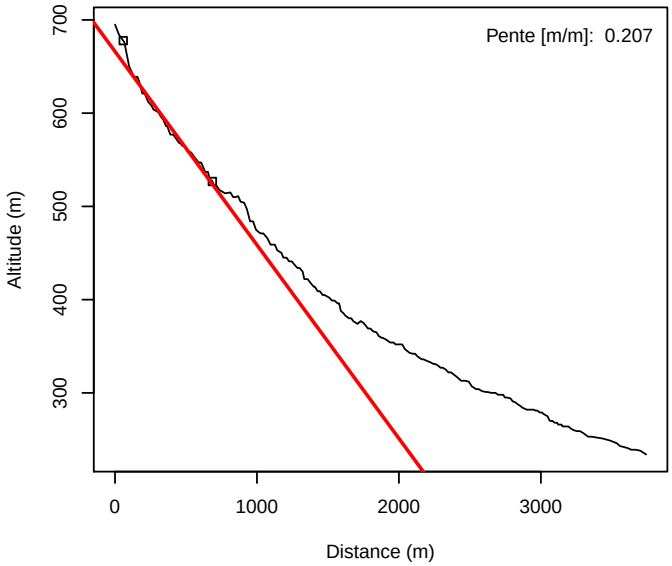
Torrent:RUISSEAU DE DARGUIL (LES ECORCHIERS)
Commune: ST−ISMIER (38)
ID: ID148



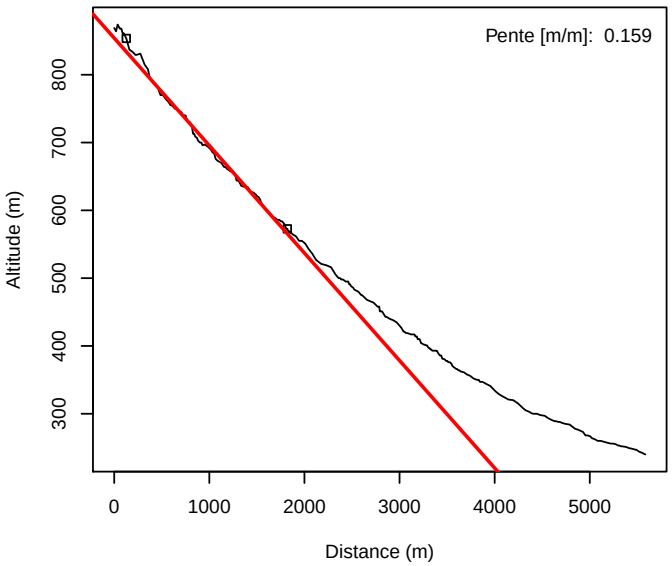
Torrent:RAVIN DE LA RUINE
Commune: LA ROCHE−DE−RAME (5)
ID: ID15



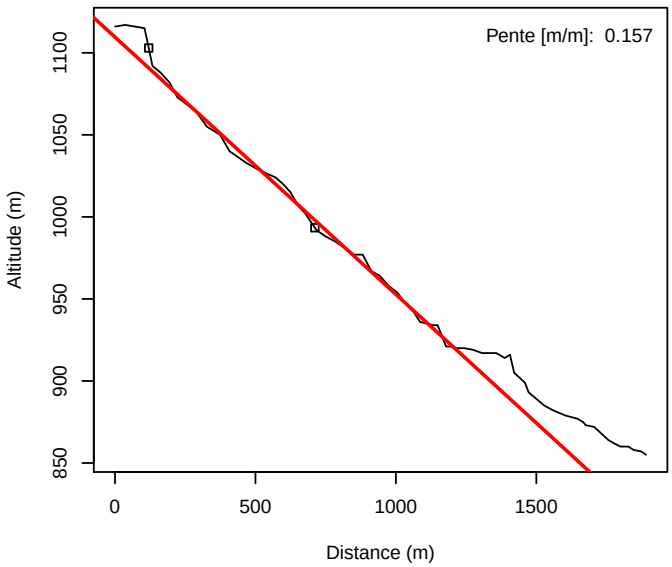
Torrent:TORRENT DE CORBONNE
Commune: ST−ISMIER (38)
ID: ID150



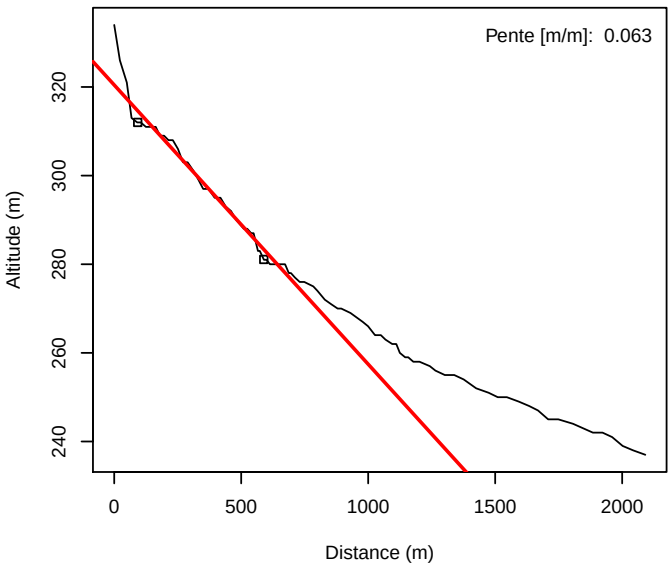
Torrent:TORRENT DU MANIVAL
Commune: ST−ISMIER (38)
ID: ID151



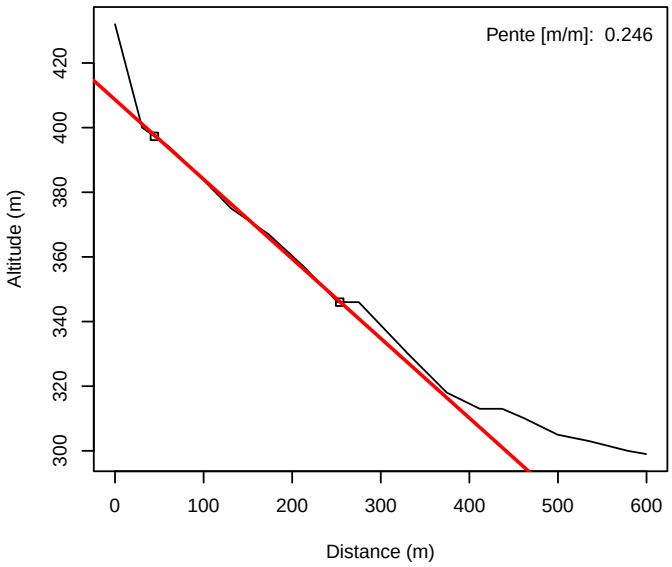
Torrent:RUISSEAU DE L'ARCHAT
Commune: ST−MAURICE−EN−TRIEVES (38)
ID: ID164



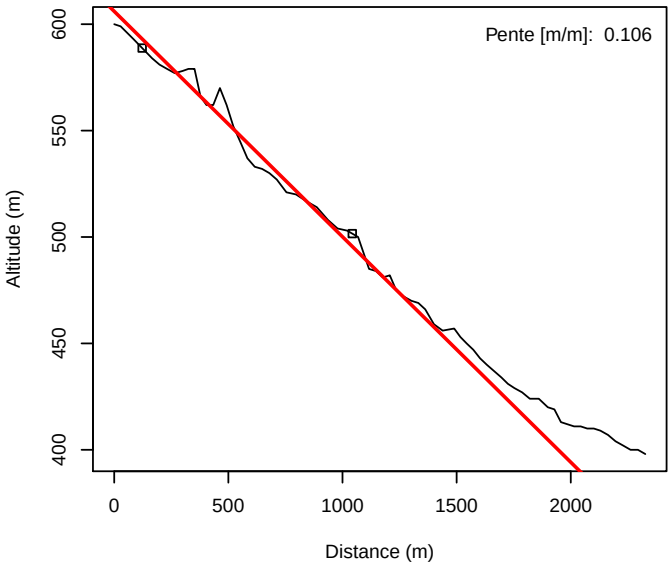
Torrent:RUISSEAU DE GORGETTE (1)
Commune: ST−PANCRASSE (38)
ID: ID171



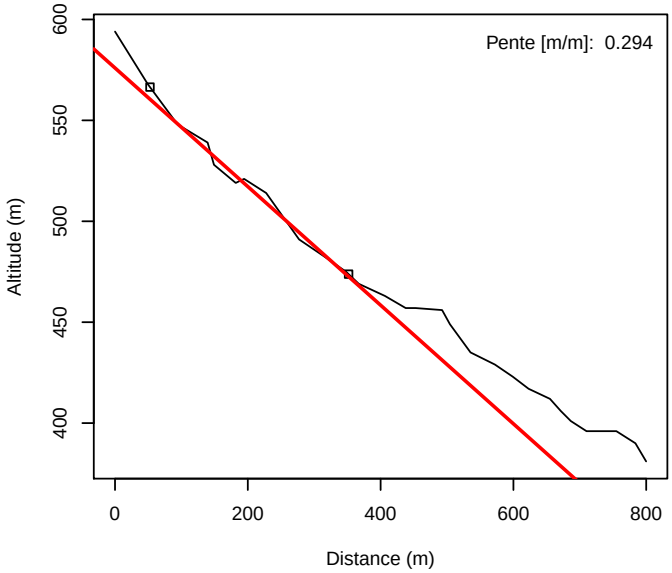
Torrent:LE RIONDET
Commune: ST−PAUL−DE−VARCES (38)
ID: ID174



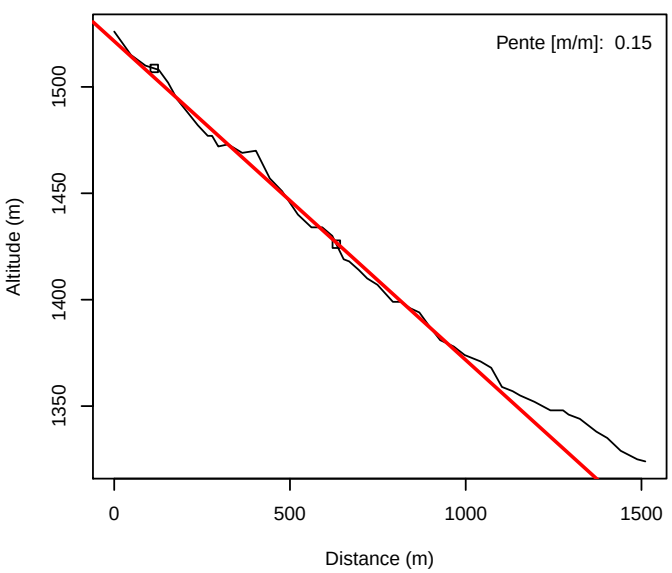
Torrent:LE LAVANCHON
Commune: ST−PAUL−DE−VARCES (38)
ID: ID175



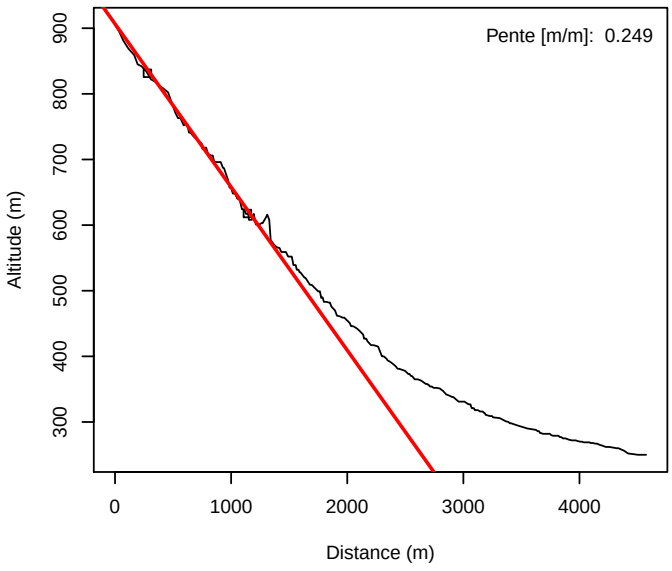
Torrent:TORRENT DE LA LAMPE
Commune: ST−PAUL−DE−VARCES (38)
ID: ID176



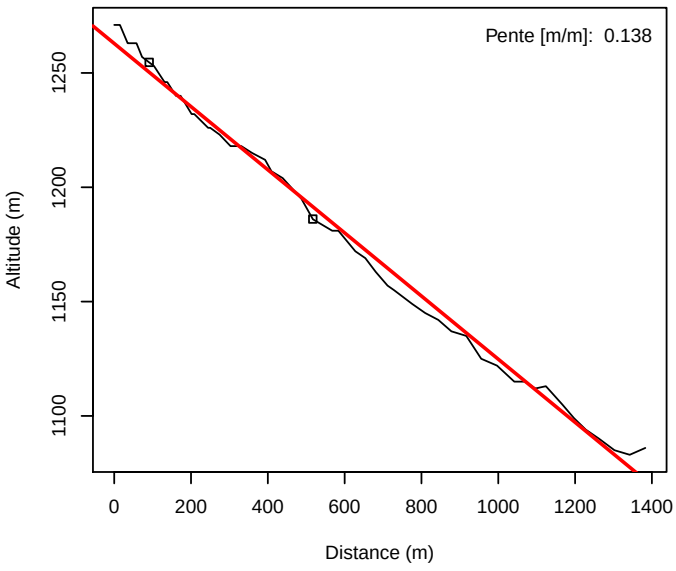
Torrent:LE VERDAREL
Commune: ST−CHAFFREY (5)
ID: ID18



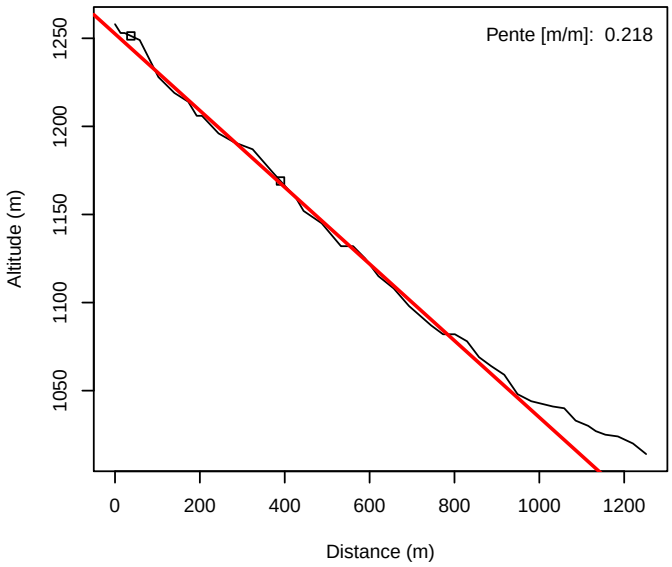
Torrent:TORRENT DU BRESSON
Commune: ST−VINCENT−DE−MERCUZE (38)
ID: ID180



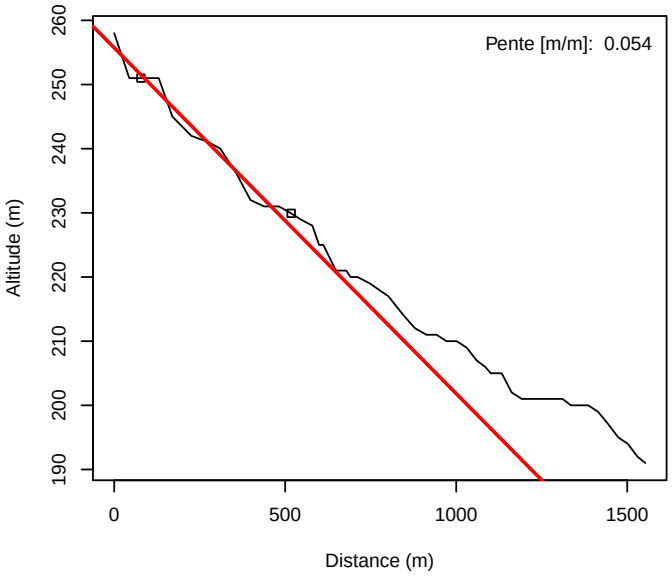
Torrent:L'EBRON
Commune: TREMINIS (38)
ID: ID185



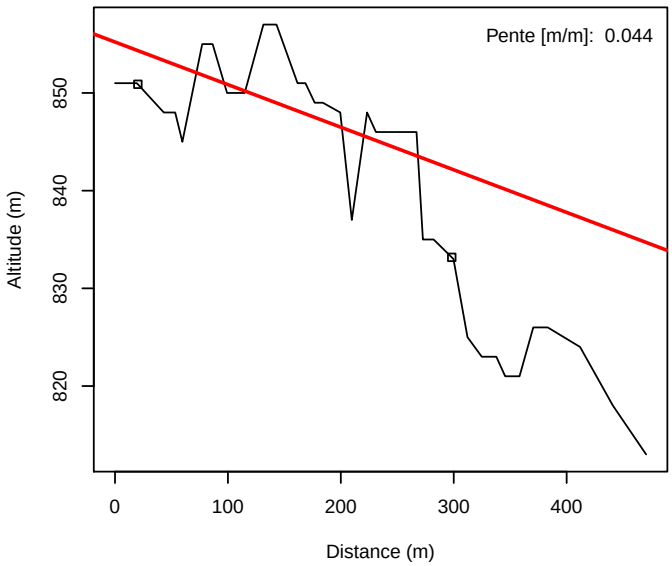
Torrent:LES SAGNES
Commune: TREMINIS (38)
ID: ID186



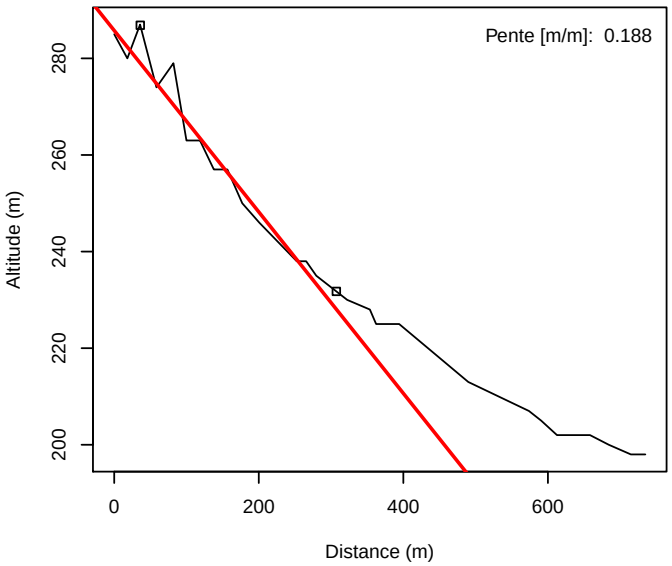
Torrent:LA ROIZE
Commune: VOREPPE (38)
ID: ID199



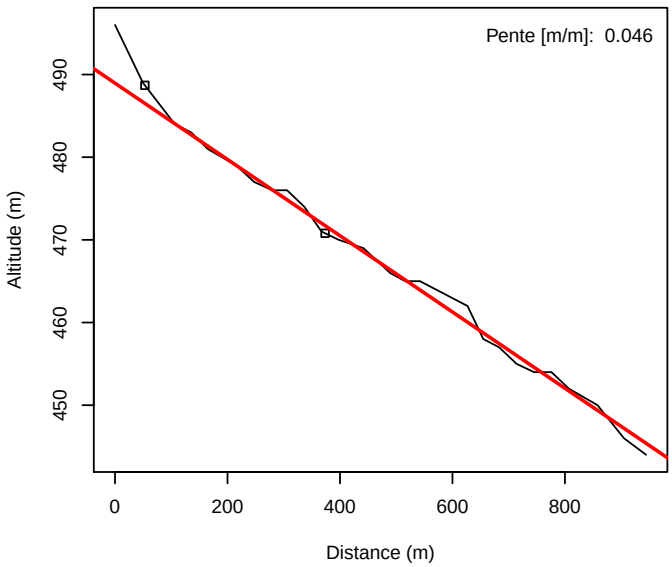
Torrent:TORRENT DE BONSECOURS
Commune: VENTAVON (5)
ID: ID20



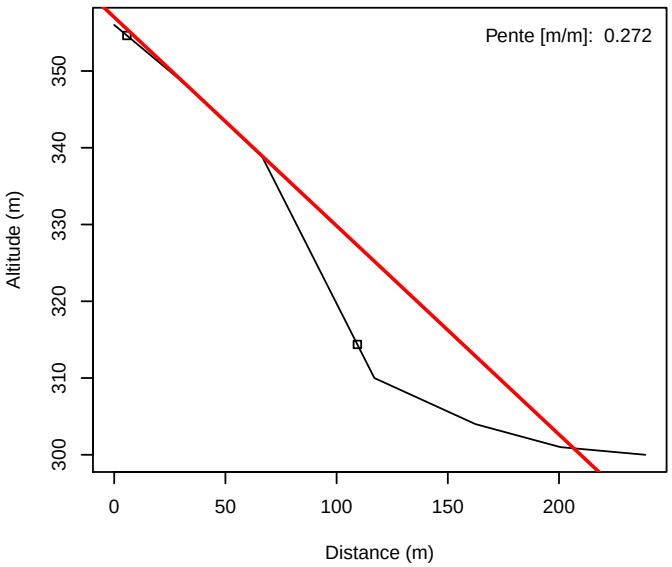
Torrent:MALSOUCHE
Commune: VOREPPE (38)
ID: ID200



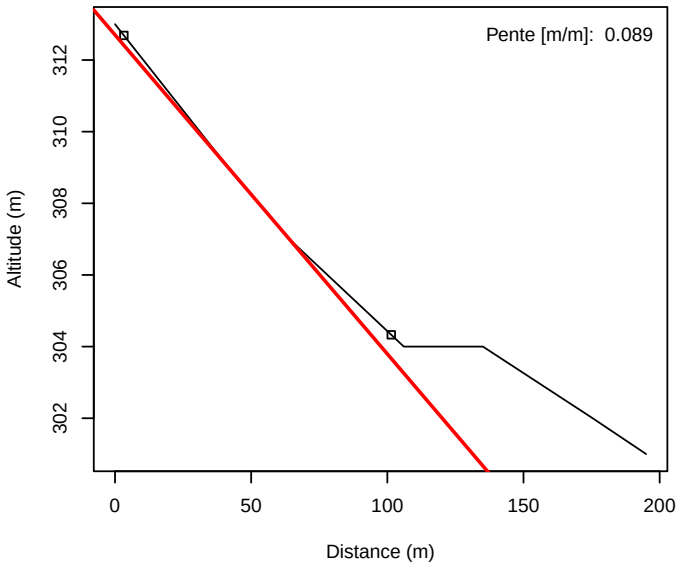
Torrent:LE MERDEREL
Commune: AIGUEBLANCHE (73)
ID: ID201



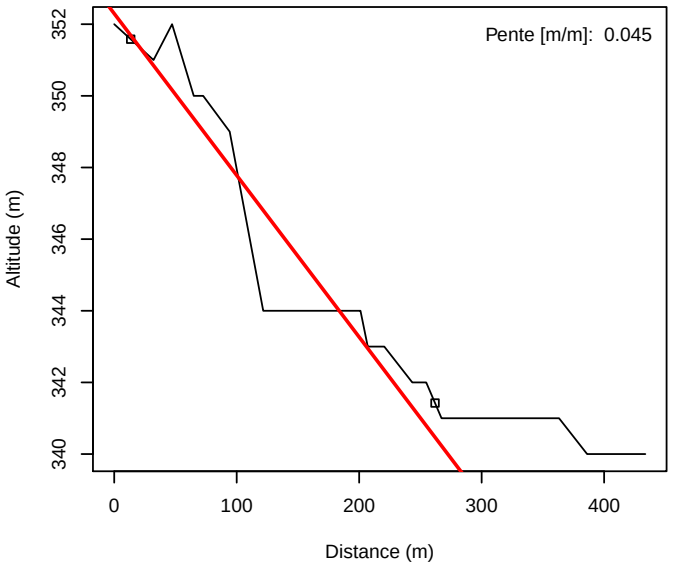
Torrent:LE CRETET
Commune: AITON (73)
ID: ID202



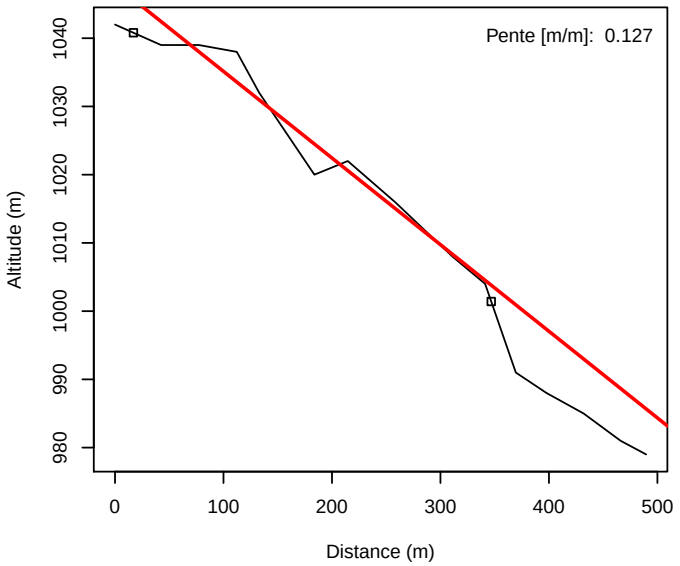
Torrent:RUISSEAU DU GROS CHENE
Commune: AITON (73)
ID: ID204



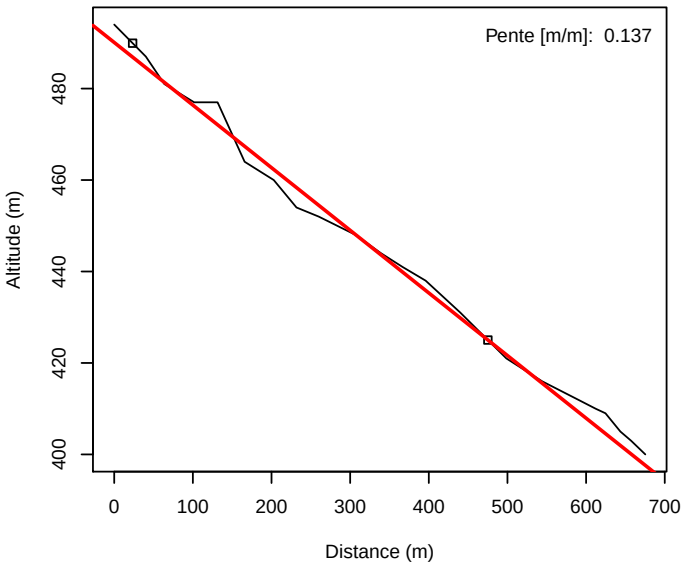
Torrent:LE NANT POTTIER
Commune: ALBERTVILLE (73)
ID: ID205



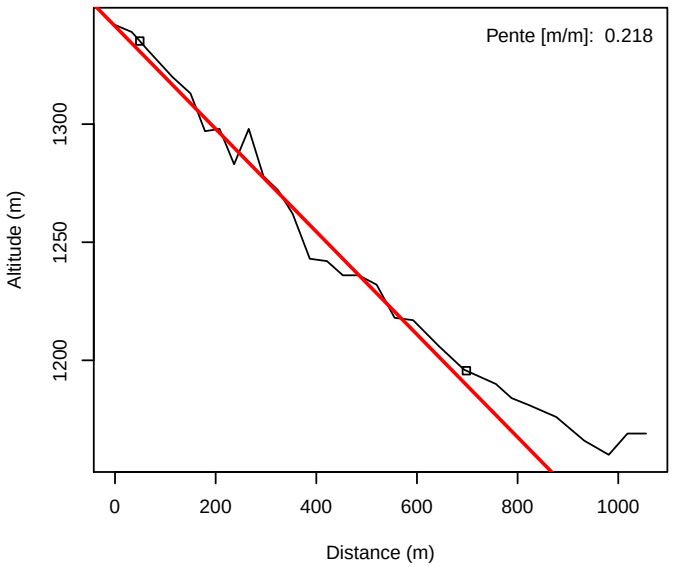
Torrent:RUISSEAU DES CARROZ
Commune: BEAUFORT (73)
ID: ID209



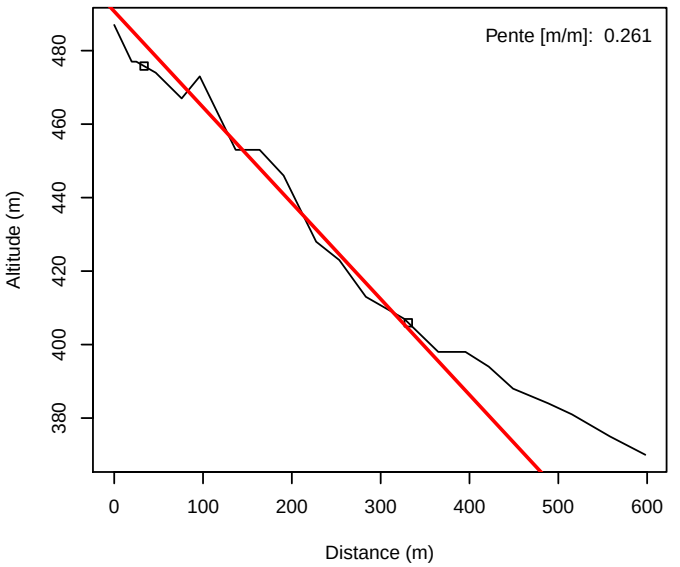
Torrent:LA GRUVAZ
Commune: CEVINS (73)
ID: ID217



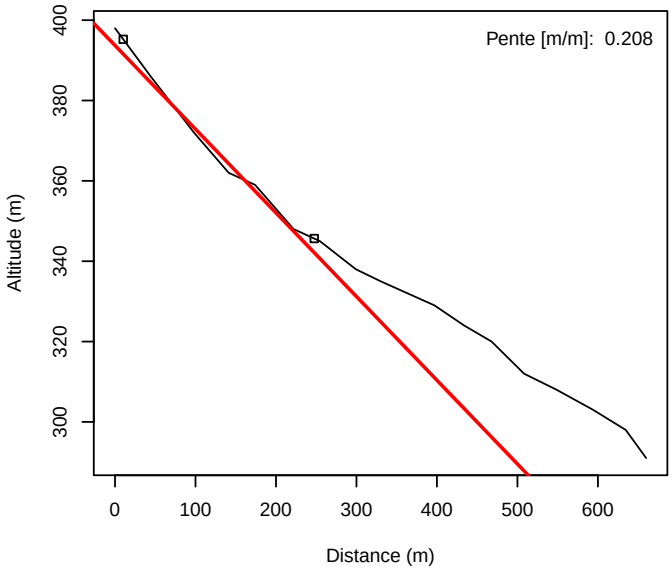
Torrent:LE RECLAZ
Commune: CHAMPAGNY EN VANOISE (73)
ID: ID219



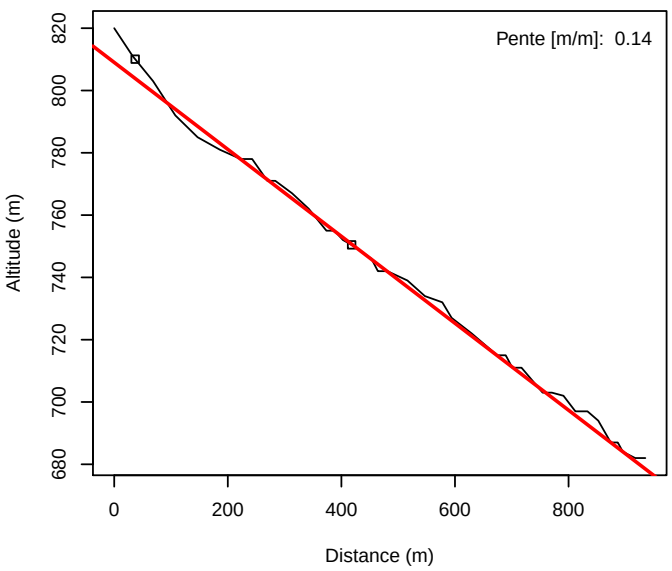
Torrent:RUISSEAU DES MOULINS (1)
Commune: EPIERRE (73)
ID: ID222



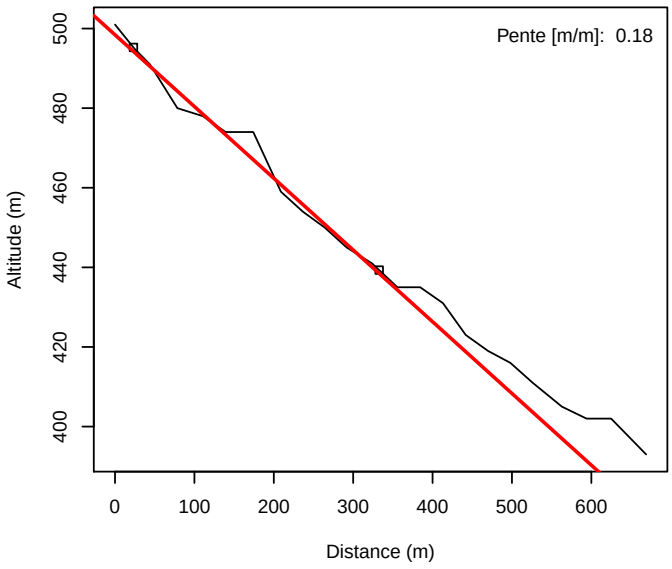
Torrent:RUISSEAU DE CRUET
Commune: FRETERIVE (73)
ID: ID225



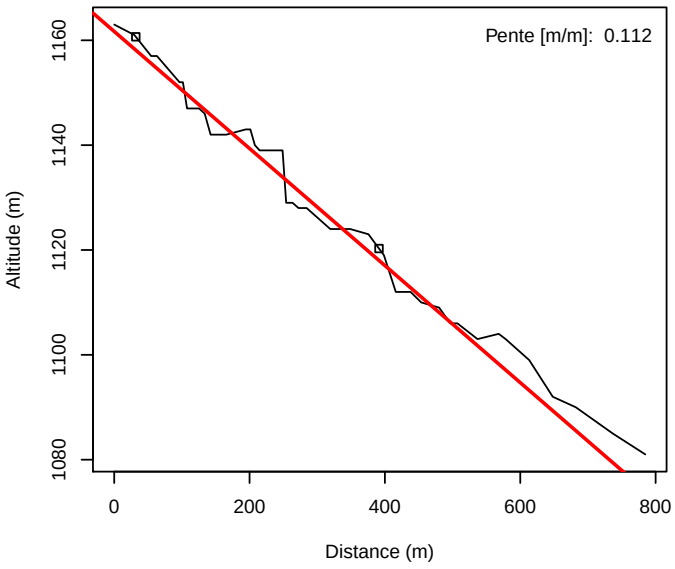
Torrent:RUISSEAU DE MÂCOT
Commune: MÂCOT−LA−PLAGNE (73)
ID: ID237



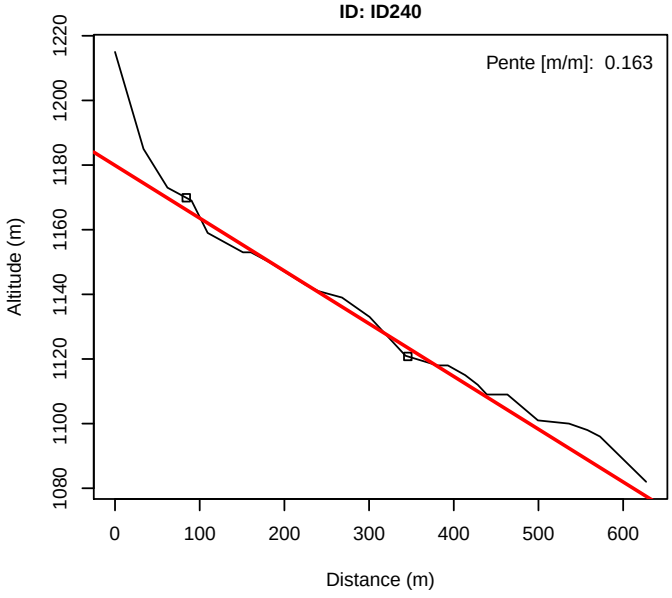
Torrent:LE REVERS
Commune: MERY (73)
ID: ID238



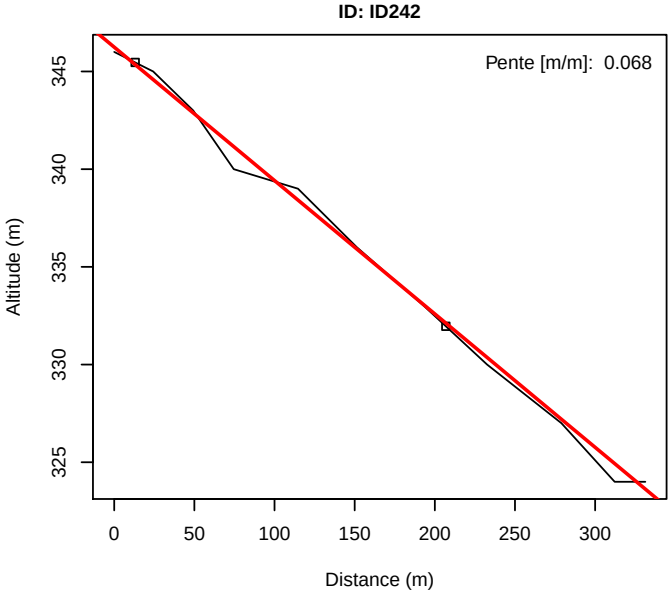
Torrent:ST−ANTOINE
Commune: MODANE (73)
ID: ID239



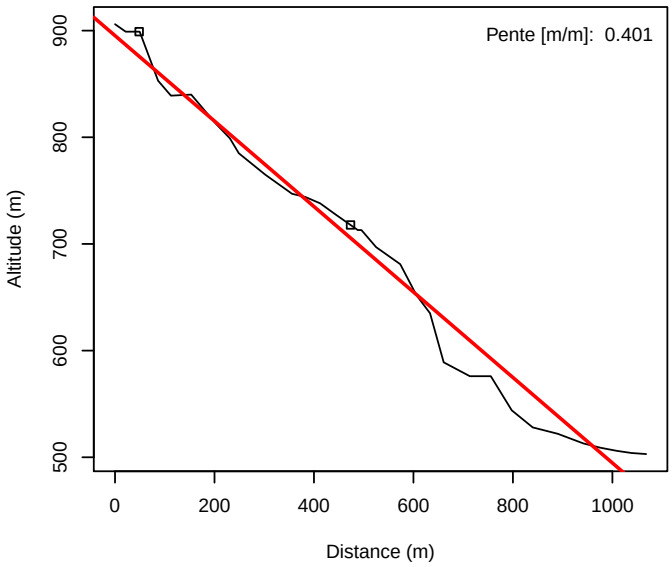
Torrent:RUISSEAU DU RIEU−ROUX
Commune: MODANE (73)
ID: ID240



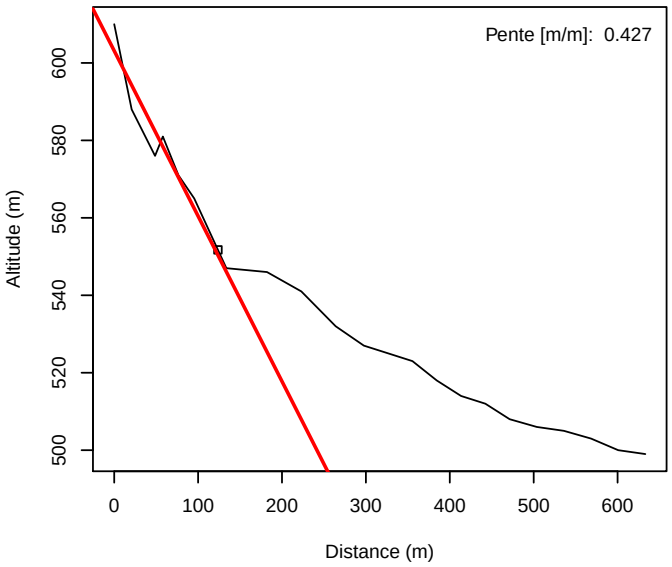
Torrent:TORRENT DE LA COMBAZ
Commune: NOTRE−DAME−DES−MILLIERES (73)
ID: ID242



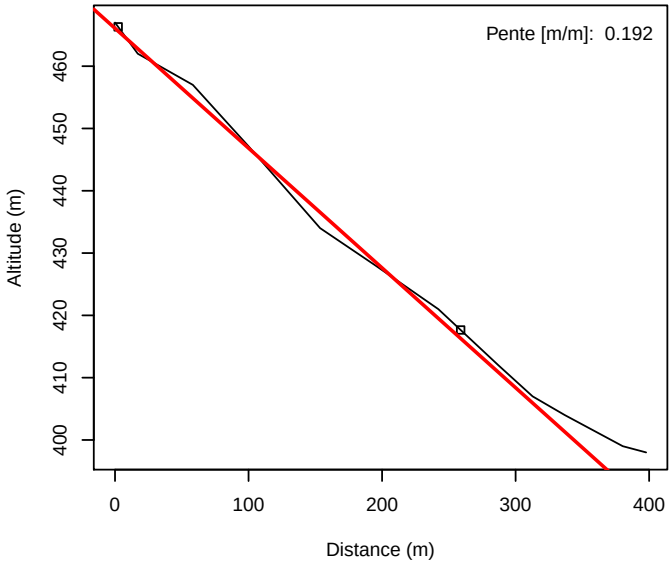
Torrent:LE CLINEL
Commune: PONTAMAFREY (73)
ID: ID245



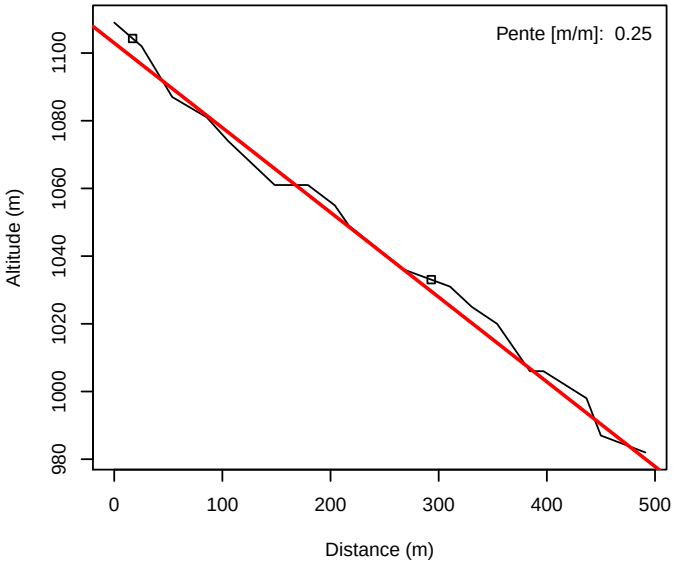
Torrent:LA RAVOIRE
Commune: PONTAMAFREY (73)
ID: ID246



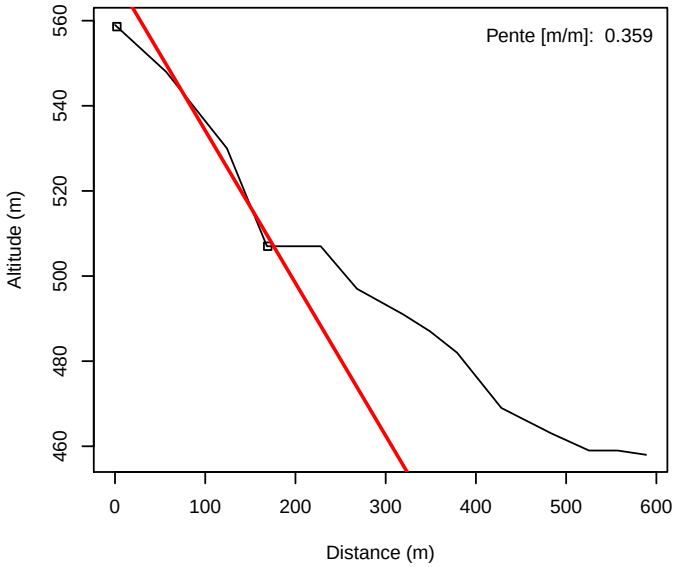
Torrent:LE NANT CLEMENT
Commune: ROGNAIX (73)
ID: ID247



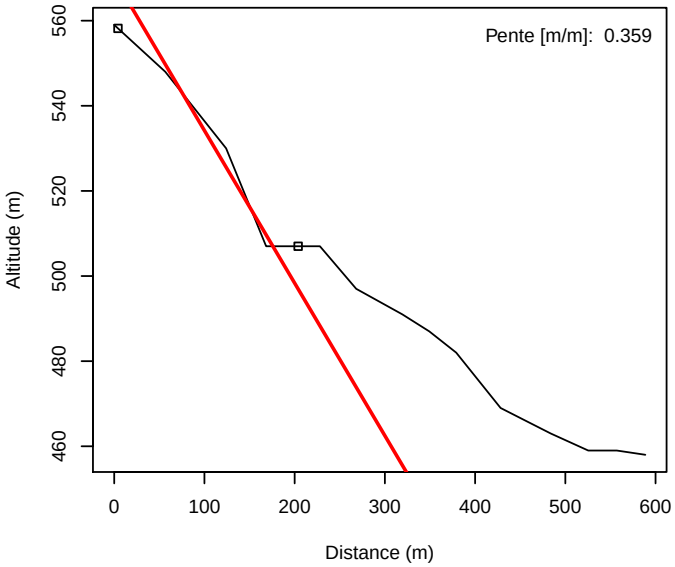
Torrent:TORRENT DU RIOU SEC
Commune: L'ARGENTIERE−LA BESSEE ; SAINT−MARTIN−DE−QUEYRIERES
ID: ID25



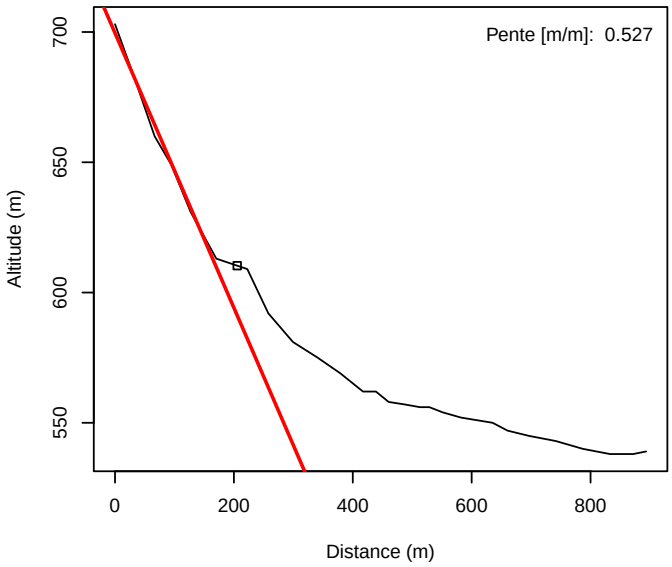
Torrent:LE NANTUEL (AMONT)
Commune: SAINT−AVRE (73)
ID: ID250



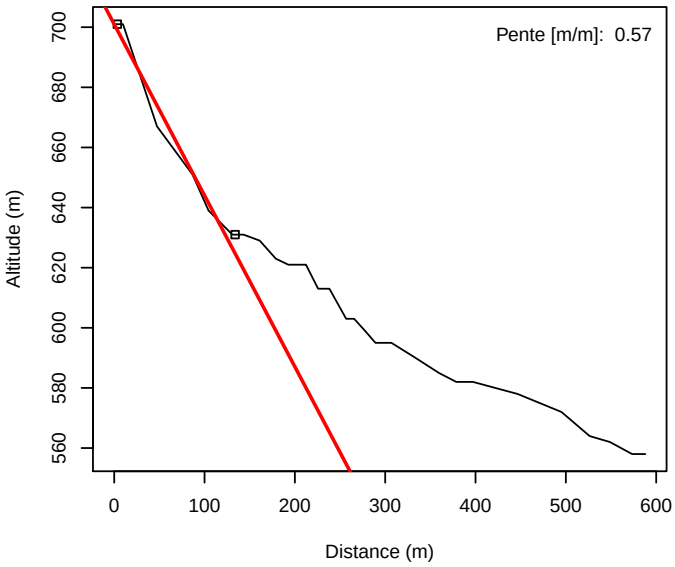
Torrent:LE NANTUEL (AVAL)
Commune: SAINT−AVRE (73)
ID: ID251



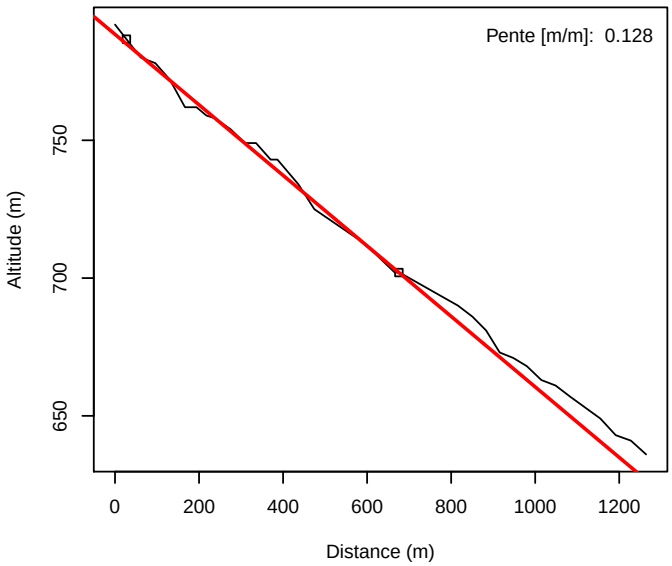
Torrent:COMBE PAILLARDE (AMONT)
Commune: SAINT−JEAN−DE−MAURIENNE (73)
ID: ID255



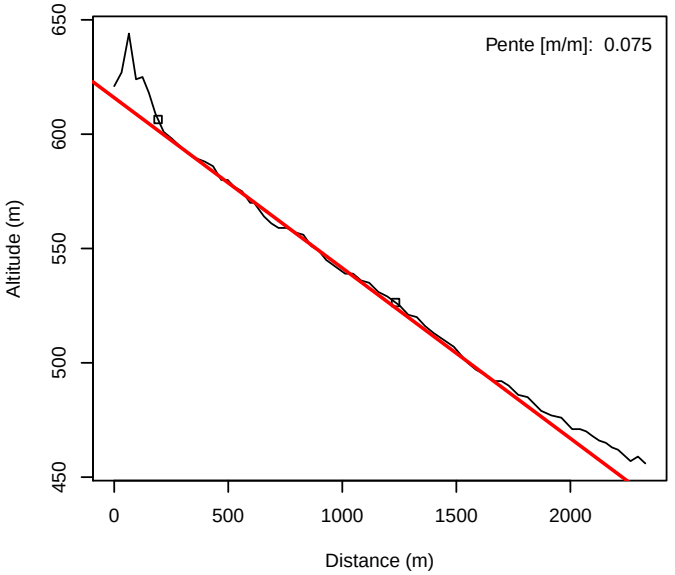
Torrent:COMBE VARCIN (ET COMBE CHENAL)
Commune: SAINT−JEAN−DE−MAURIENNE (73)
ID: ID257



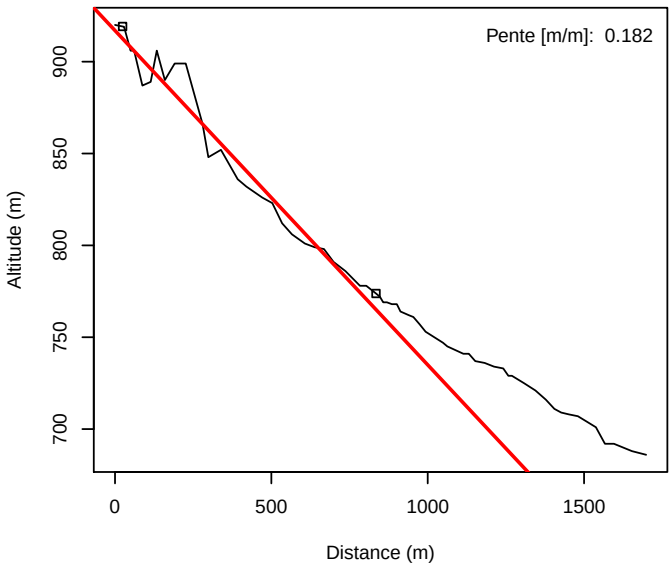
Torrent:CLARET
Commune: SAINT−JULIEN−DE−MONTDENIS (73)
ID: ID258



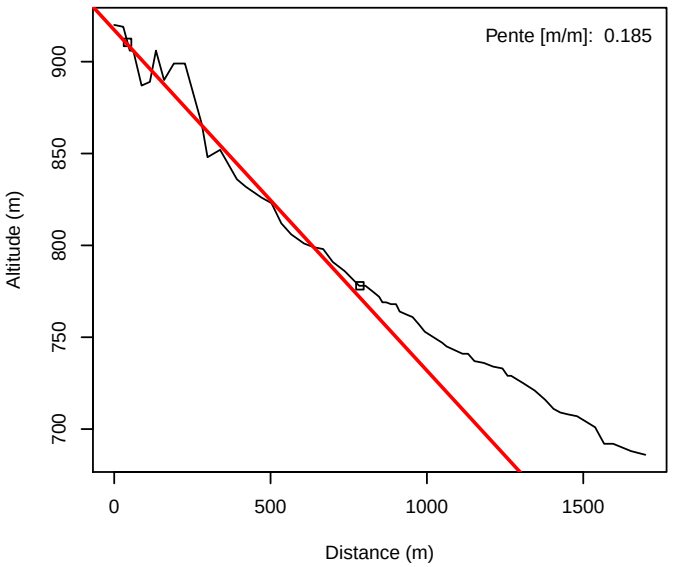
Torrent:LE MERDEREL
Commune: SAINT−MARTIN−LA−CHAMBRE (73)
ID: ID260



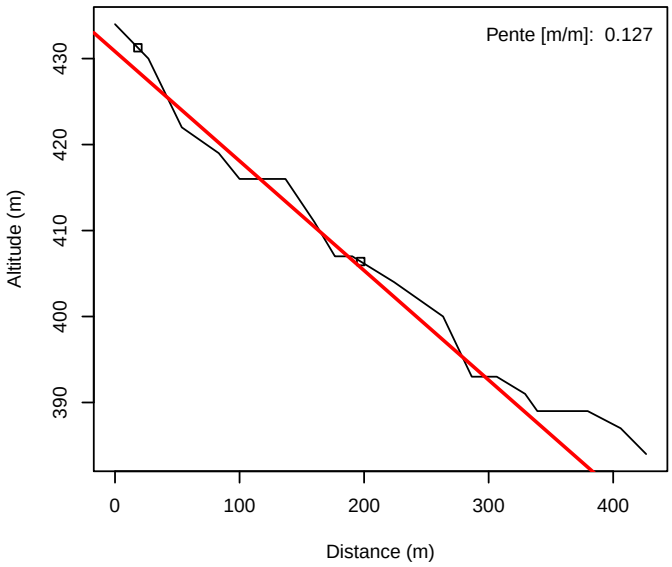
Torrent:TORRENT DU ST−BERNARD OU ST−MARTIN (AMONT)
Commune: SAINT−MARTIN−DE−LA−PORTE (73)
ID: ID261



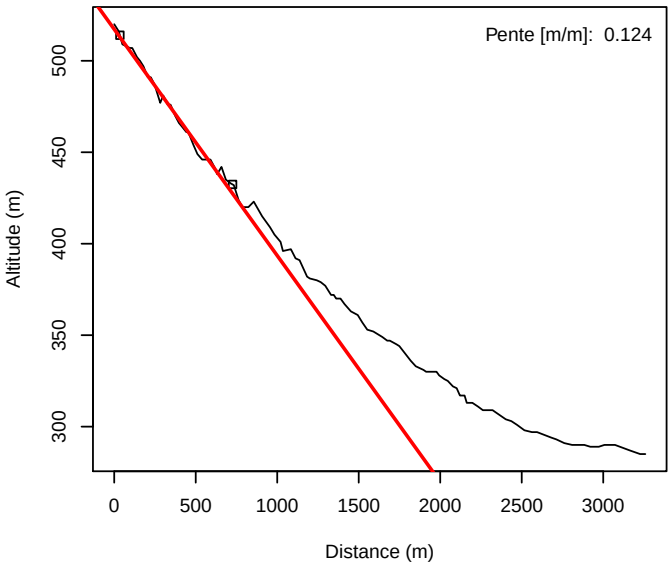
Torrent:TORRENT DU ST−BERNARD OU ST−MARTIN (AVAL)
Commune: SAINT−MARTIN−DE−LA−PORTE (73)
ID: ID262



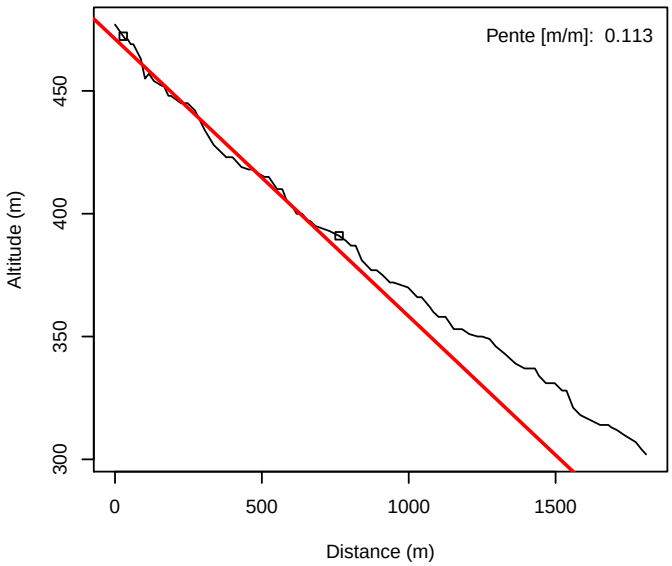
Torrent:RUISSEAU DES MOULINS
Commune: SAINT−PAUL−SUR−ISERE (73)
ID: ID264



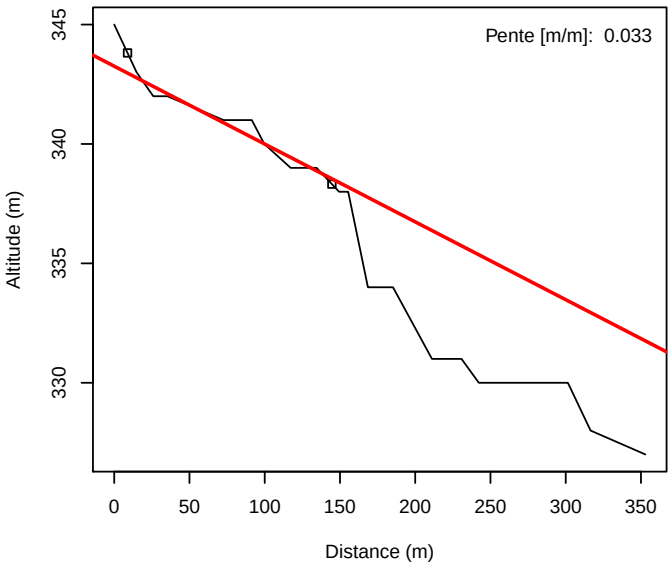
Torrent:LE GARGOT
Commune: SAINT−PIERRE−D'ALBIGNY (73)
ID: ID265



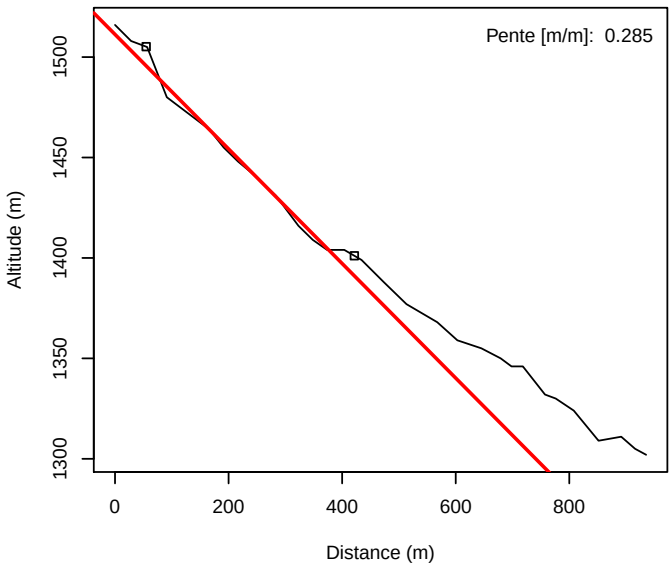
Torrent:LE FAVASSET (AVAL)
Commune: SAINT−PIERRE−D'ALBIGNY (73)
ID: ID266



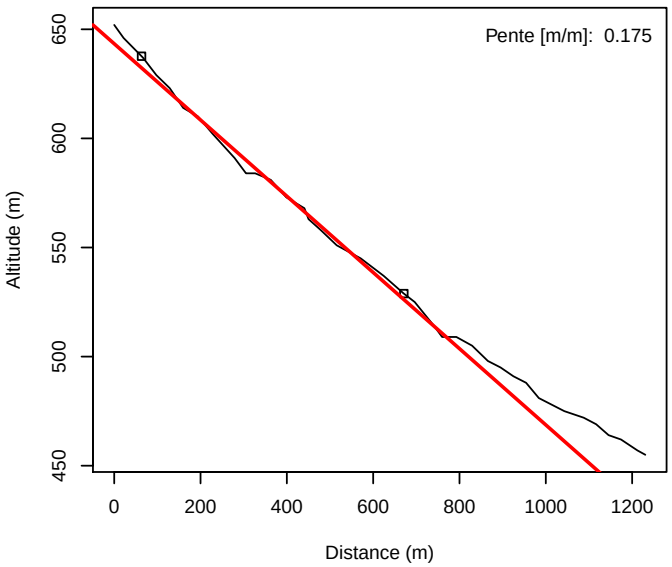
Torrent:LE NANT BRUYANT
Commune: SAINTE−HELENE−SUR−ISERE (73)
ID: ID268



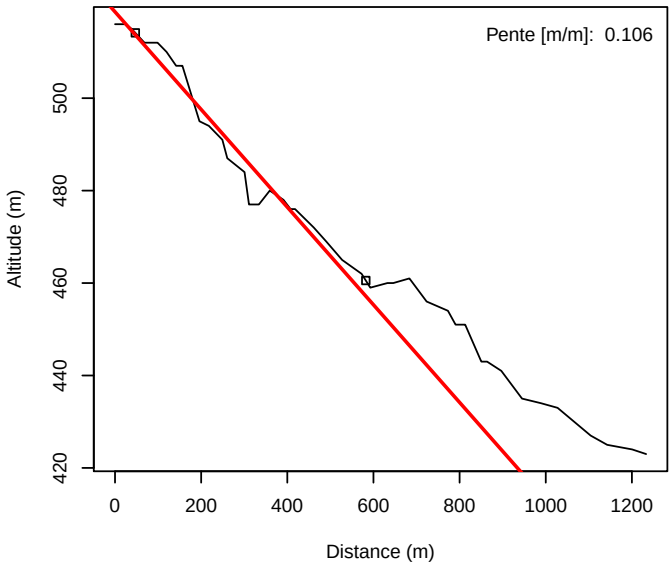
Torrent:TORRENT DU BEY OU RUISSEAU DE BANDY
Commune: TERMIGNON (73)
ID: ID272



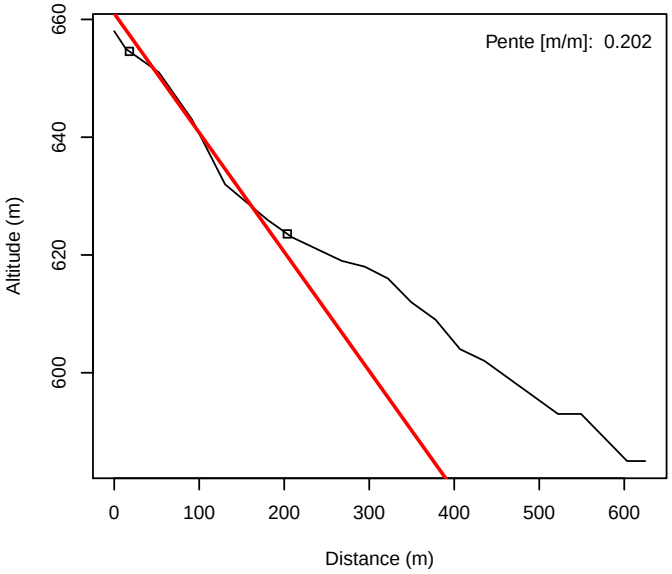
Torrent:LE NANT CROEX
Commune: UGINE (73)
ID: ID278



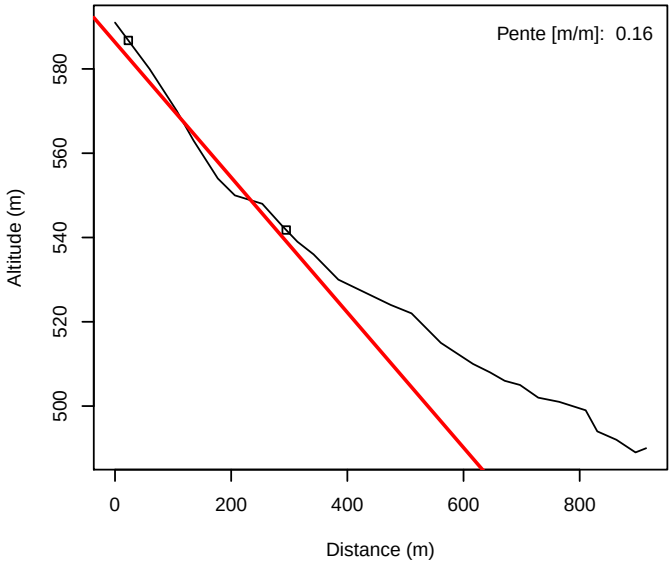
Torrent:LE NANT PUGIN
Commune: UGINE (73)
ID: ID279



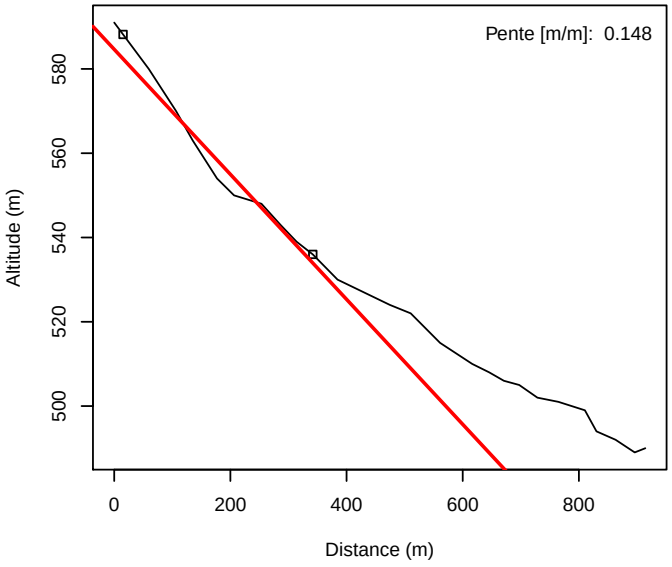
Torrent:LE RIEUBEL
Commune: VILLARGONDRAN (73)
ID: ID281



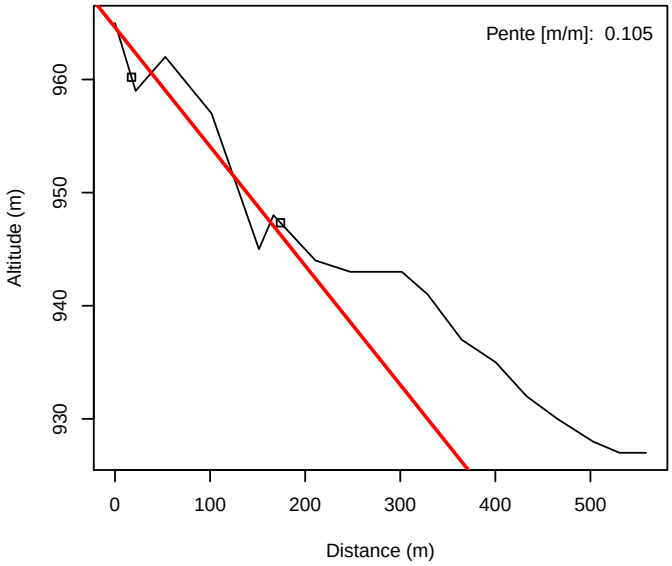
Torrent:LE PIEZAN (AMONT)
Commune: CONS−STE−COLOMBE (74)
ID: ID286



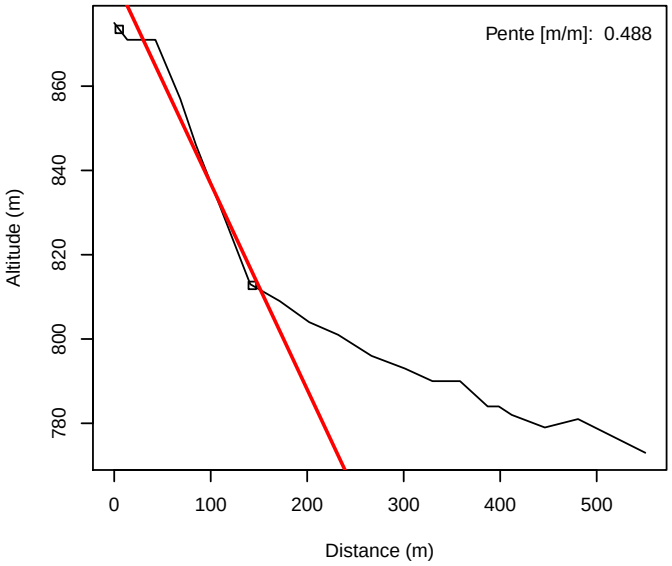
Torrent:LE PIEZAN (AVAL)
Commune: CONS−STE−COLOMBE (74)
ID: ID287



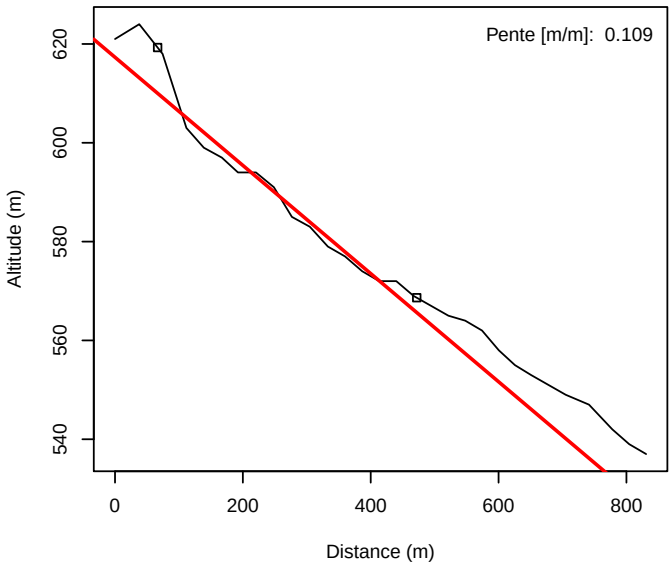
Torrent:LE CHINAILLON
Commune: LE GRAND−BORNAND (74)
ID: ID288



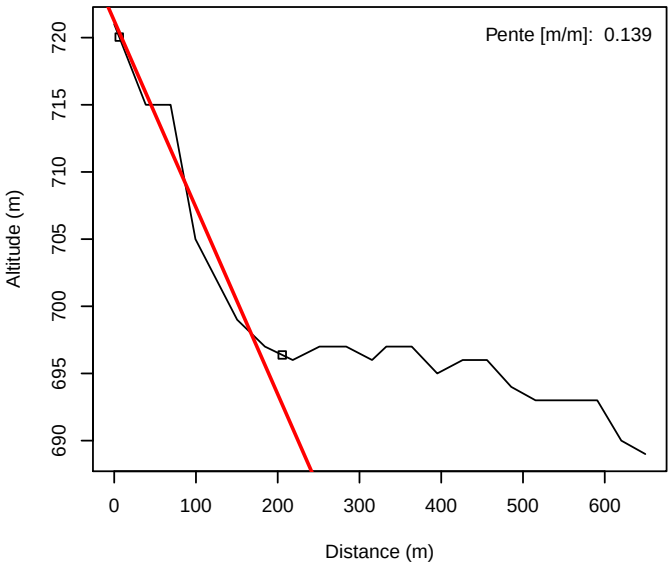
Torrent:LE NANT BORDON
Commune: PASSY (74)
ID: ID292



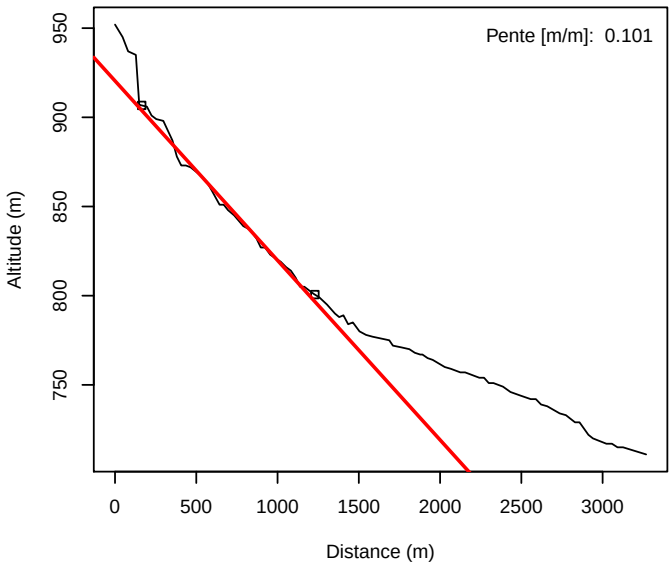
Torrent:TORRENT DE RENINGE
Commune: SALLANCHES (74)
ID: ID296



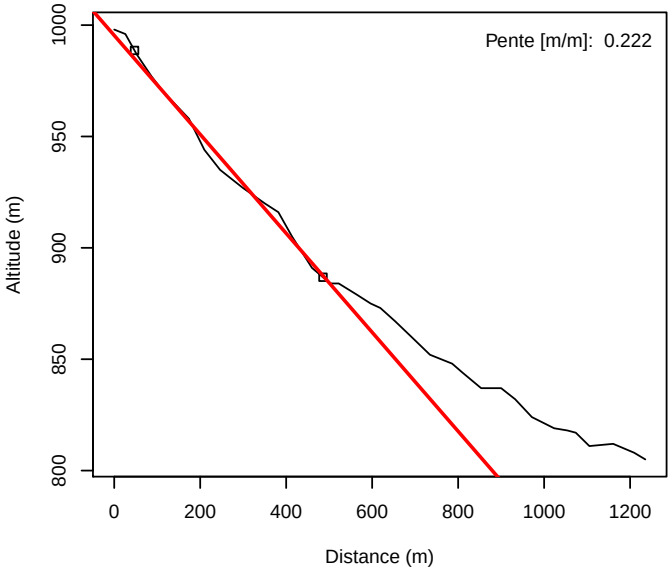
Torrent:RUISSEAU DE BEROUZE
Commune: SAMOËNS (74)
ID: ID299



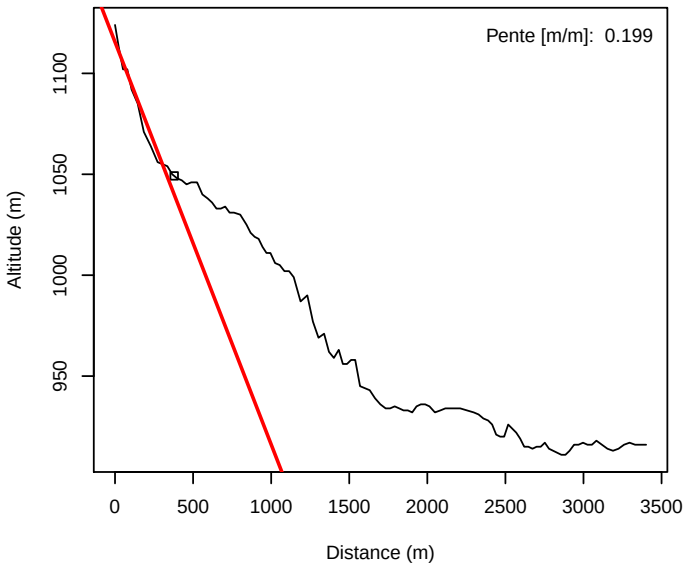
Torrent:LE CLEVIEUX
Commune: SAMOËNS (74)
ID: ID300



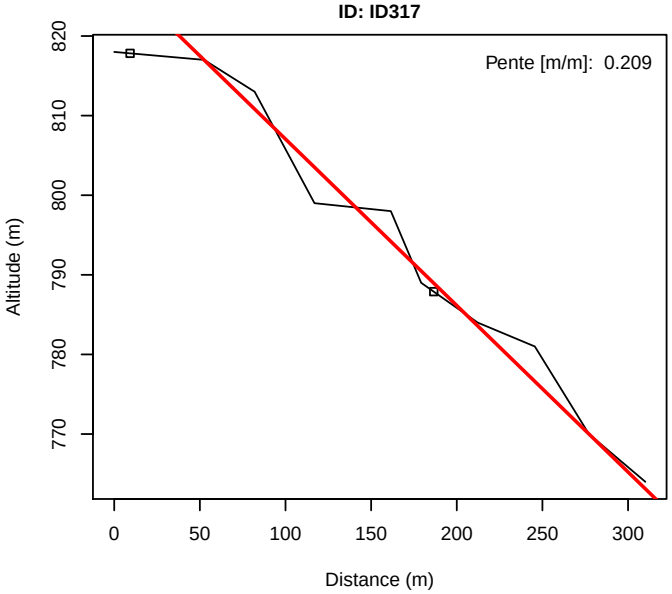
Torrent:NANT SEC
Commune: SIXT−FER−A−CHEVAL (74)
ID: ID305



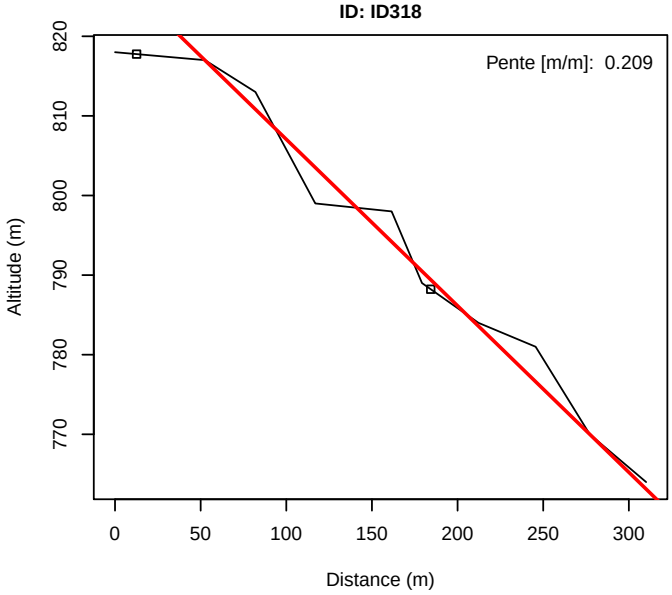
Torrent:TORRENT DE DORJON
Commune: MEGEVETTE (74)
ID: ID308



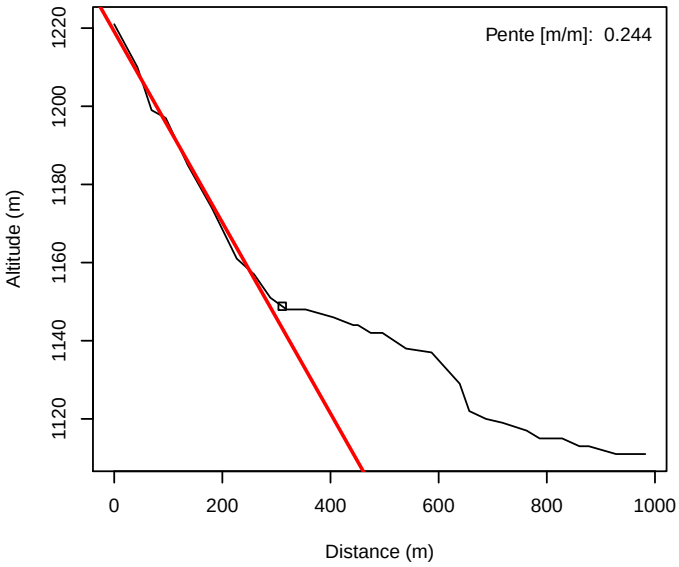
Torrent:TORRENT DU DARD (AMONT)
Commune: ST−GERVAIS−LES−BAINS (74)
ID: ID317



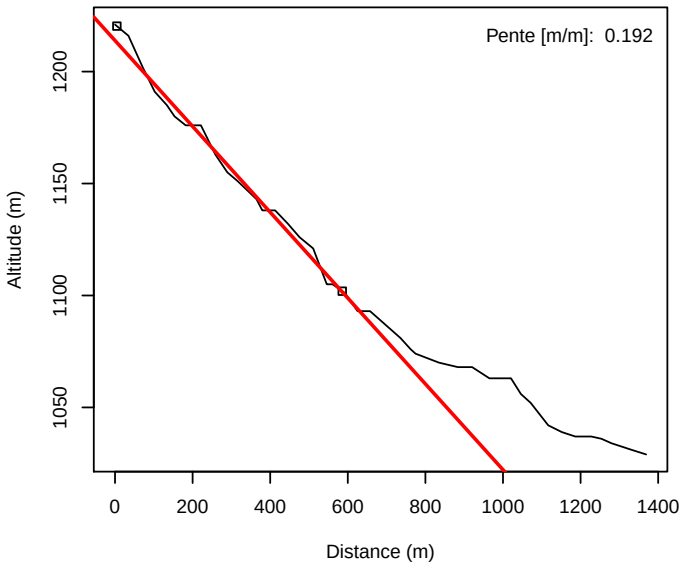
Torrent:TORRENT DU DARD (AVAL)
Commune: ST−GERVAIS−LES−BAINS (74)
ID: ID318



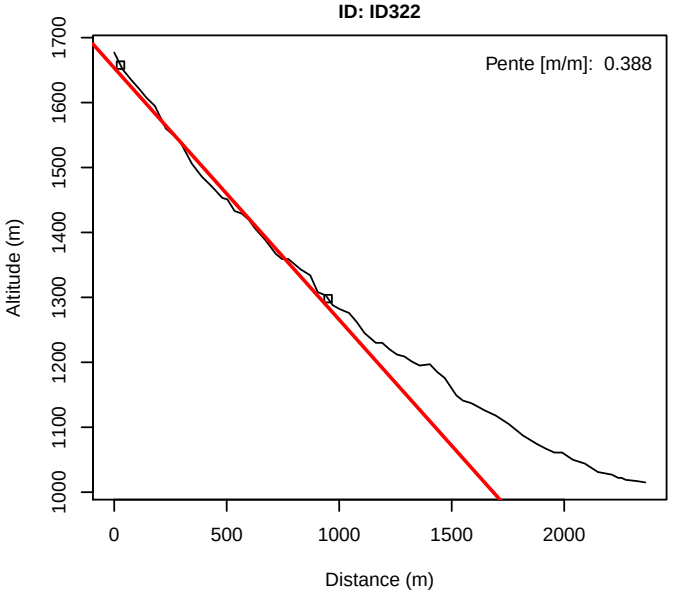
Torrent:ARVEYRON DE LA MER DE GLACE
Commune: CHAMONIX−MONT−BLANC (74)
ID: ID319



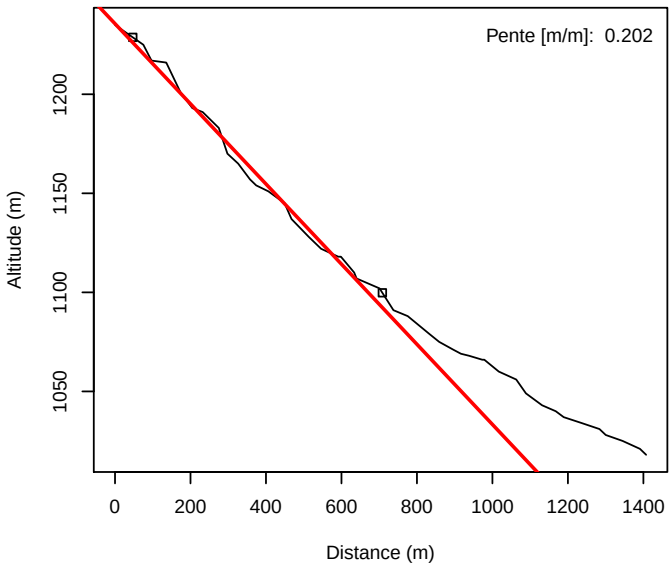
Torrent:LES FAVRANDS
Commune: CHAMONIX−MONT−BLANC (74)
ID: ID320



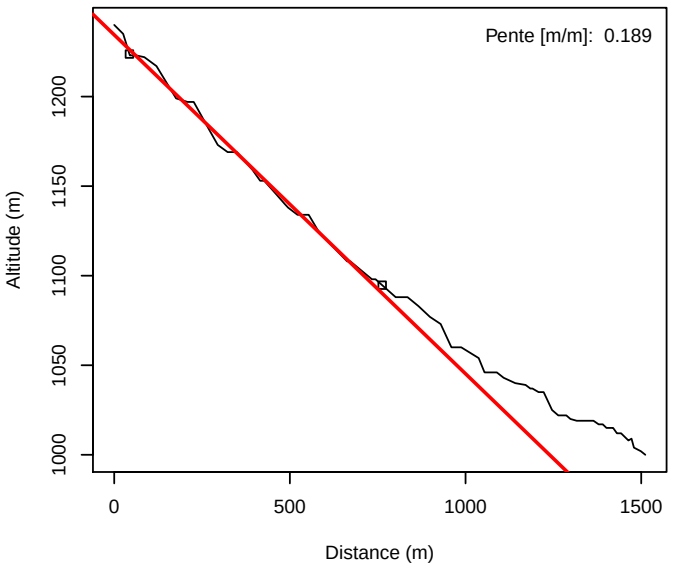
Torrent:TACONNAZ
Commune: CHAMONIX−MONT−BLANC (69)
ID: ID322



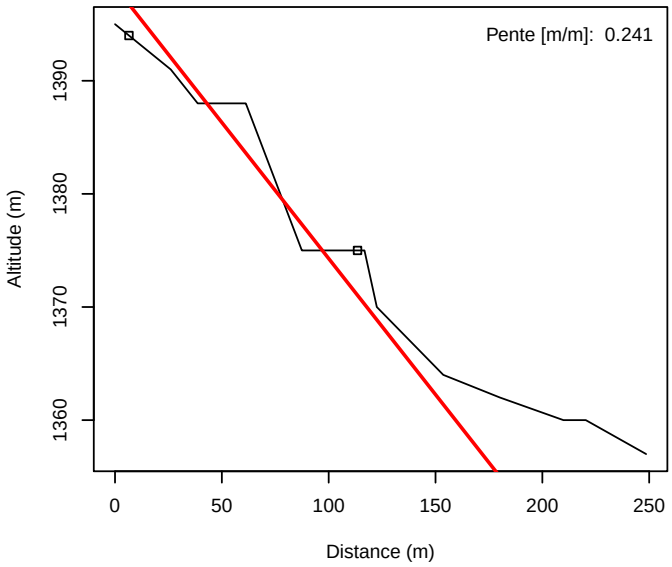
Torrent:LA CREUSAZ
Commune: CHAMONIX−MONT−BLANC (74)
ID: ID323



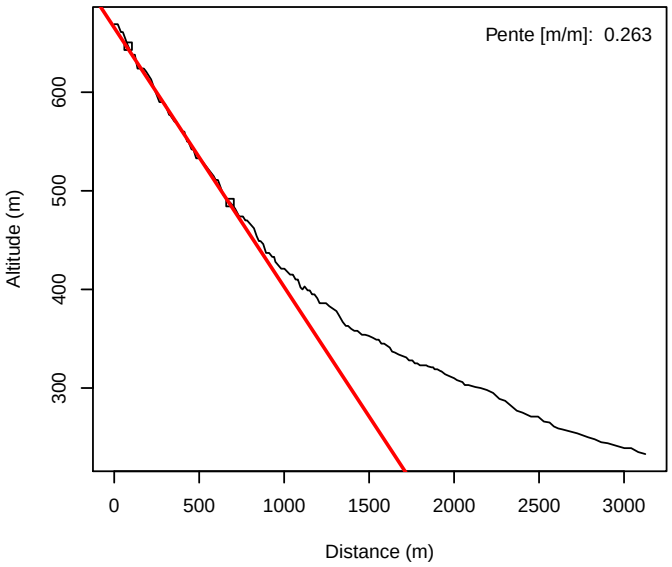
Torrent:LE BOURGEAT
Commune: LES HOUCHES (74)
ID: ID326



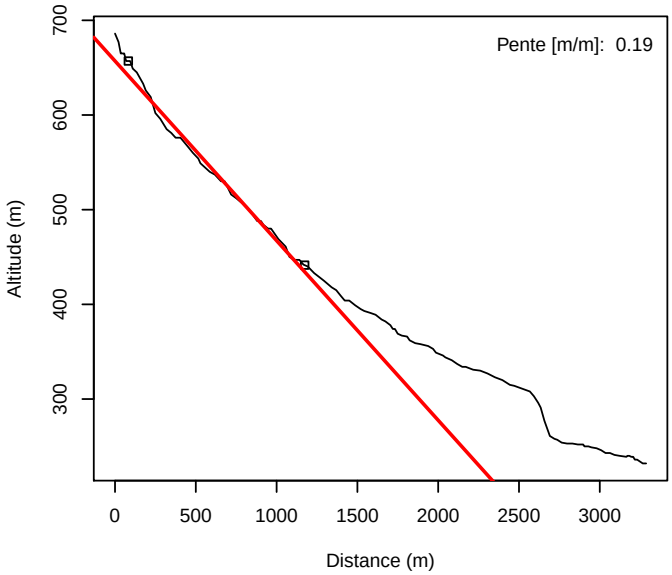
Torrent:LE NANT BORDON (2)
Commune: PASSY (74)
ID: ID329



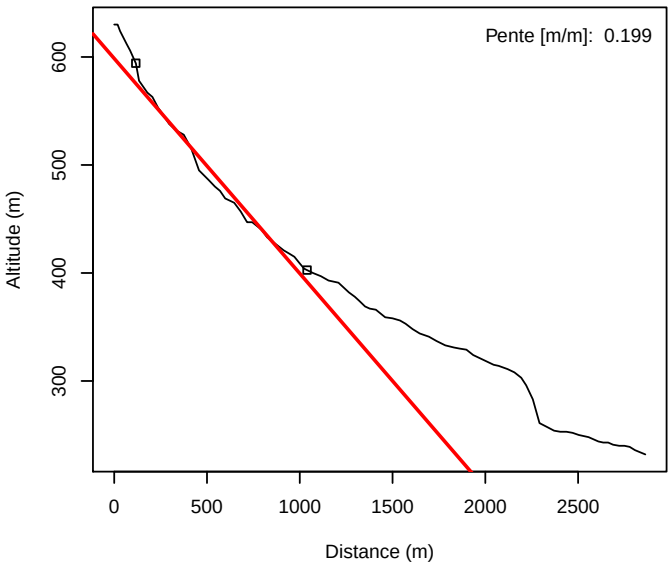
Torrent:TORRENT DE L'AIGUILLE
Commune: BIVIERS (38)
ID: ID40



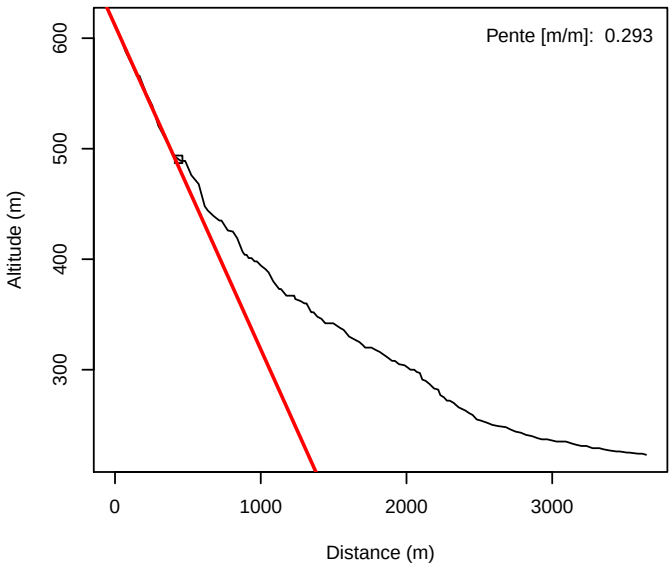
Torrent:TORRENT DES GUICHARDS
Commune: BIVIERS (38)
ID: ID43



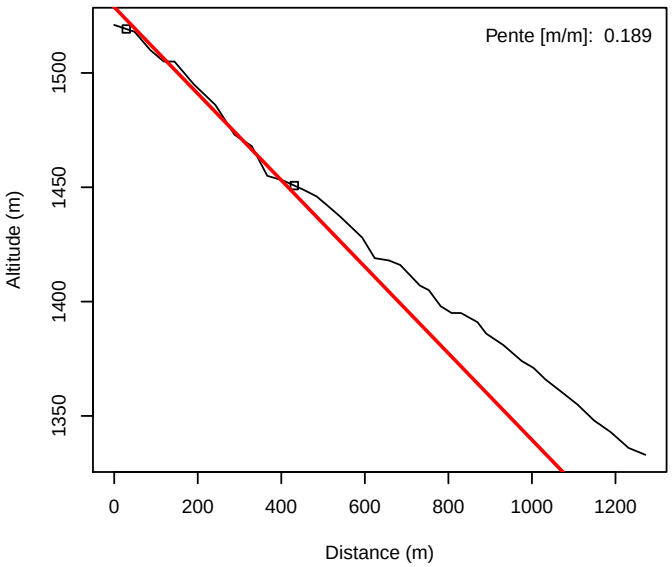
Torrent:TORRENT DE CREPON
Commune: BIVIERS (38)
ID: ID44



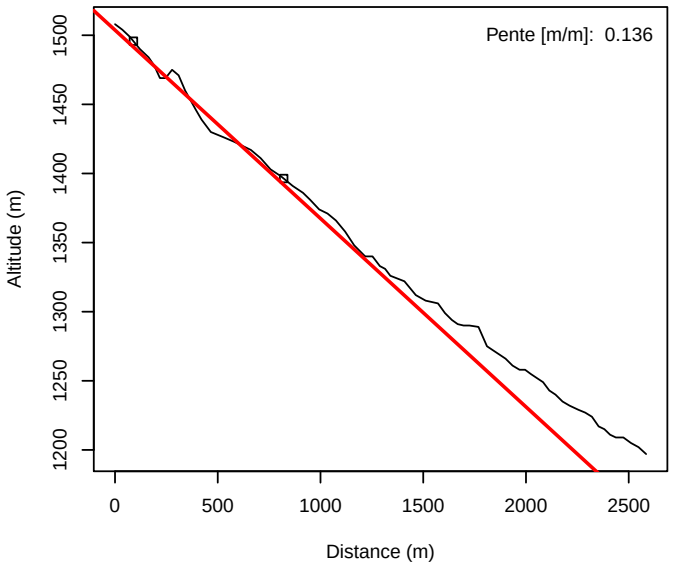
Torrent:TORRENT DE GAMOND (ST−HUGUES)
Commune: BIVIERS (38)
ID: ID47



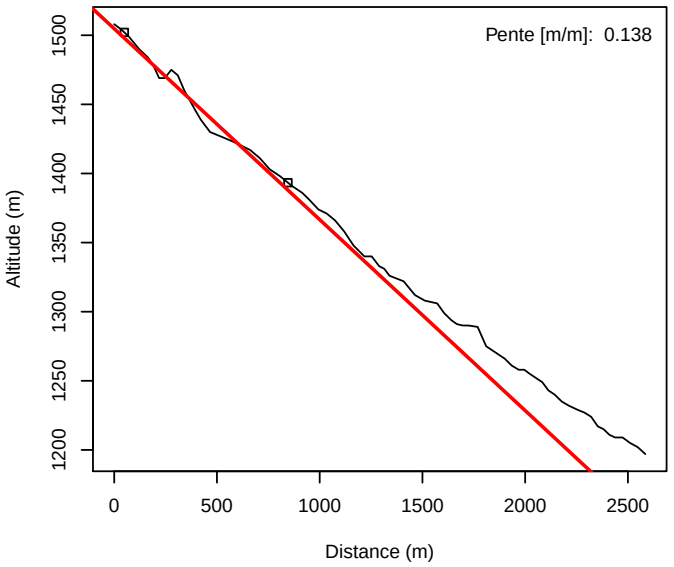
Torrent:LE MERDARET (AMONT)
Commune: CHANTELOUVE (38)
ID: ID48



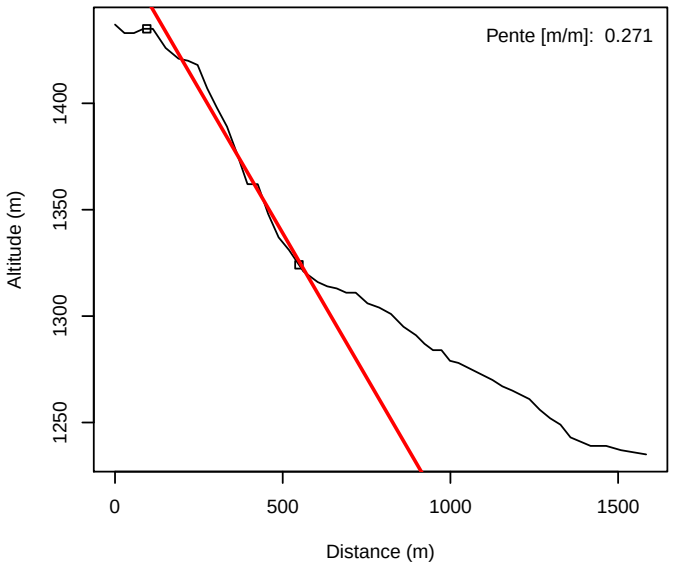
Torrent:LE MERDARET (AVAL)
Commune: CHANTELOUVE (38)
ID: ID49



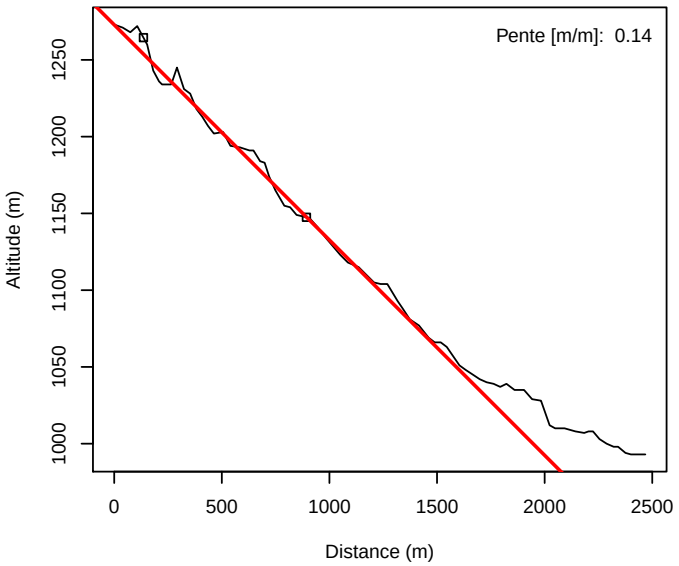
Torrent:RAVIN DES PÂLES
Commune: CHANTELOUVE (38)
ID: ID50



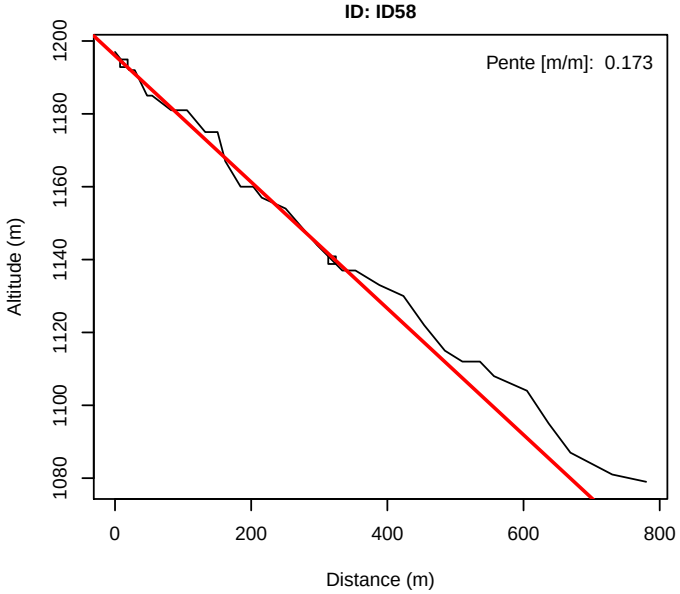
Torrent:ARVEYRON ARGENTIERE
Commune: CHAMONIX (74)
ID: ID501



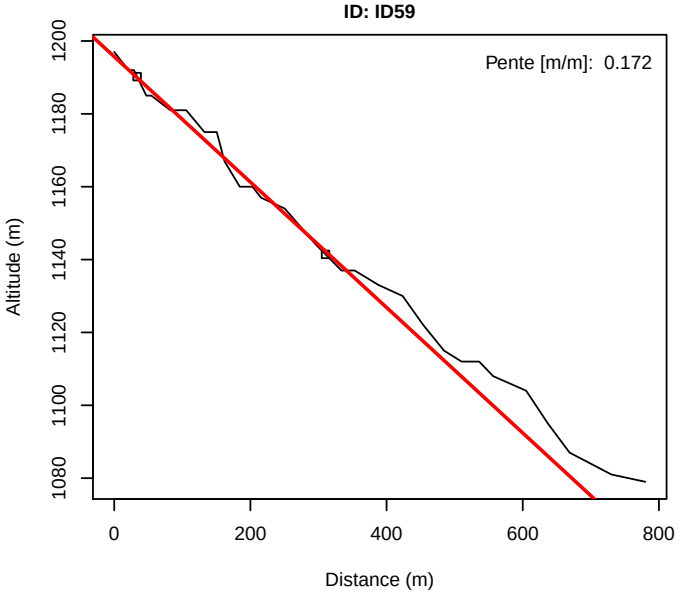
Torrent:RUISSEAU DES ARCHES
Commune: CHICHILIANNE (38)
ID: ID57



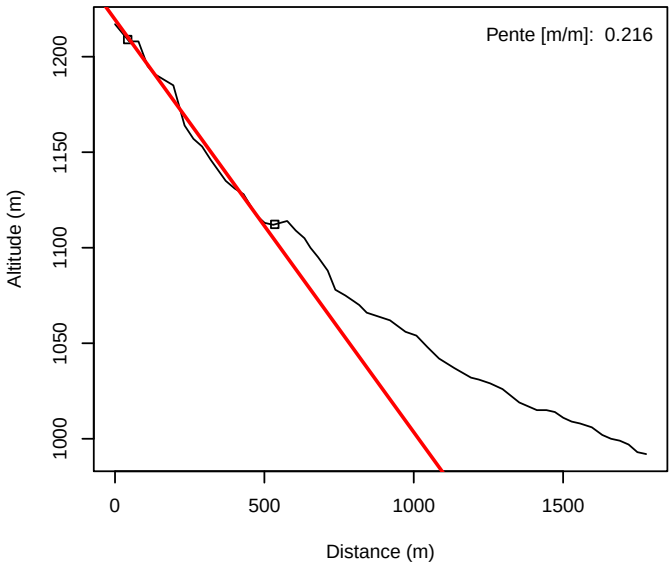
Torrent:RUISSEAU DES FRACHES
Commune: CHICHILIANNE (38)
ID: ID58



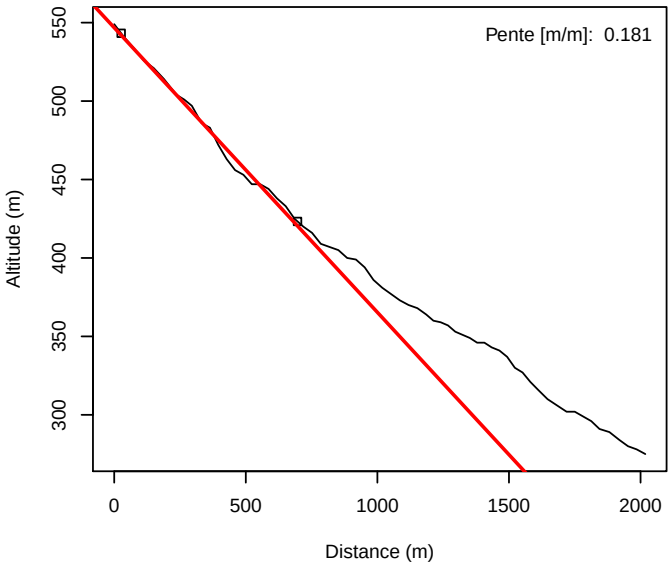
Torrent:RUISSEAU DES FRACHES
Commune: CHICHILIANNE (38)
ID: ID59



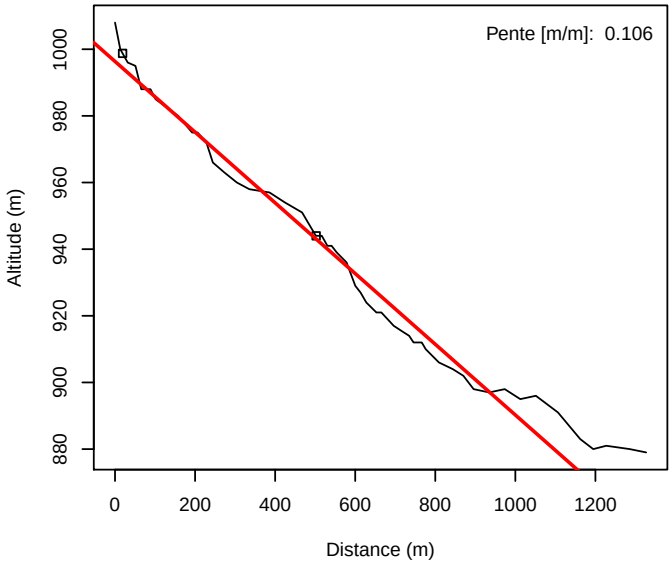
Torrent:TORRENT DE LA BERNARDIERE
Commune: CHICHILIANNE (38)
ID: ID60



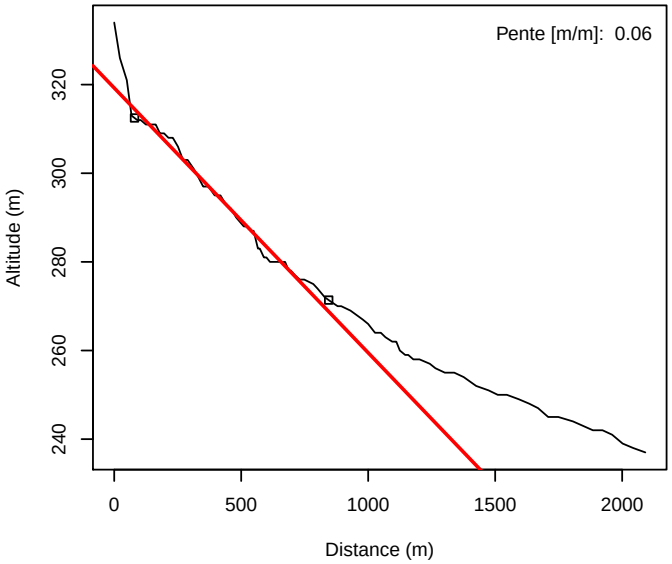
Torrent:LE RIF TALON
Commune: CLAIX (38)
ID: ID64



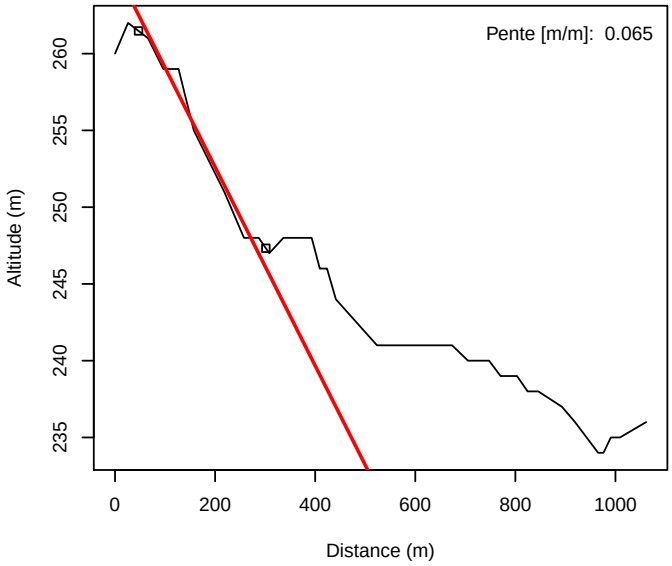
Torrent:RUISSEAU DE CHALANNE
Commune: CORDEAC (38)
ID: ID65



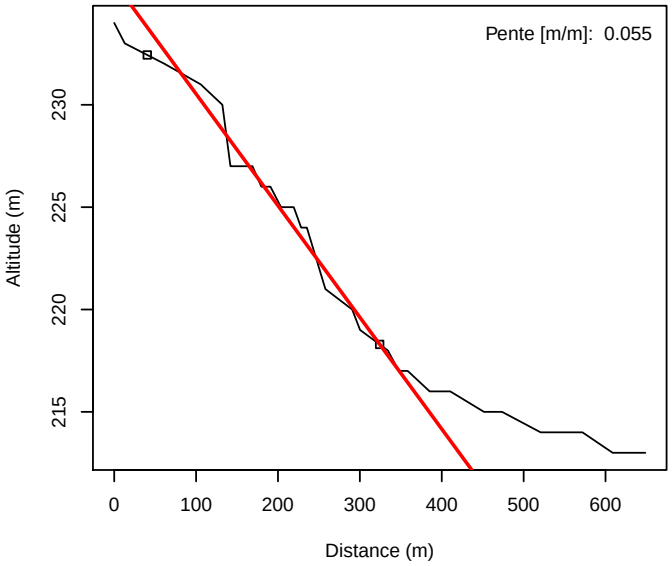
Torrent:LE CRAPONOZ
Commune: CROLLES (38)
ID: ID74



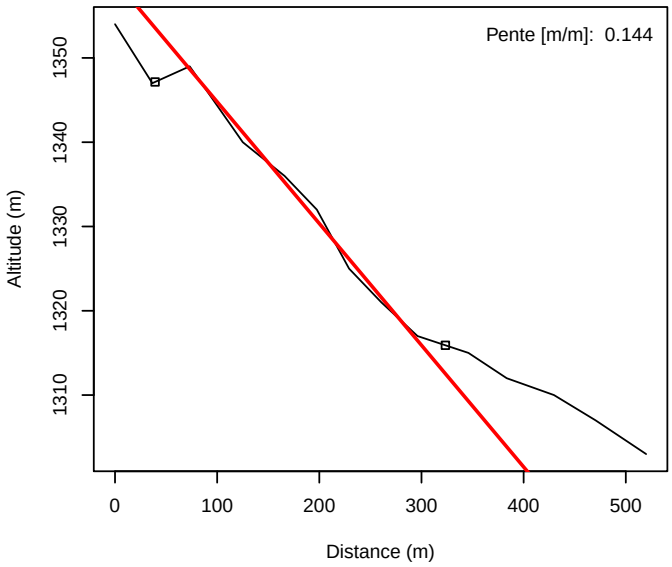
Torrent:VERDERET
Commune: EYBENS (38)
ID: ID76



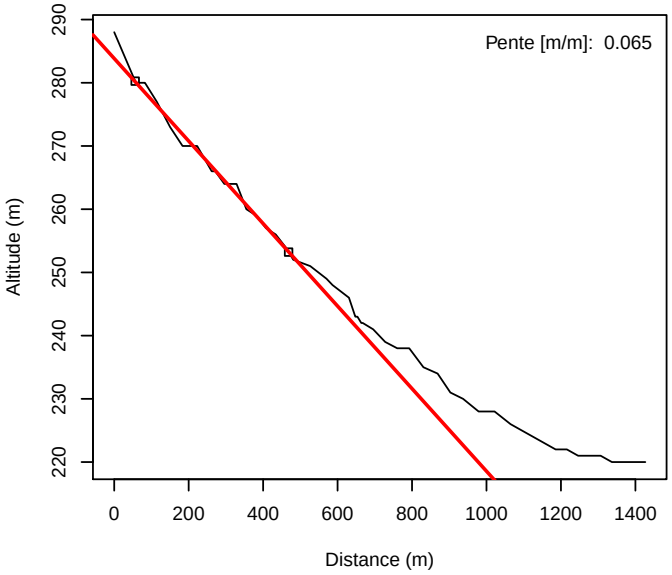
Torrent:SONNANT
Commune: GIERES (38)
ID: ID79



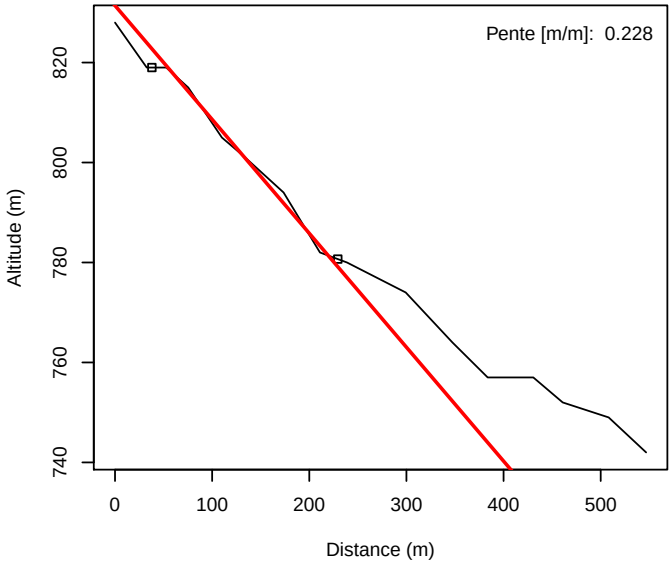
Torrent:LA GRESSE
Commune: GRESSE−EN−VERCORS (38)
ID: ID80



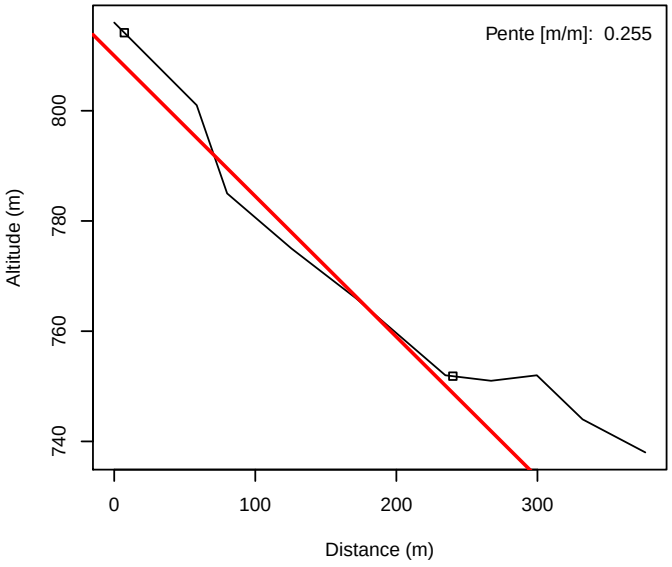
Torrent:LE CHARMEYRAN
Commune: LA TRONCHE (38)
ID: ID88



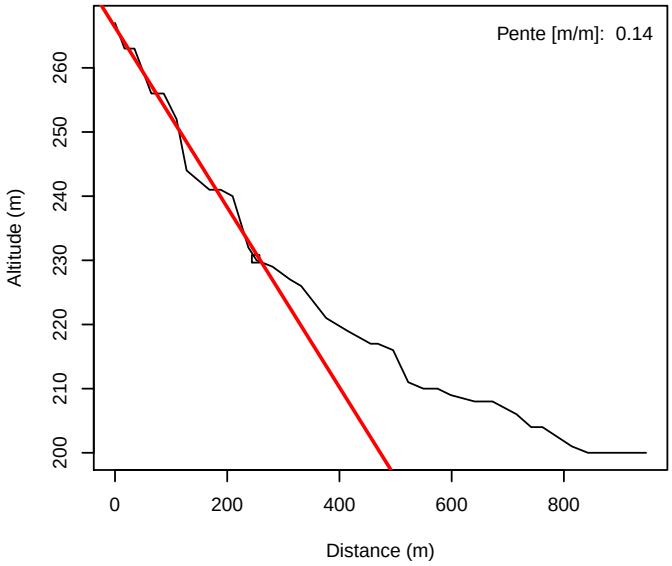
Torrent:LE SAINT−ANTOINE
Commune: LE BOURG D'OISANS (38)
ID: ID96



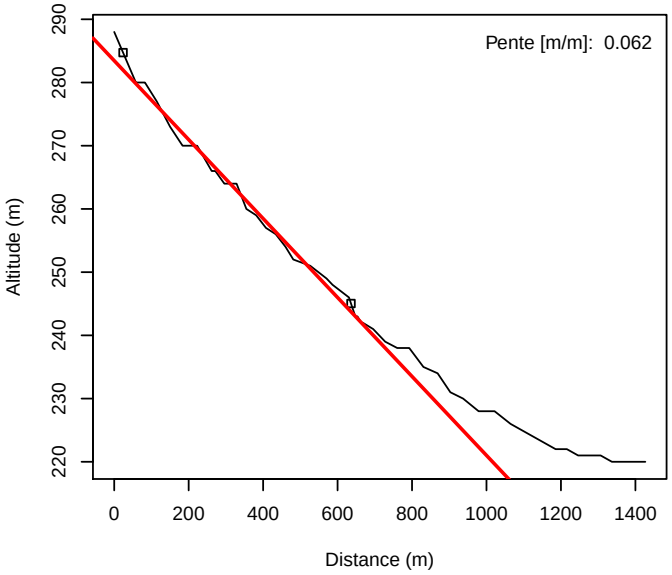
Torrent:LE TREUIL
Commune: LE BOURG D'OISANS (38)
ID: ID98



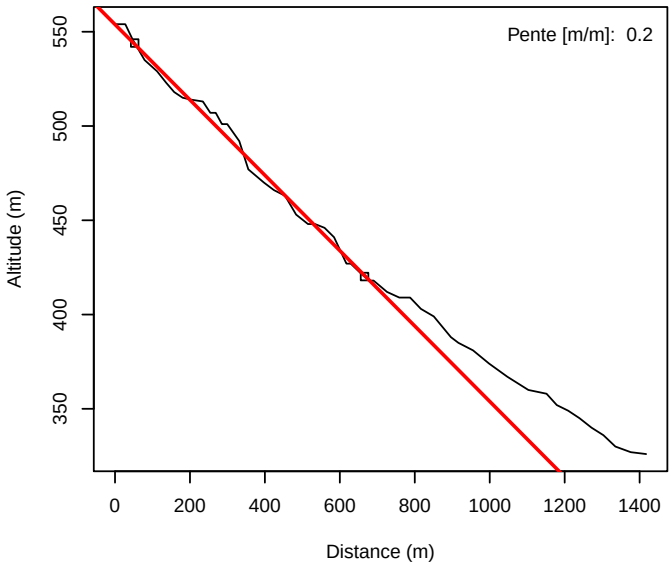
Torrent:LANFREY
Commune: FONTANIL−CORNILLON (38)
ID: METRO1



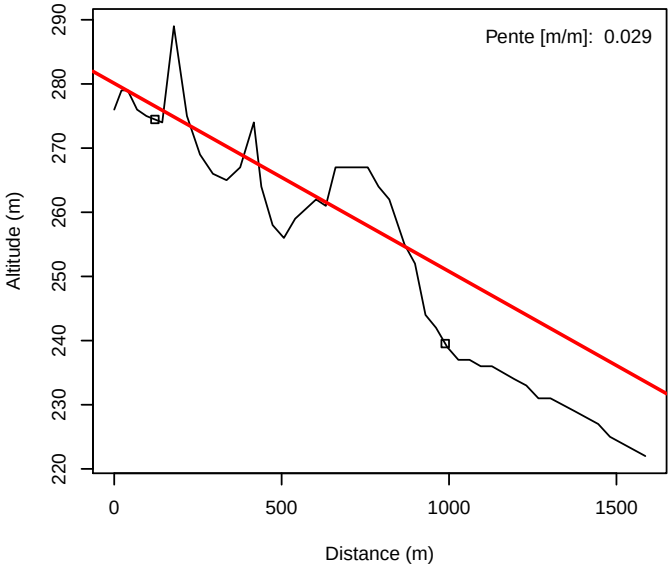
Torrent:CHARMEYRAN
Commune: LA TRONCHE (38)
ID: METRO2



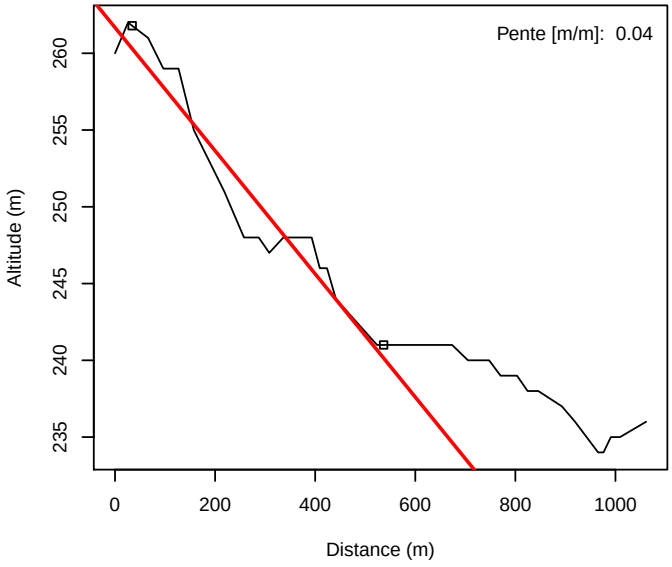
Torrent:JAILLIERES
Commune: MEYLAN (38)
ID: METRO3



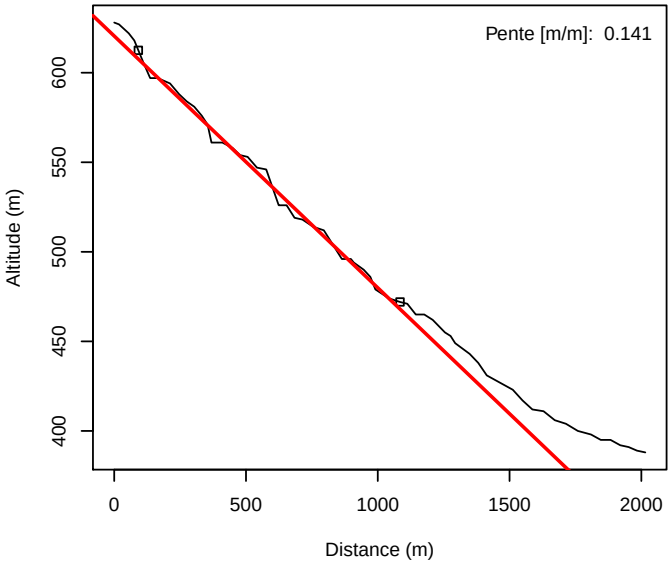
Torrent:DOMEYNON
Commune: DOMENE (38)
ID: METRO4



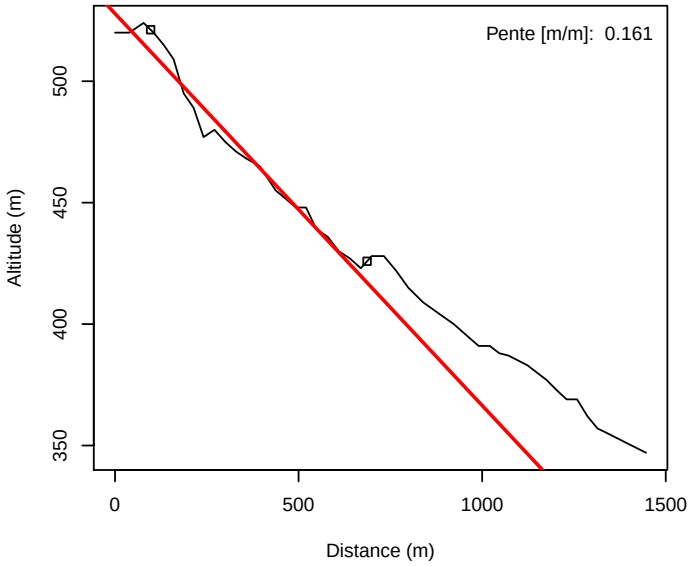
Torrent:VERDERET
Commune: EYBENS (38)
ID: METRO5



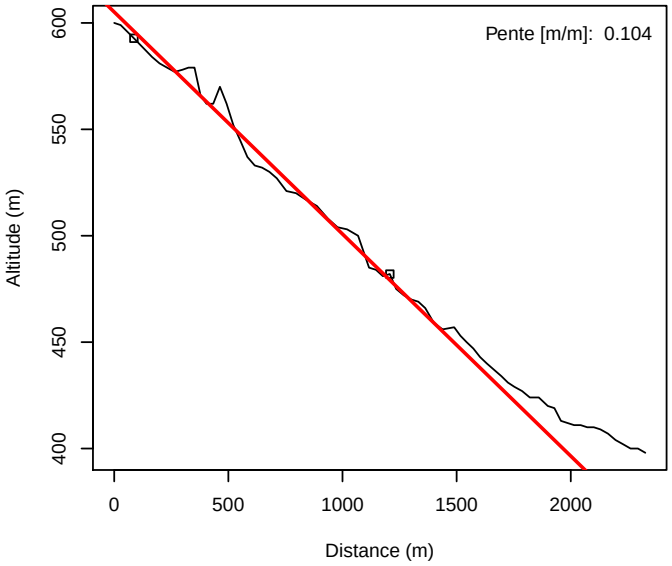
Torrent:VERNON
Commune: VAULNAVEYS−LE−HAUT (38)
ID: METRO6



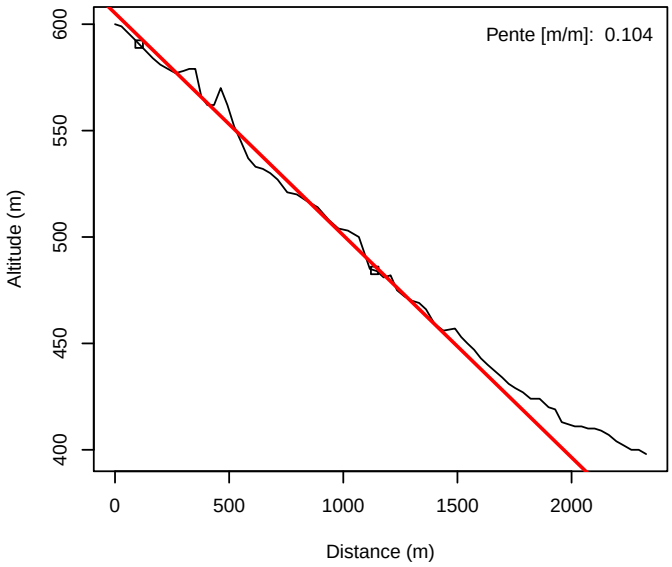
Torrent:PREMOL
Commune: VAULNAVEYS−LE−HAUT (38)
ID: METRO7



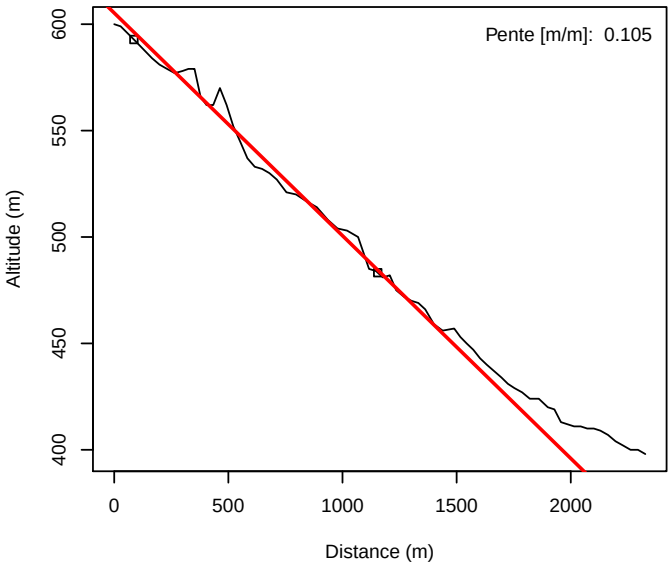
Torrent:LE LAVANCHON
Commune: SAINT−PAUL−DE−VARCES (38)
ID: METRO8a



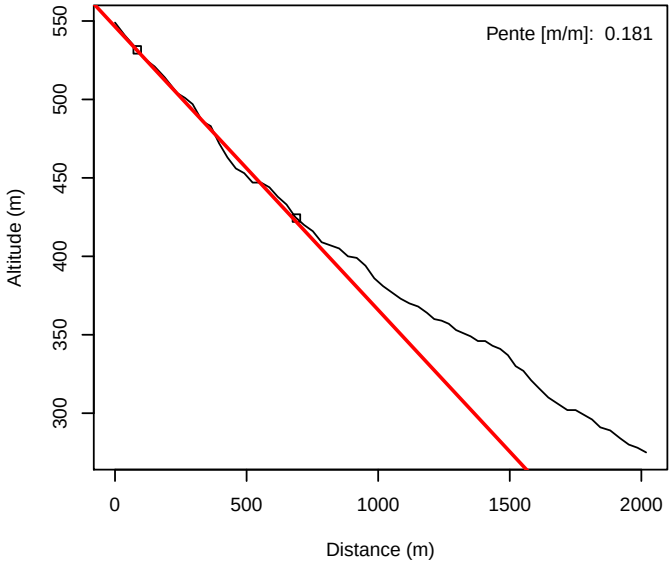
Torrent:LE LAVANCHON
Commune: SAINT−PAUL−DE−VARCES (38)
ID: METRO8b



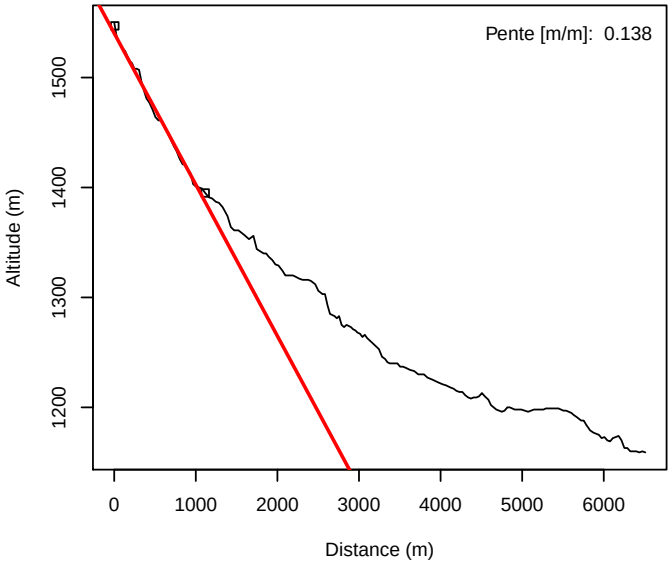
Torrent:LE LAVANCHON
Commune: VARCES−ALLIERES−ET−RISSET (38)
ID: METRO8c



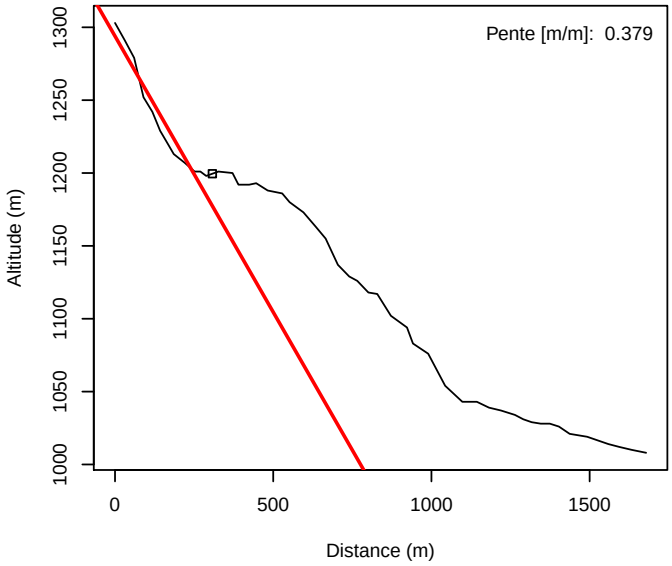
Torrent:LE RIF TALON
Commune: CLAIX (38)
ID: METRO9



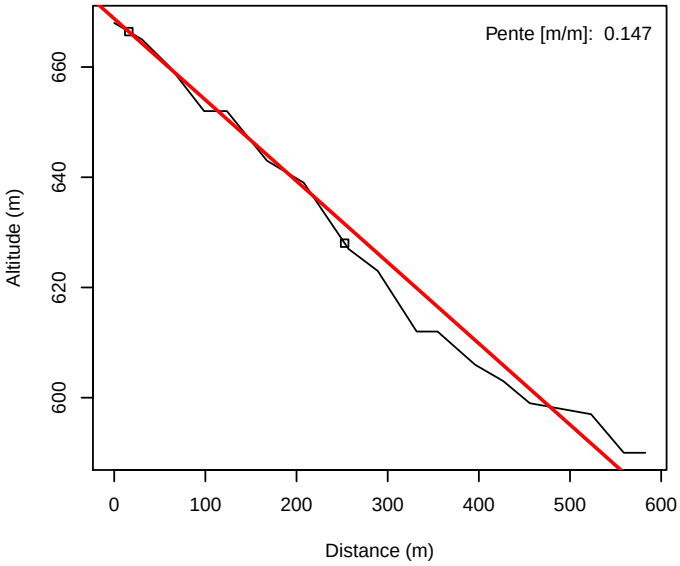
Torrent:ARVE
Commune: CHAMONIX (74)
ID: SMA1



Torrent:BOSSONS
Commune: CHAMONIX (74)
ID: SMA2

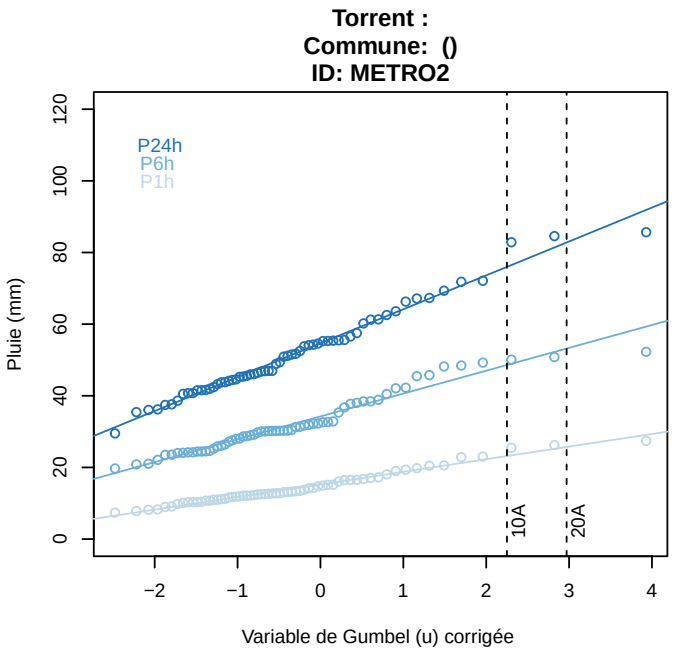


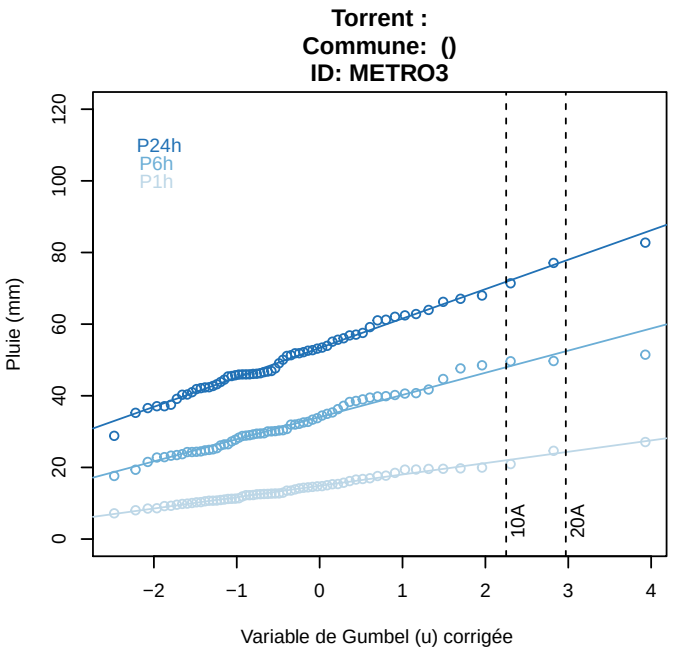
Torrent:FERNEY
Commune: SAINT GERVAIS LES BAINS (74)
ID: SMA3

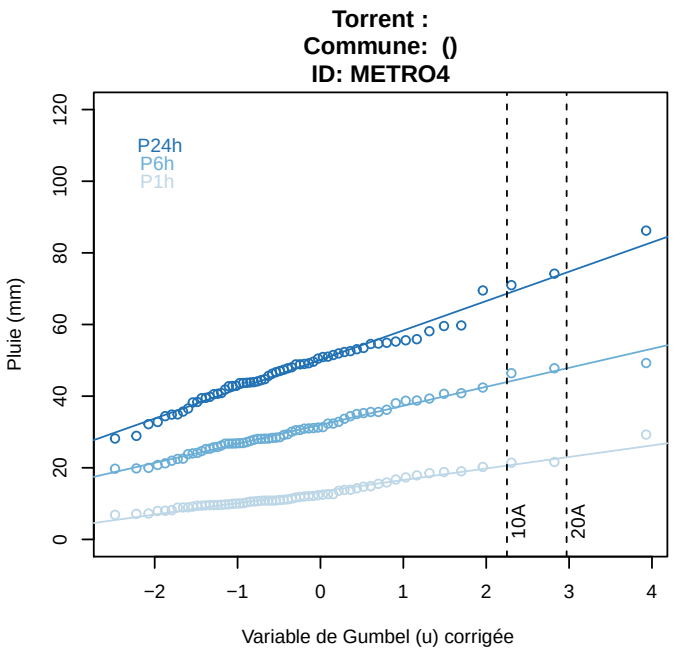


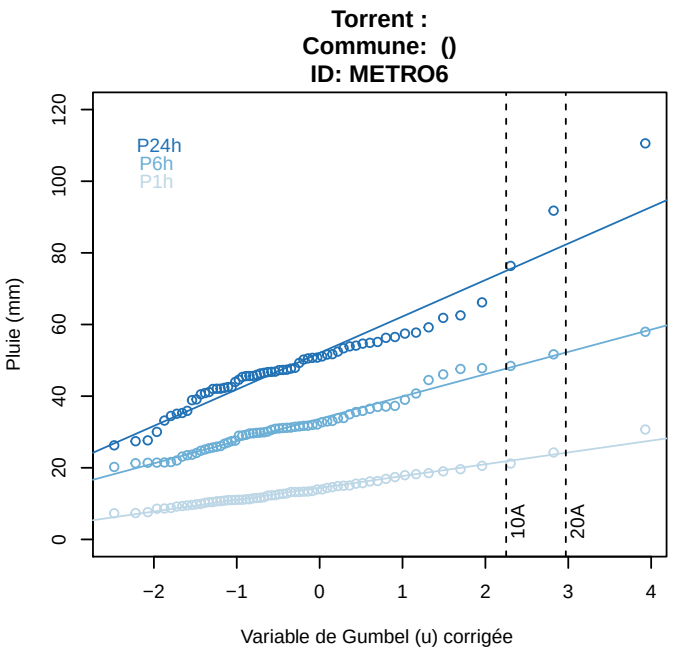
E Précipitations COMEPHORE

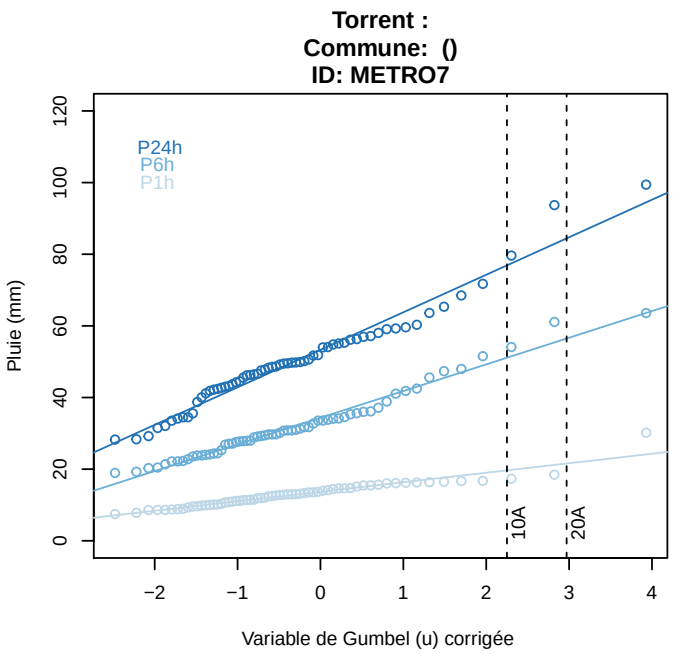
Ajustement des données de précipitations COMEPHORE pour chaque bassin versant du jeu de données.

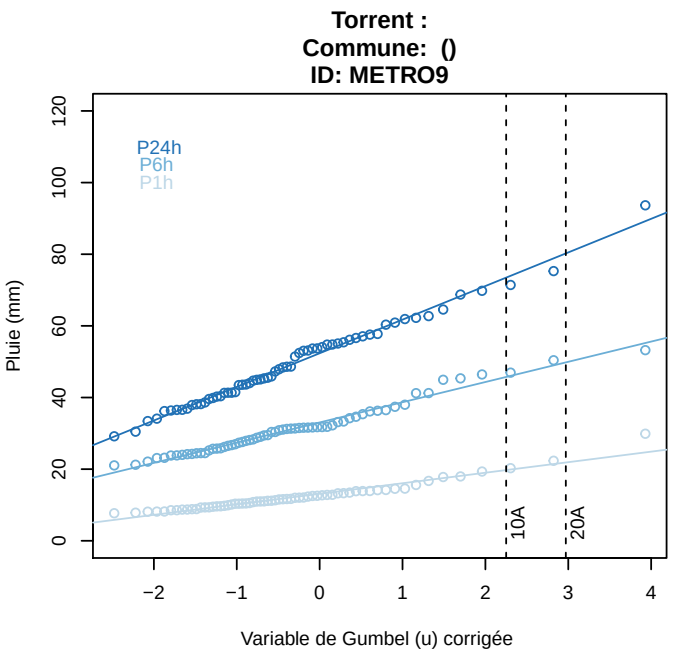

Torrent :
Commune: ()
ID: METRO2
P24h
P6h
P1h
10A
20A
Pluie (mm)
Variable de Gumbel (u) corrigée

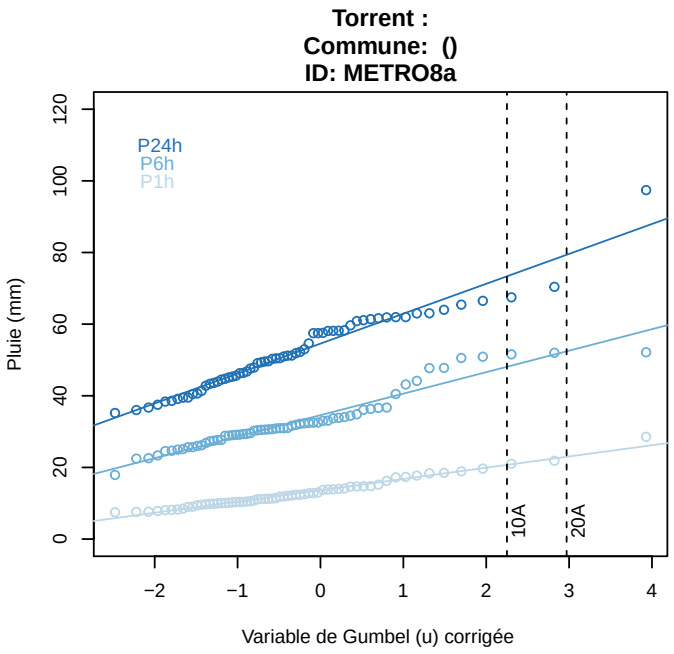

Torrent :
Commune: ()
ID: METRO3
P24h
P6h
P1h
10A
20A
Pluie (mm)
Variable de Gumbel (u) corrigée

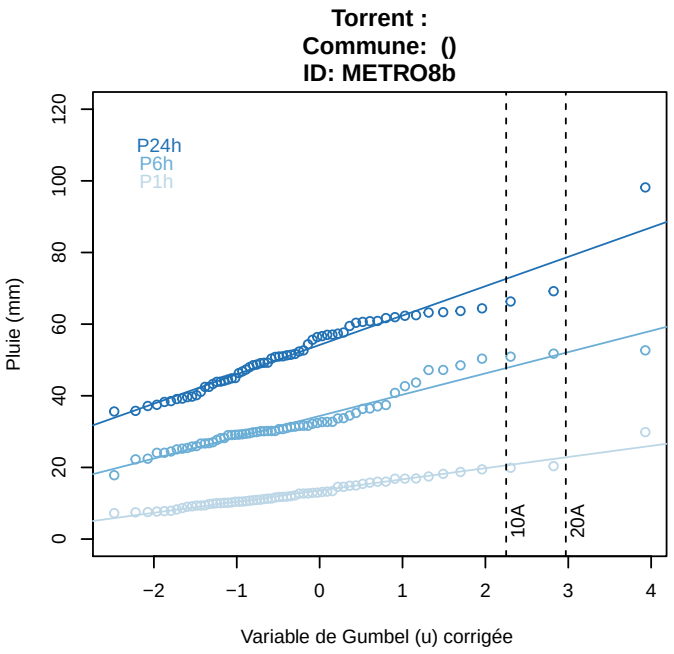

Torrent :
Commune: ()
ID: METRO4
P24h
P6h
P1h
10A
20A
Pluie (mm)
Variable de Gumbel (u) corrigée

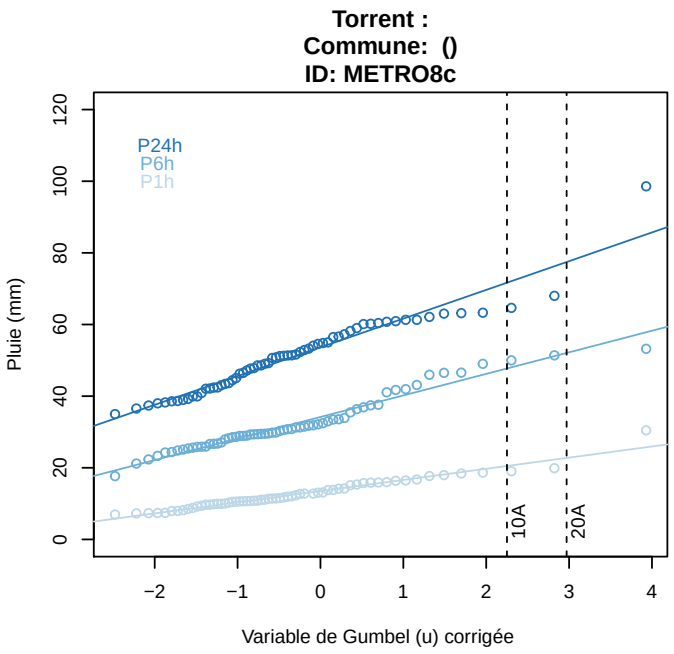

Torrent :
Commune: ()
ID: METRO6
P24h
P6h
P1h
10A
20A
Pluie (mm)
Variable de Gumbel (u) corrigée

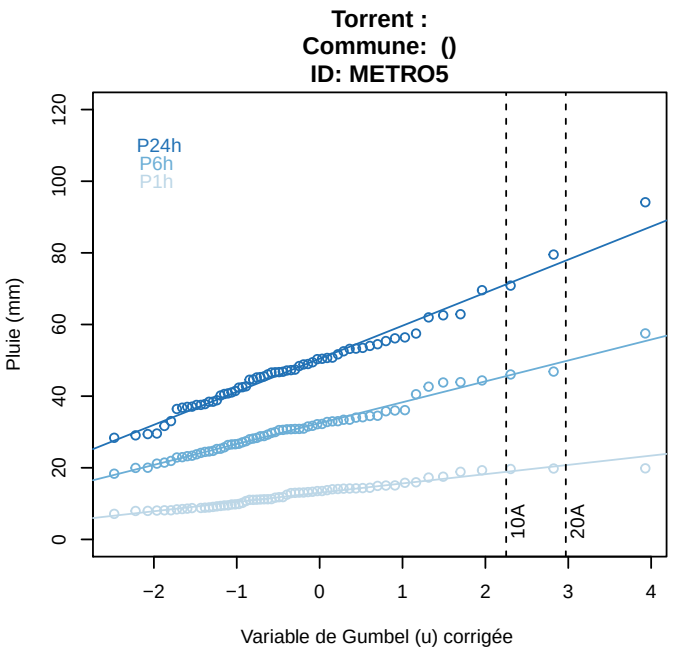

Torrent :
Commune: ()
ID: METRO7
P24h
P6h
P1h
10A
20A
Pluie (mm)
Variable de Gumbel (u) corrigée

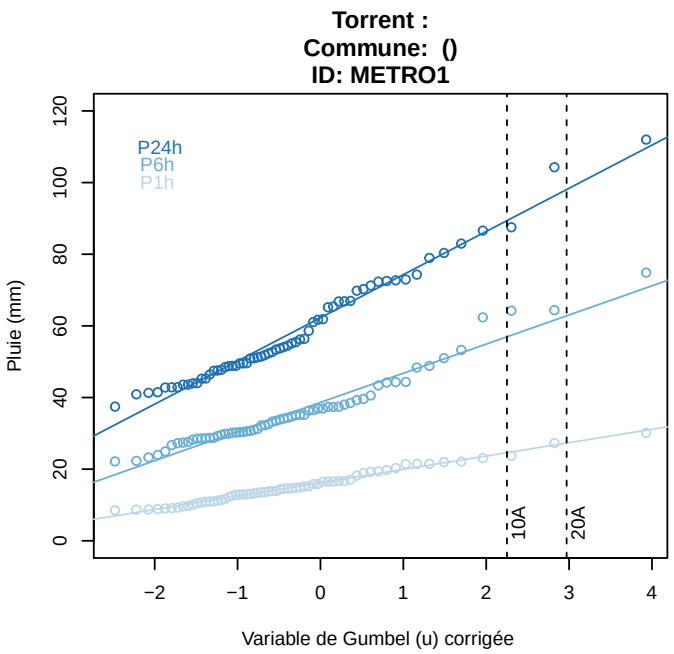

Torrent :
Commune: ()
ID: METRO9
P24h
P6h
P1h
10A
20A
Pluie (mm)
Variable de Gumbel (u) corrigée

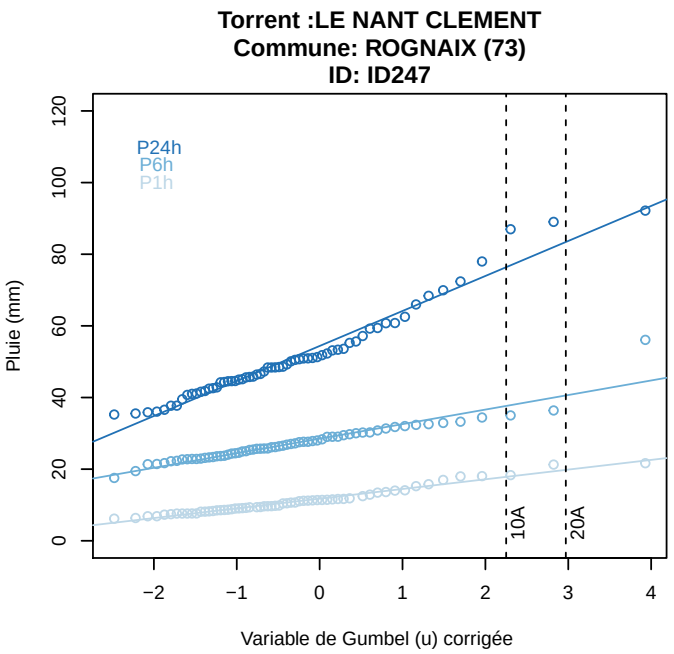

Torrent :
Commune: ()
ID: METRO8a
P24h
P6h
P1h
Pluie (mm)
Variable de Gumbel (u) corrigée
10A
20A


Torrent :
Commune: ()
ID: METRO8b
P24h
P6h
P1h
Pluie (mm)
Variable de Gumbel (u) corrigée
10A
20A

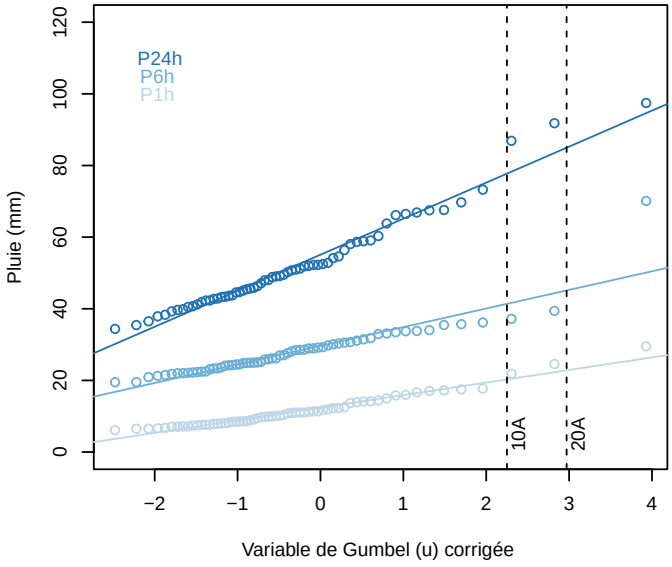

Torrent :
Commune: ()
ID: METRO8c
P24h
P6h
P1h
Pluie (mm)
Variable de Gumbel (u) corrigée
10A
20A


Torrent :
Commune: ()
ID: METRO5
P24h
P6h
P1h
Pluie (mm)
Variable de Gumbel (u) corrigée
10A
20A

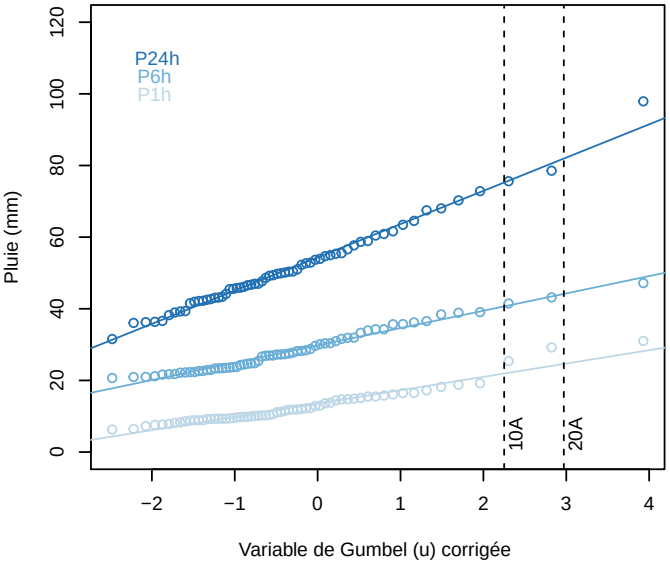

Torrent :
Commune: ()
ID: METRO1
P24h
P6h
P1h
Pluie (mm)
Variable de Gumbel (u) corrigée
10A
20A


Torrent :LE NANT CLEMENT
Commune: ROGNAIX (73)
ID: ID247
P24h
P6h
P1h
Pluie (mm)
Variable de Gumbel (u) corrigée
10A
20A

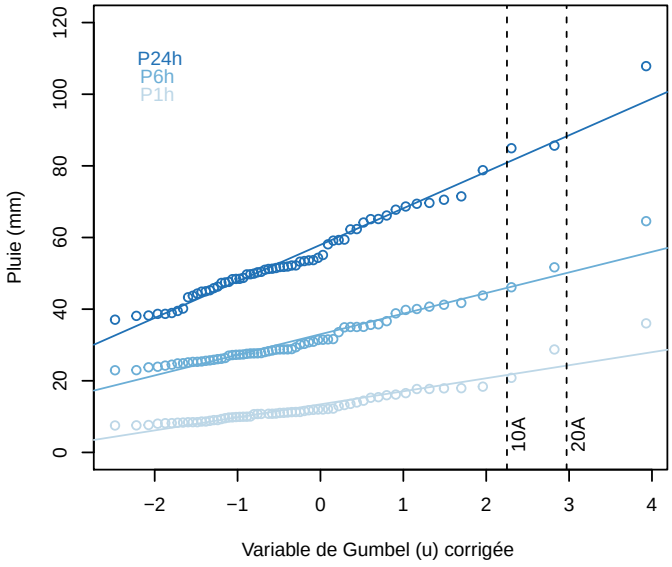
Torrent :LA GRUVAZ
Commune: CEVINS (73)
ID: ID217



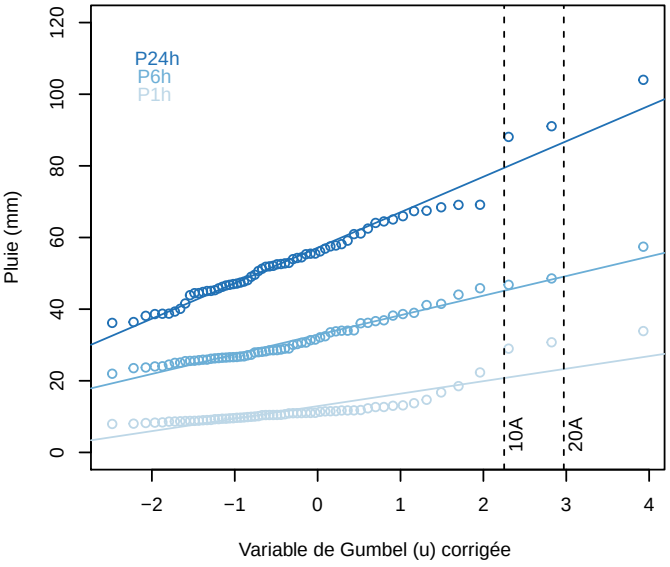
Torrent :RUISSEAU DU GROS CHENE
Commune: AITON (73)
ID: ID204



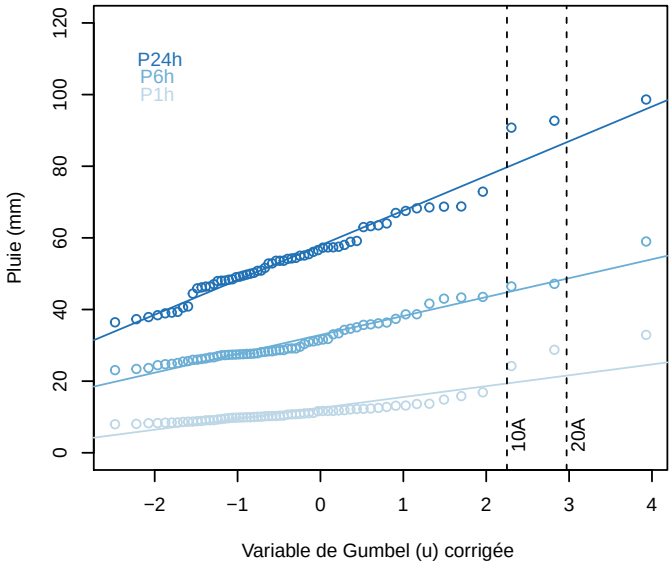
Torrent :RUISSEAU DE CRUET
Commune: FRETERIVE (73)
ID: ID225



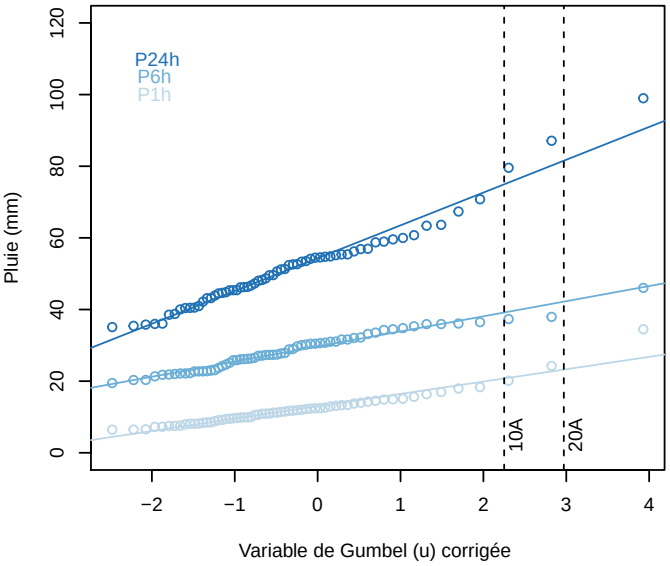
Torrent :LE FAVASSET (AVAL)
Commune: SAINT−PIERRE−D'ALBIGNY (73)
ID: ID266



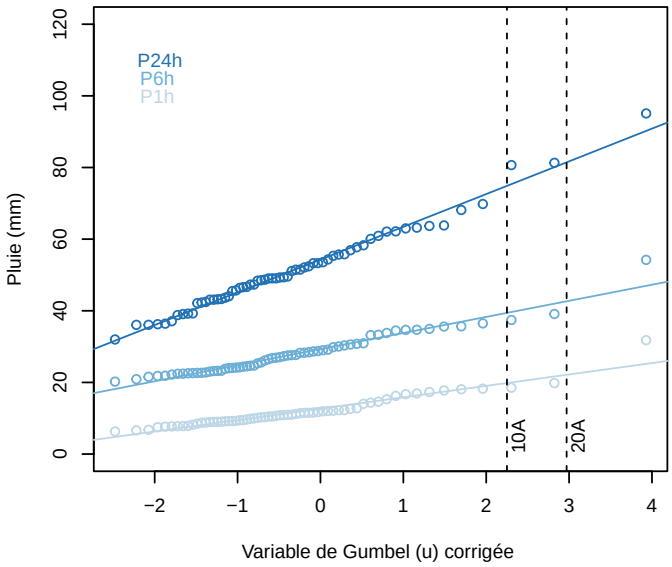
Torrent :LE GARGOT
Commune: SAINT−PIERRE−D'ALBIGNY (73)
ID: ID265



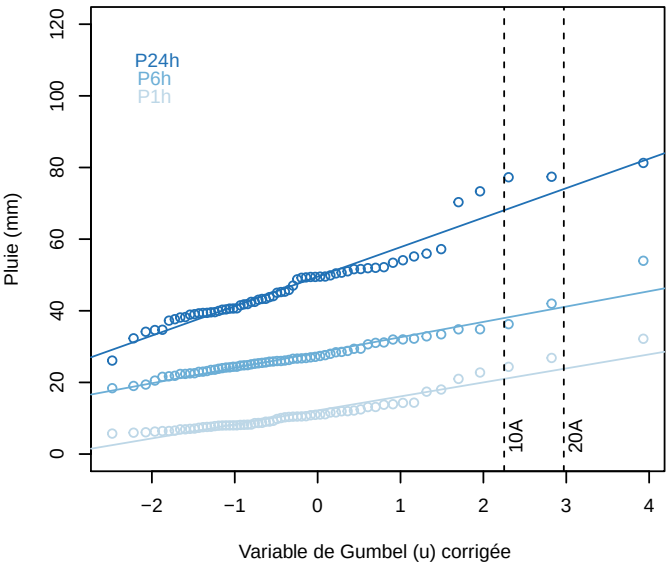
Torrent :RUISSEAU DES MOULINS
Commune: SAINT−PAUL−SUR−ISERE (73)
ID: ID264



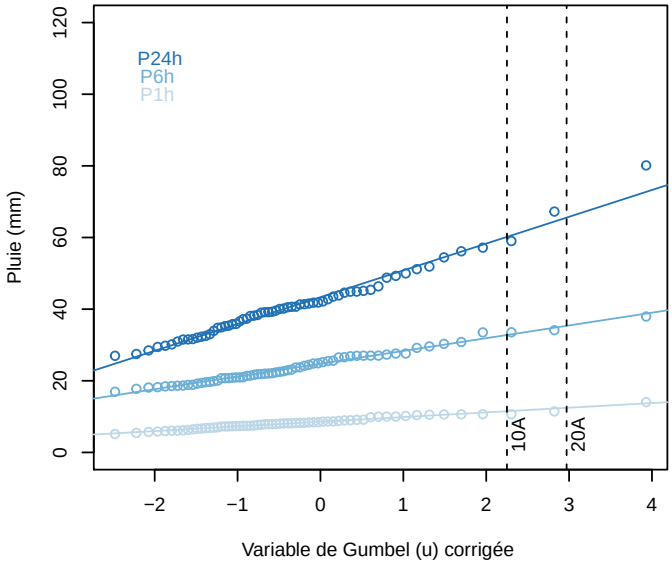
Torrent :LE NANT BRUYANT
Commune: SAINTE−HELENE−SUR−ISERE (73)
ID: ID268



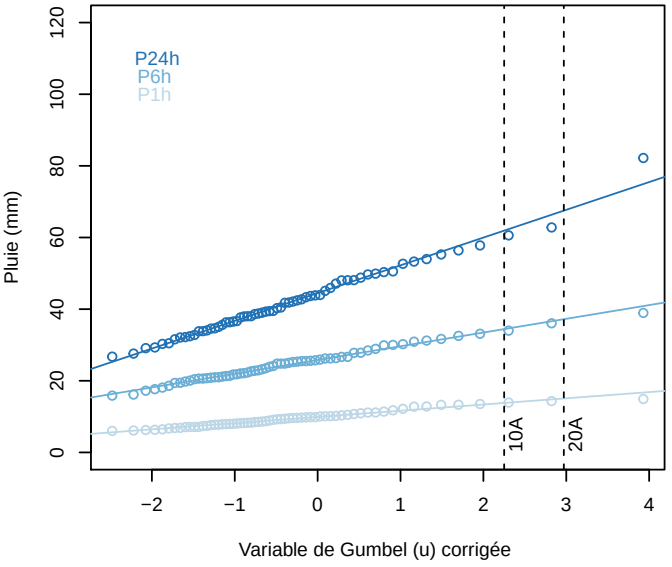
Torrent :RUISSEAU DES MOULINS (1)
Commune: EPIERRE (73)
ID: ID222



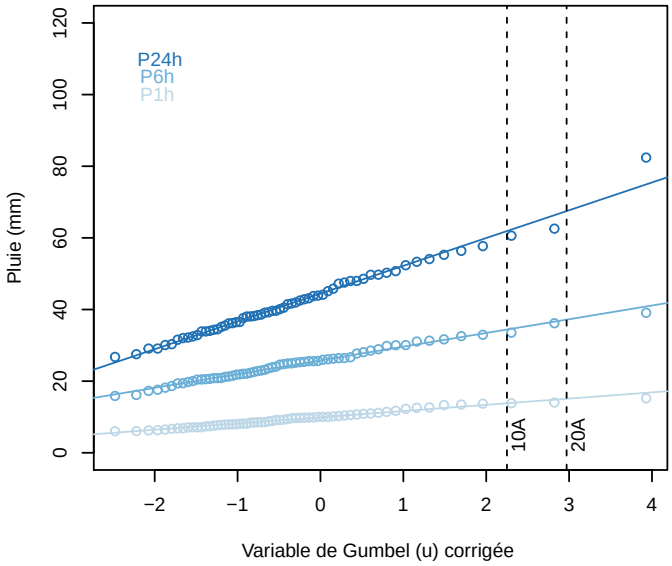
Torrent :LE MERDEREL
Commune: SAINT−MARTIN−LA−CHAMBRE (73)
ID: ID260



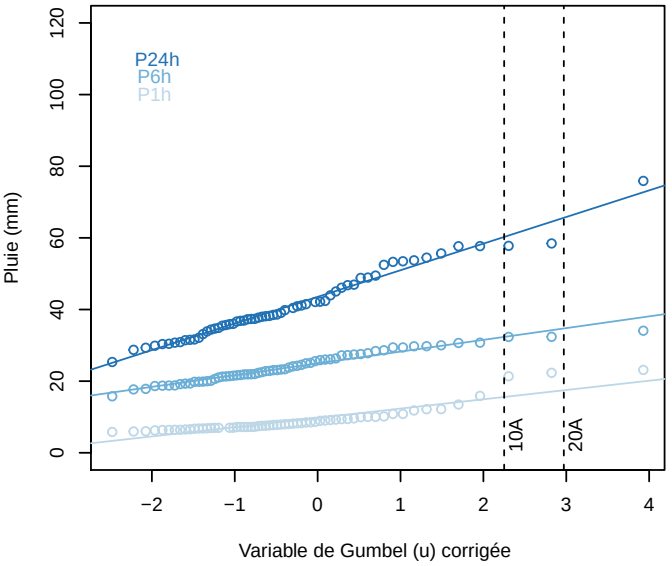
Torrent :LE NANTUEL (AMONT)
Commune: SAINT−AVRE (73)
ID: ID250

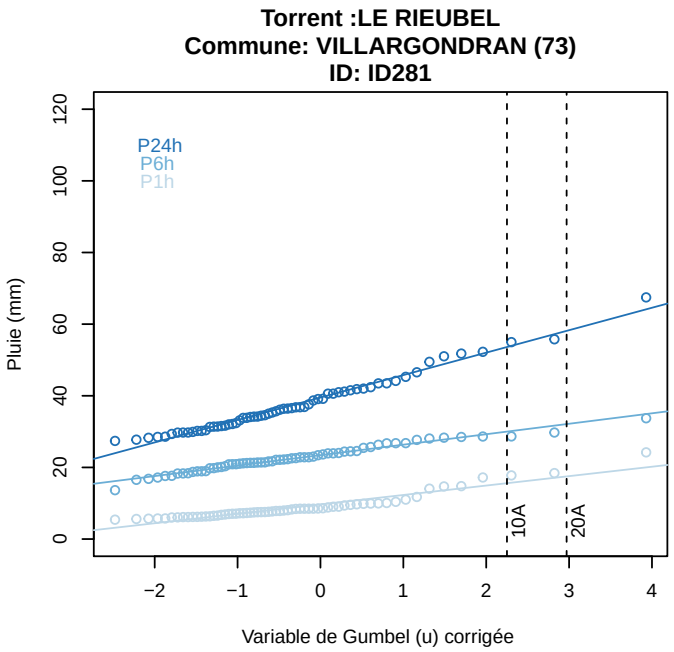


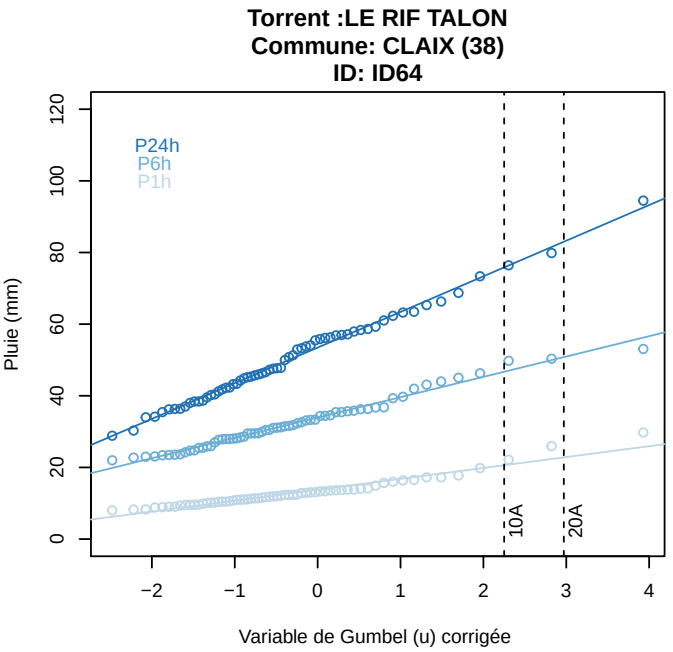
Torrent :LE NANTUEL (AVAL)
Commune: SAINT−AVRE (73)
ID: ID251

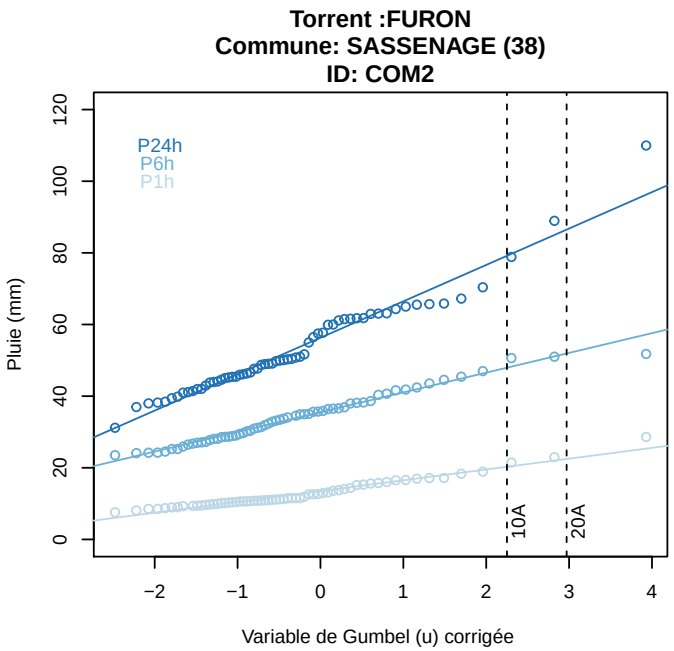


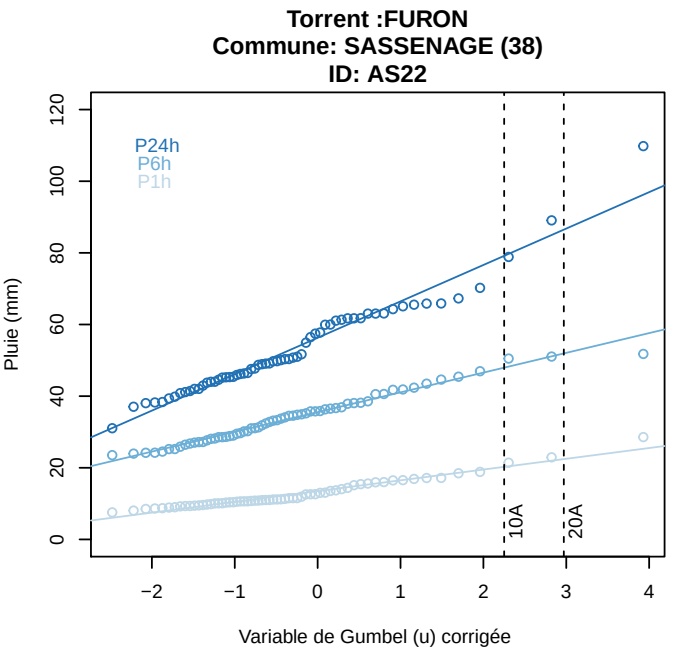
Torrent :LE CLINEL
Commune: PONTAMAFREY (73)
ID: ID245

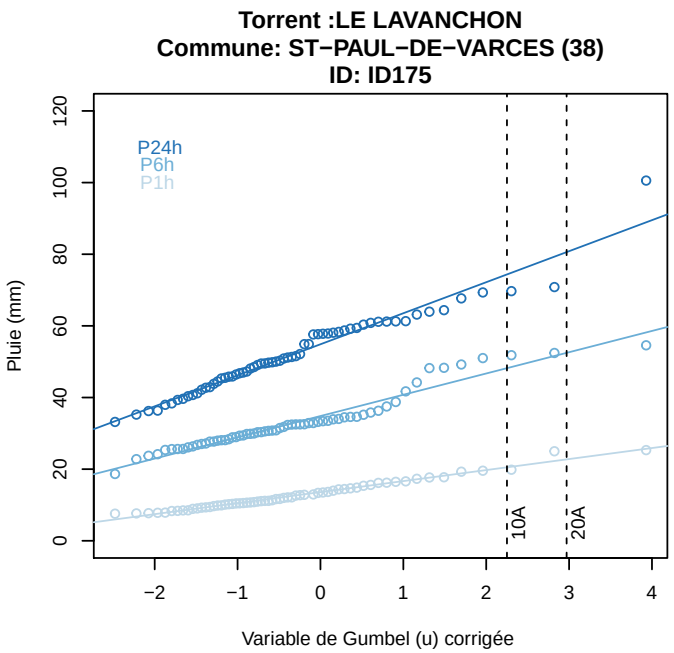


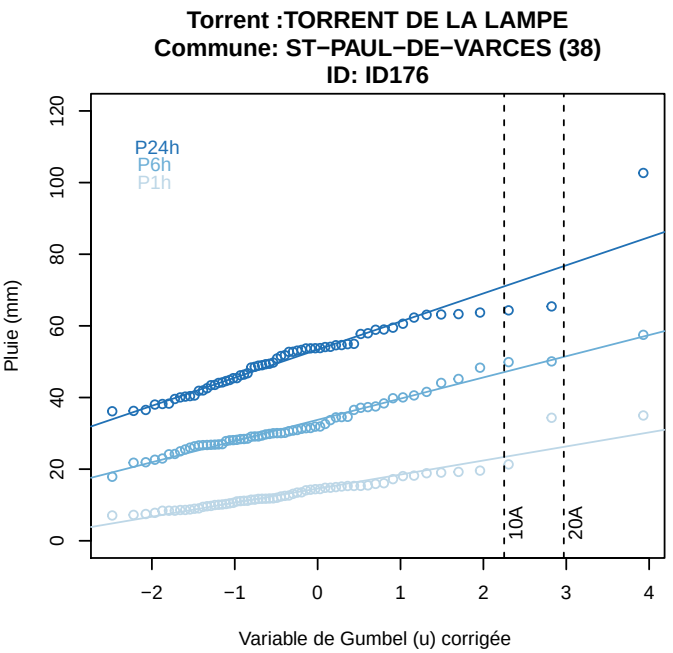

Torrent :LE RIEUBEL
Commune: VILLARGONDRAN (73)
ID: ID281
P24h
P6h
P1h
Pluie (mm)
Variable de Gumbel (u) corrigée
10A
20A


Torrent :LE RIF TALON
Commune: CLAIX (38)
ID: ID64
P24h
P6h
P1h
Pluie (mm)
Variable de Gumbel (u) corrigée
10A
20A

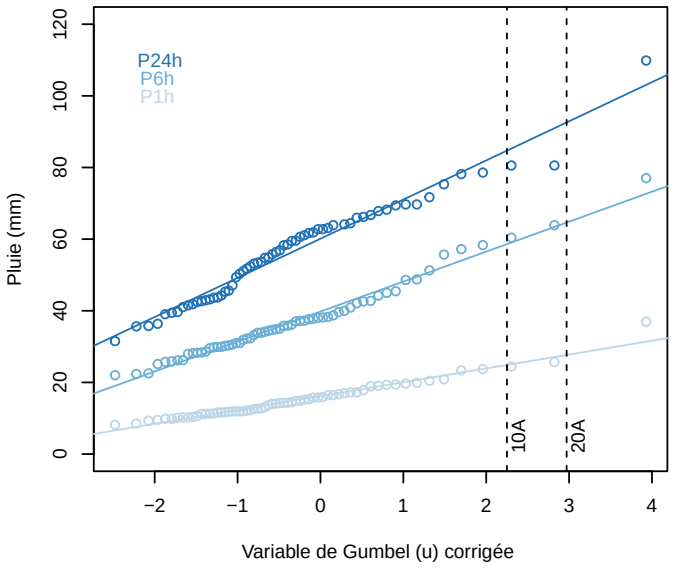

Torrent :FURON
Commune: SASSENAGE (38)
ID: COM2
P24h
P6h
P1h
Pluie (mm)
Variable de Gumbel (u) corrigée
10A
20A


Torrent :FURON
Commune: SASSENAGE (38)
ID: AS22
P24h
P6h
P1h
Pluie (mm)
Variable de Gumbel (u) corrigée
10A
20A

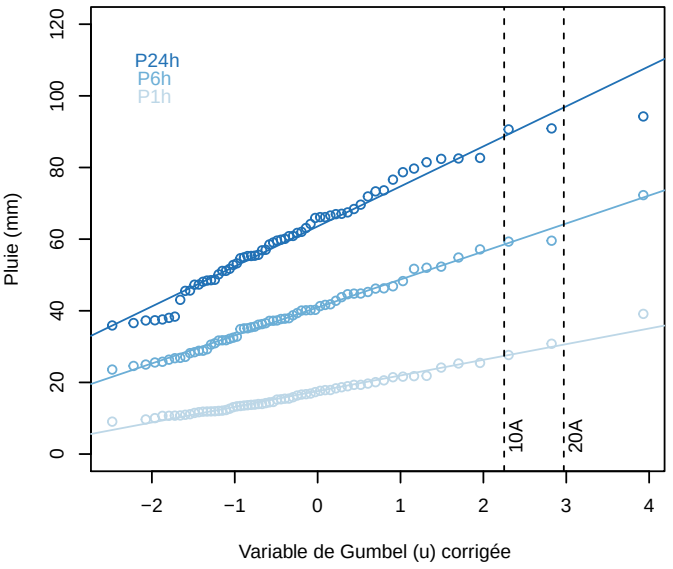

Torrent :LE LAVANCHON
Commune: ST−PAUL−DE−VARCES (38)
ID: ID175
P24h
P6h
P1h
Pluie (mm)
Variable de Gumbel (u) corrigée
10A
20A


Torrent :TORRENT DE LA LAMPE
Commune: ST−PAUL−DE−VARCES (38)
ID: ID176
P24h
P6h
P1h
Pluie (mm)
Variable de Gumbel (u) corrigée
10A
20A

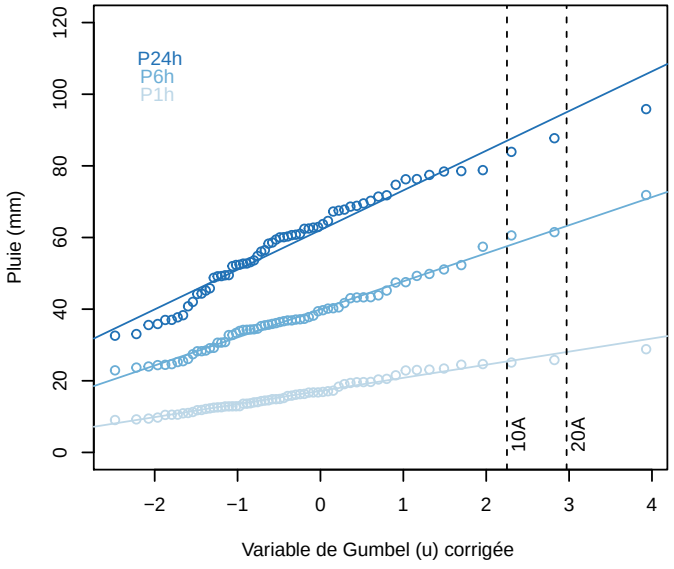
Torrent :LA GRESSE
Commune: GRESSE−EN−VERCORS (38)
ID: ID80



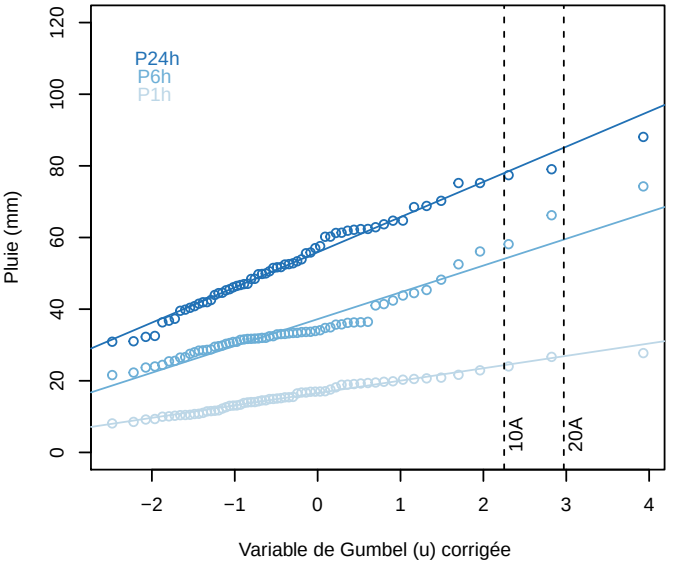
Torrent :RUISSEAU DES FRACHES
Commune: CHICHILIANNE (38)
ID: ID58



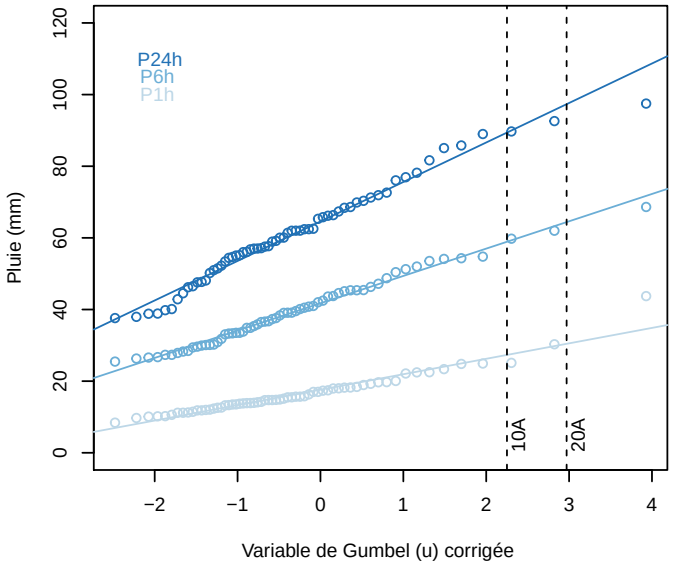
Torrent :RUISSEAU DES FRACHES
Commune: CHICHILIANNE (38)
ID: ID59



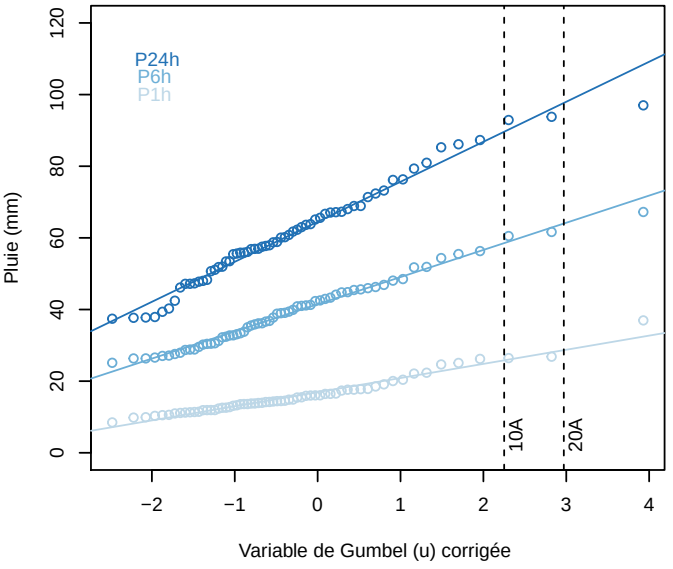
Torrent :LE RIFFOL
Commune: ROISSARD (38)
ID: ID131



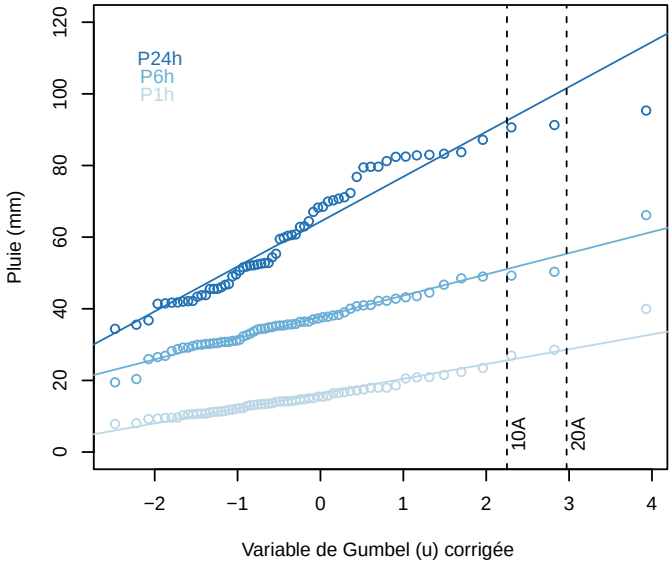
Torrent :TORRENT DE LA BERNARDIERE
Commune: CHICHILIANNE (38)
ID: ID60



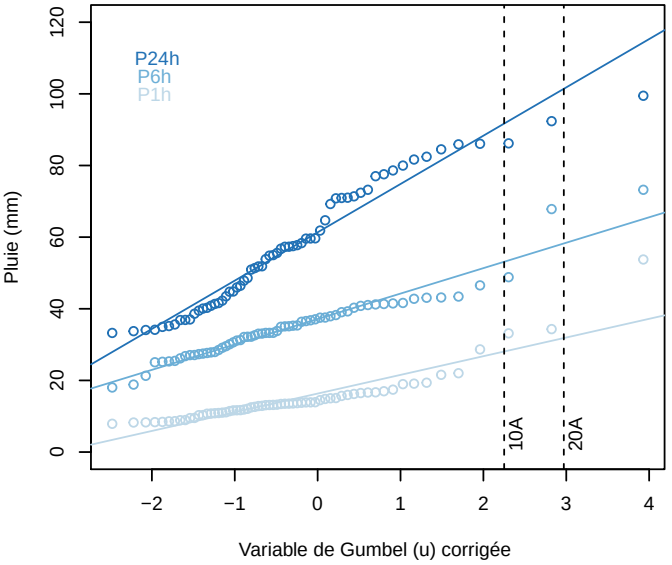
Torrent :RUISSEAU DES ARCHES
Commune: CHICHILIANNE (38)
ID: ID57



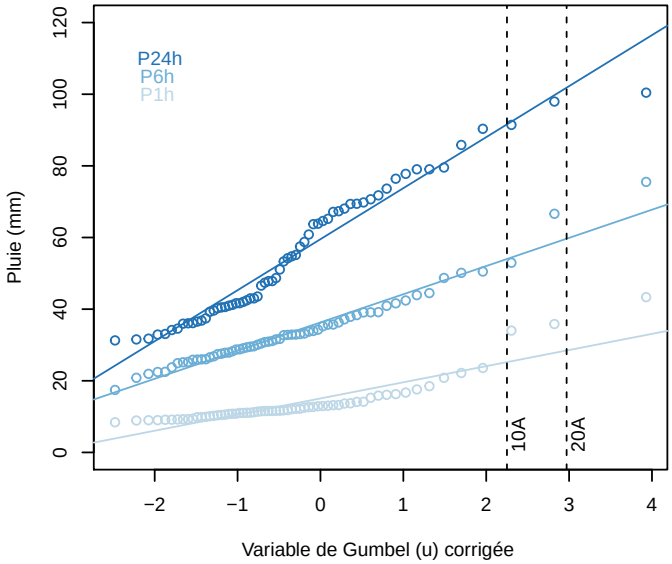
Torrent :RUISSEAU DE L'ARCHAT
Commune: ST−MAURICE−EN−TRIEVES (38)
ID: ID164



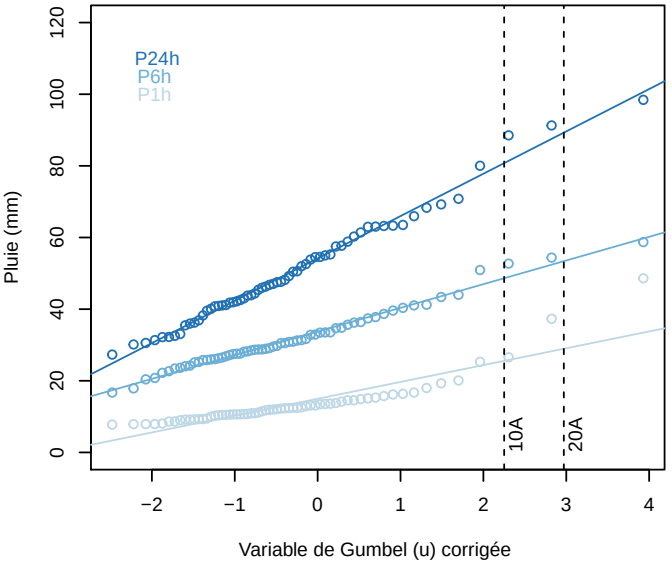
Torrent :LES SAGNES
Commune: TREMINIS (38)
ID: ID186



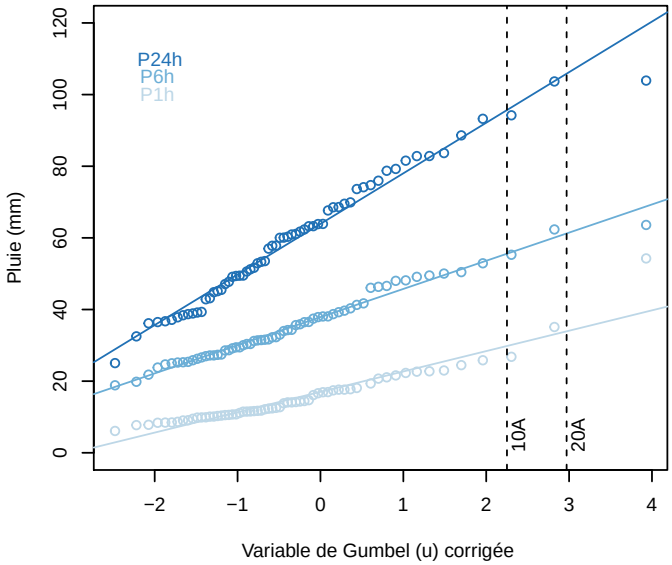
Torrent :L'EBRON
Commune: TREMINIS (38)
ID: ID185



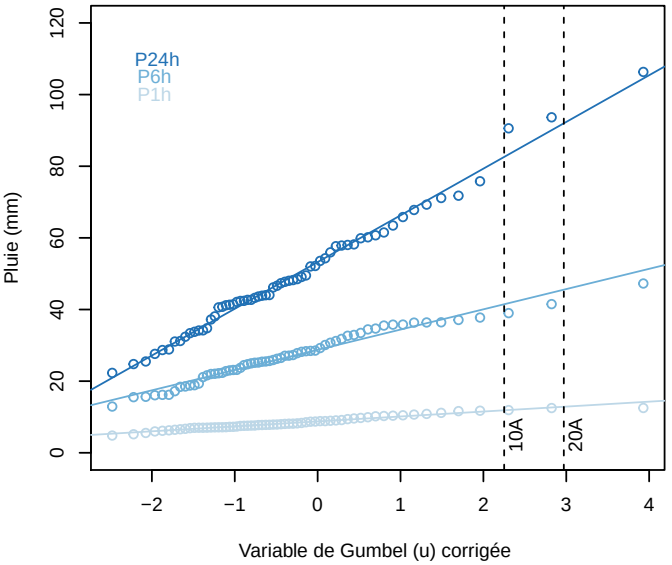
Torrent :RUISSEAU DE CHALANNE
Commune: CORDEAC (38)
ID: ID65



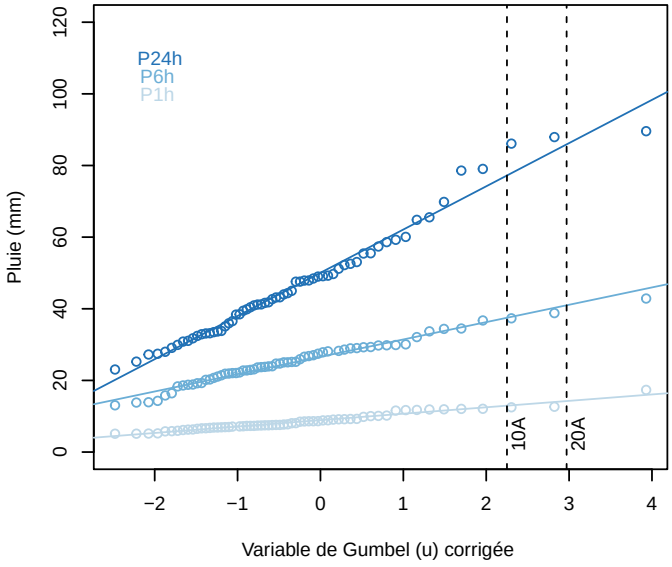
Torrent :TORRENT DE BONSECOURS
Commune: VENTAVON (5)
ID: ID20



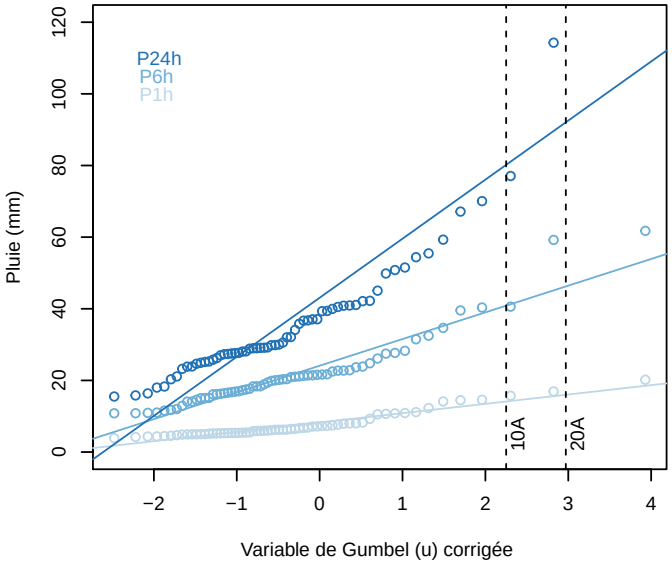
Torrent :RAVIN DE LA RUINE
Commune: LA ROCHE−DE−RAME (5)
ID: ID15



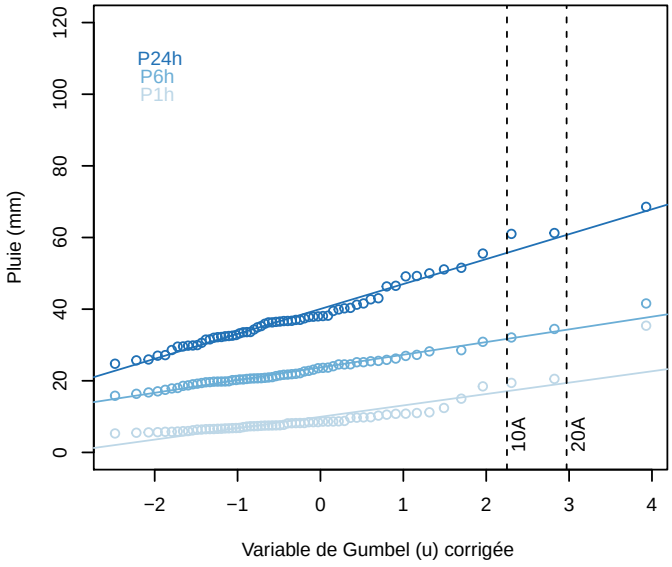
Torrent :LE VERDAREL
Commune: ST−CHAFFREY (5)
ID: ID18



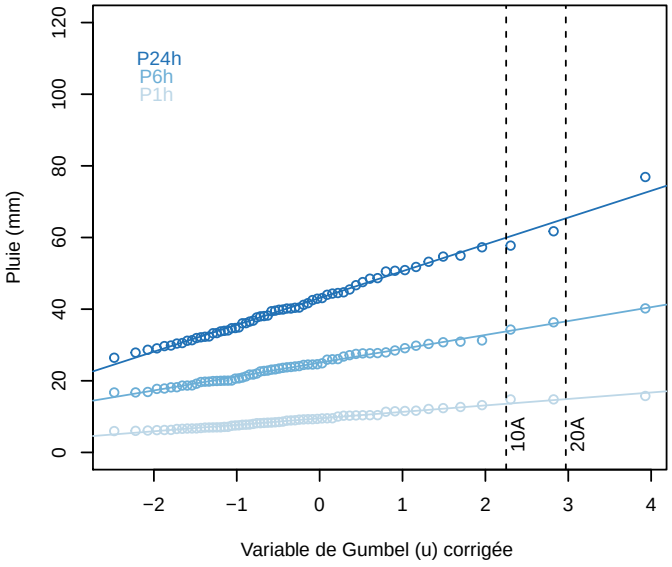
Torrent :TORRENT DU BEY OU RUISSEAU DE BANDY
Commune: TERMIGNON (73)
ID: ID272



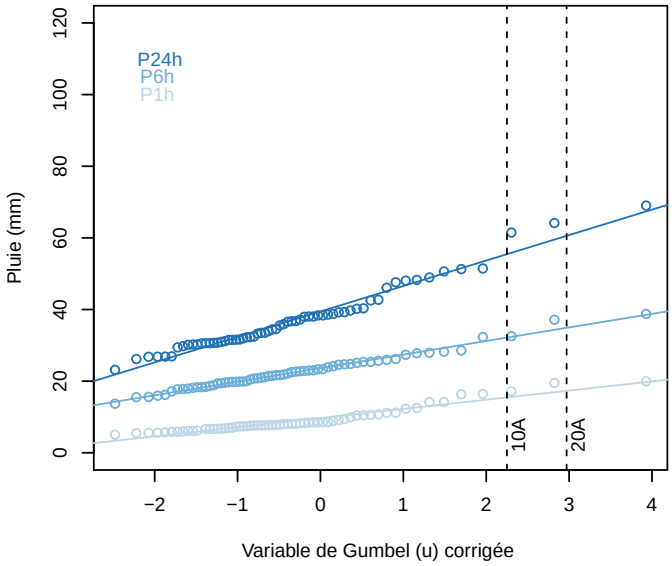
Torrent :CLARET
Commune: SAINT−JULIEN−DE−MONTDENIS (73)
ID: ID258



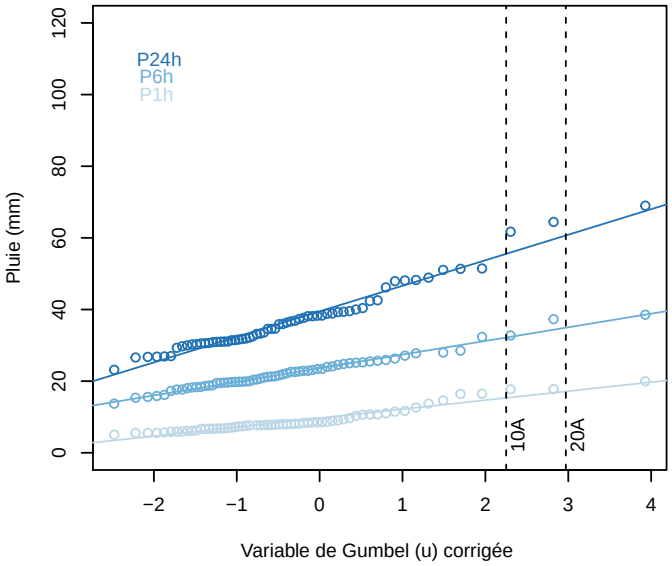
Torrent :LA RAVOIRE
Commune: PONTAMAFREY (73)
ID: ID246



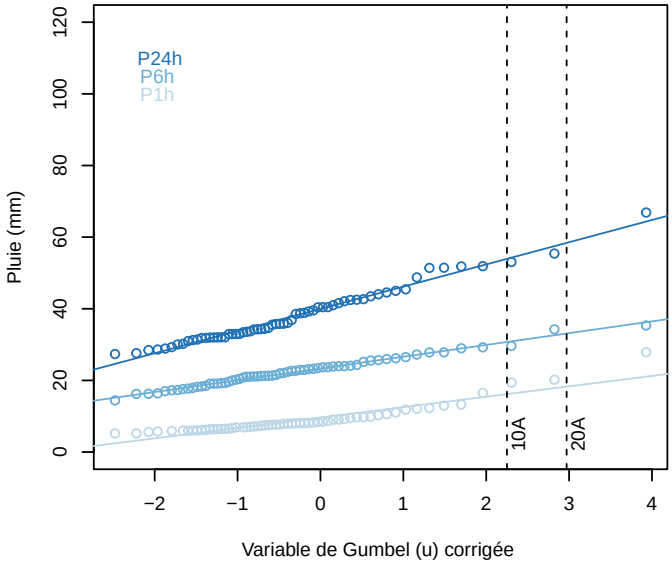
Torrent :TORRENT DU ST−BERNARD OU ST−MARTIN (AMON
Commune: SAINT−MARTIN−DE−LA−PORTE (73)
ID: ID261



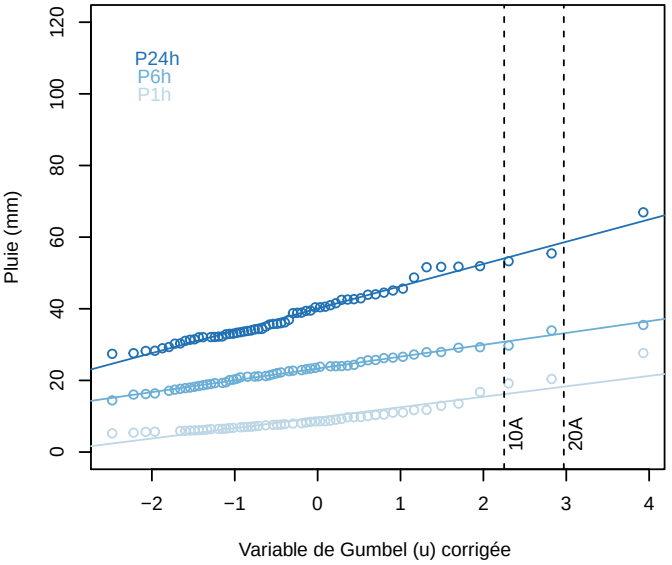
Torrent :TORRENT DU ST−BERNARD OU ST−MARTIN (AVAL
Commune: SAINT−MARTIN−DE−LA−PORTE (73)
ID: ID262



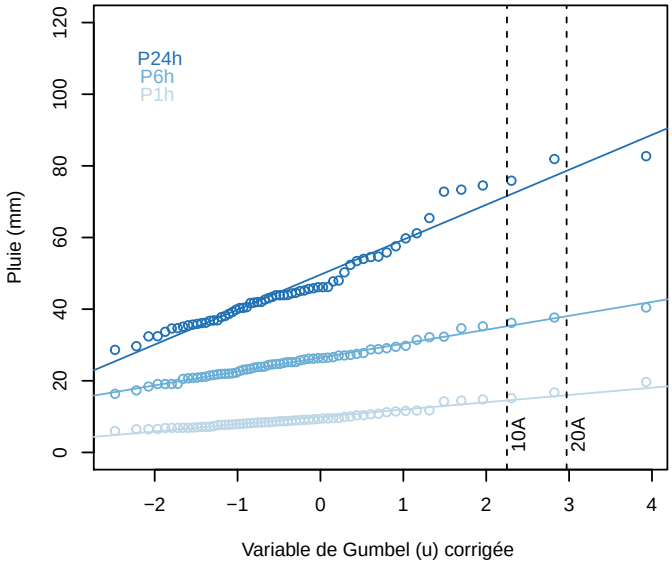
Torrent :COMBE PAILLARDE (AMONT)
Commune: SAINT−JEAN−DE−MAURIENNE (73)
ID: ID255



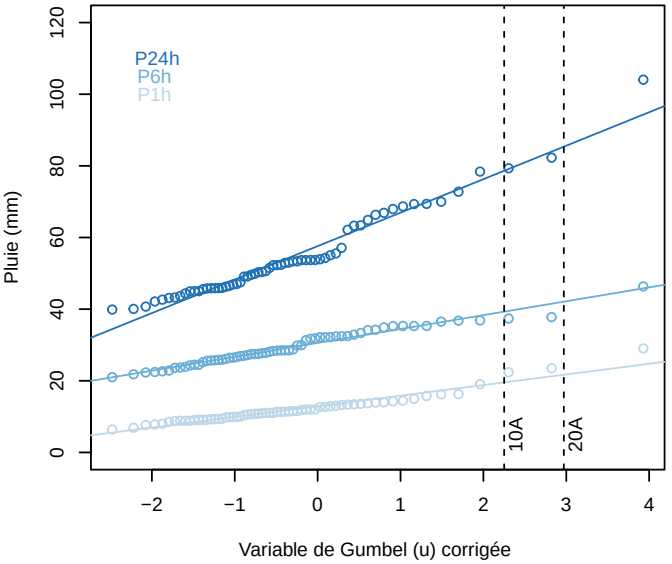
Torrent :COMBE VARCIN (ET COMBE CHENAL)
Commune: SAINT−JEAN−DE−MAURIENNE (73)
ID: ID257



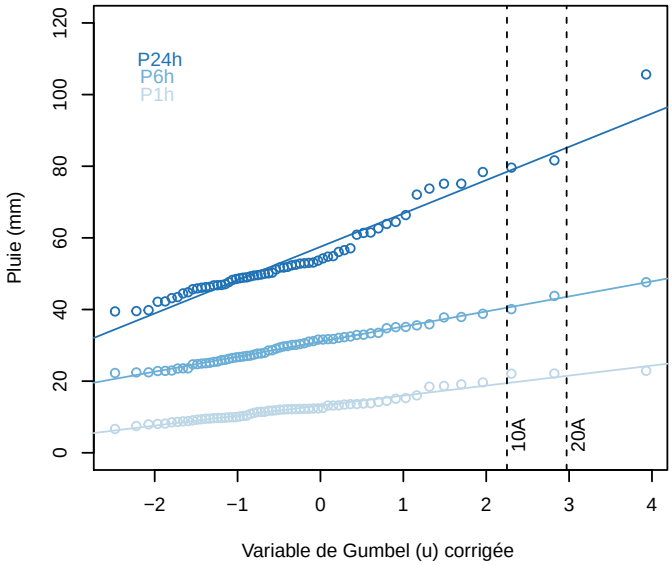
Torrent :LE MERDEREL
Commune: AIGUEBLANCHE (73)
ID: ID201



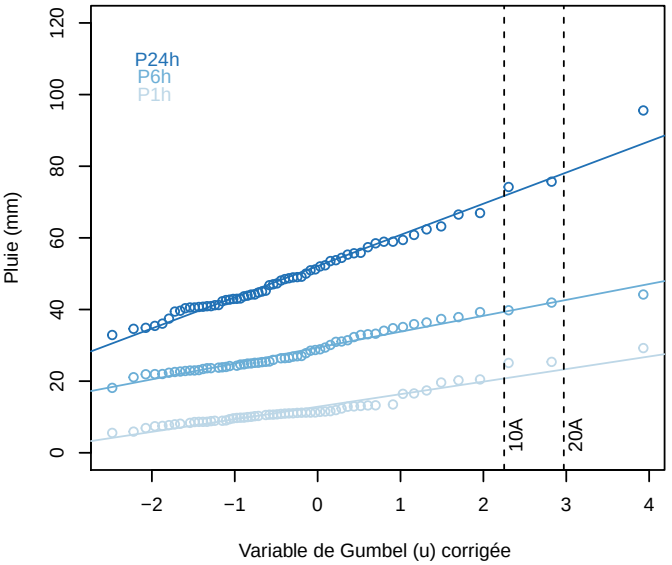
Torrent :LE NANT PUGIN
Commune: UGINE (73)
ID: ID279



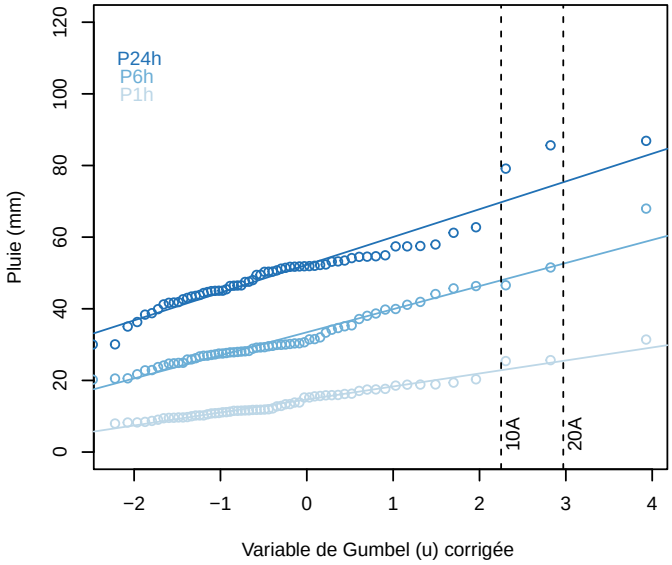
Torrent :LE NANT CROEX
Commune: UGINE (73)
ID: ID278



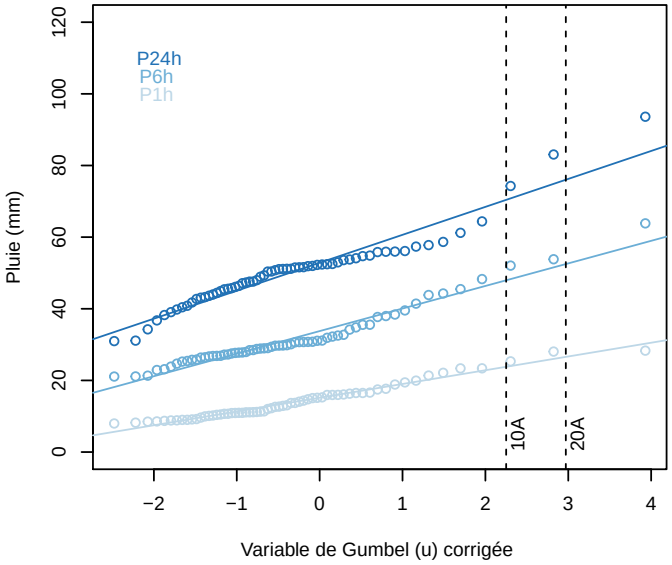
Torrent :LE CRETET
Commune: AITON (73)
ID: ID202



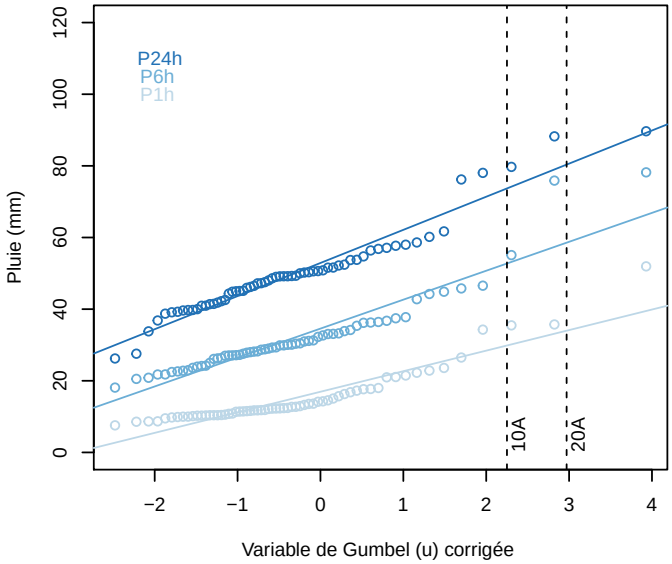
Torrent :CHAVANNES
Commune: GONCELIN (38)
ID: AS6



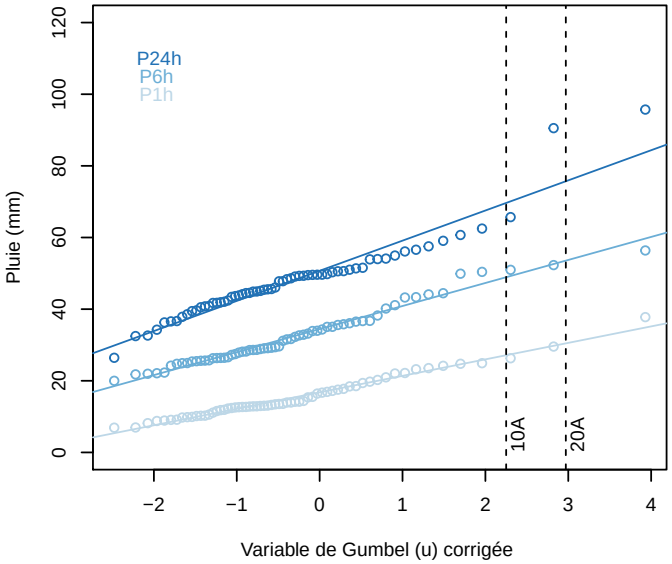
Torrent :ROTI
Commune: LE CHEYLAS (38)
ID: AS5



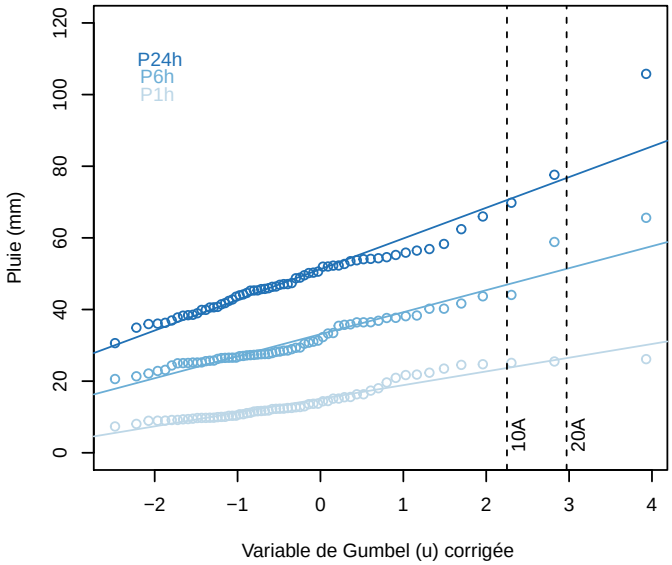
Torrent :HURTIERES
Commune: LA PIERRE (38)
ID: AS10



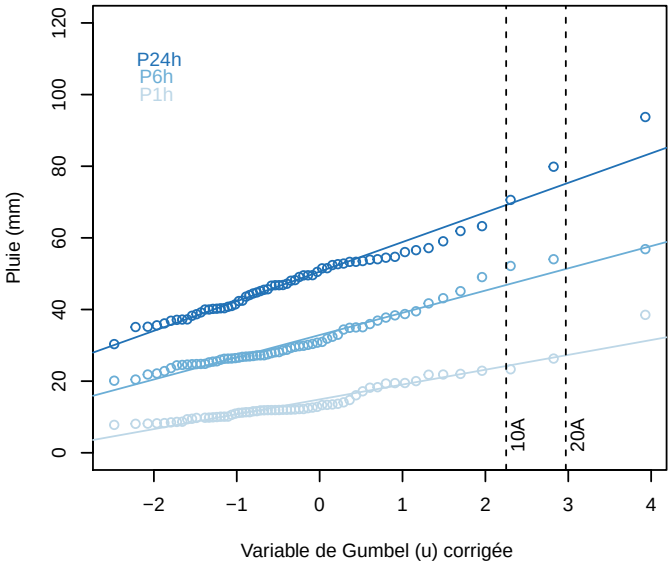
Torrent :VERSOUD
Commune: LE VERSOUD (38)
ID: AS12



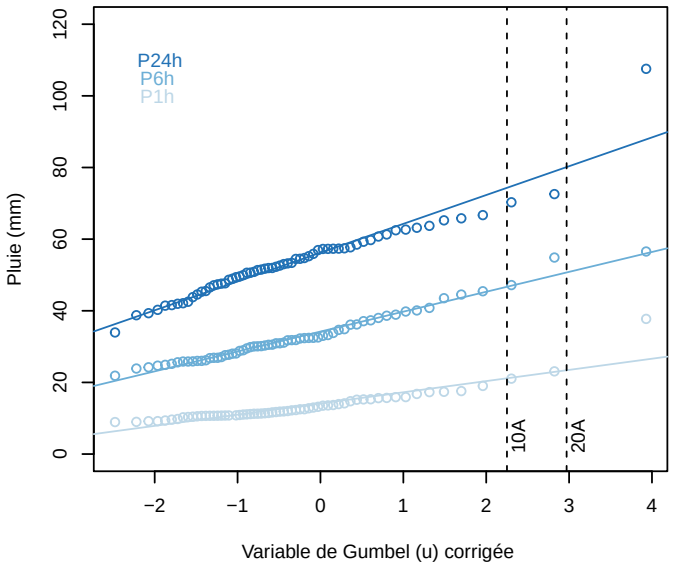
Torrent :VILLARD NOIR
Commune: PONTCHARRA (38)
ID: AS16



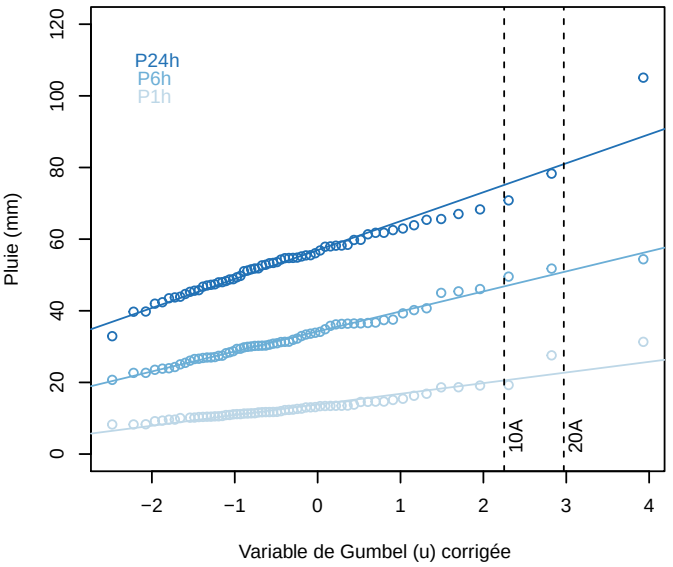
Torrent :RUISSEAU DE LA PERRIERE
Commune: PONTCHARRA (38)
ID: AS7



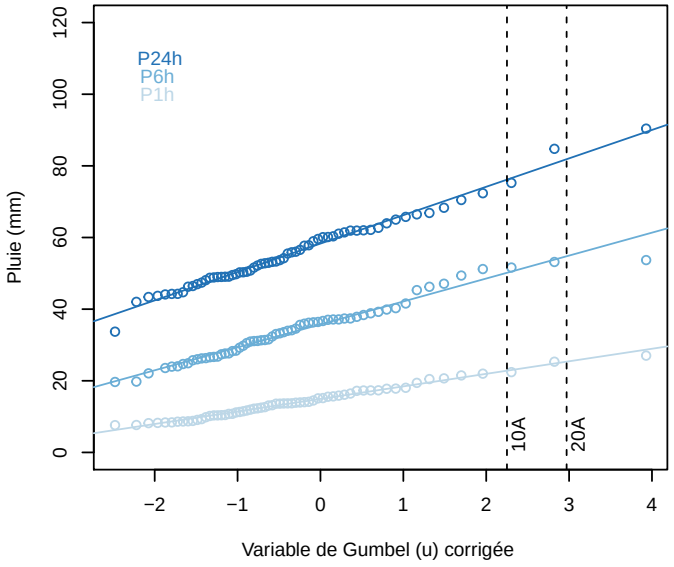
Torrent :TORRENT DU BRESSON
Commune: STE−MARIE−DU−MONT (38)
ID: ID140



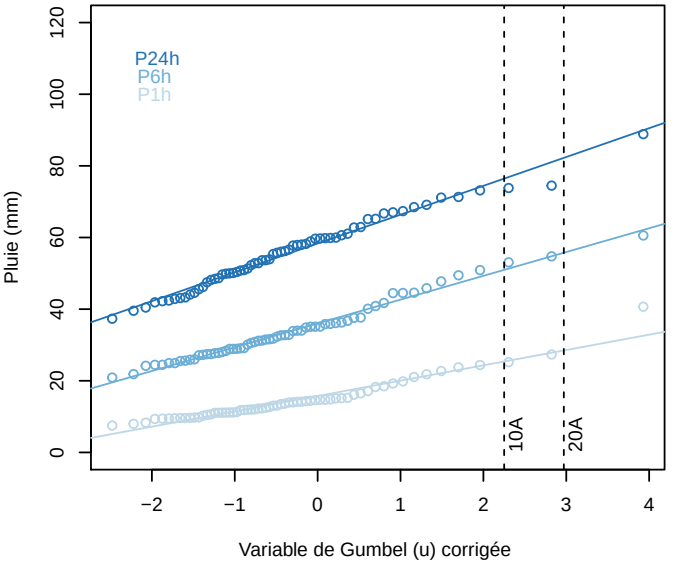
Torrent :TORRENT DU BRESSON
Commune: ST−VINCENT−DE−MERCUZE (38)
ID: ID180



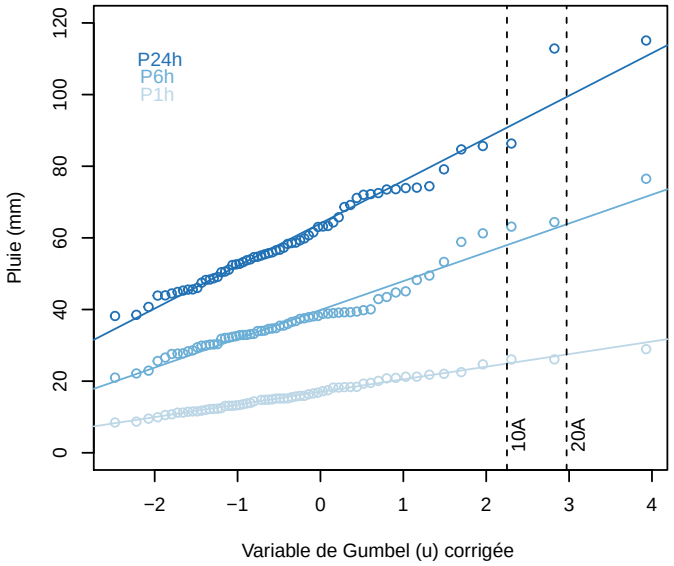
Torrent :TORRENT DU MANIVAL
Commune: ST−ISMIER (38)
ID: ID151



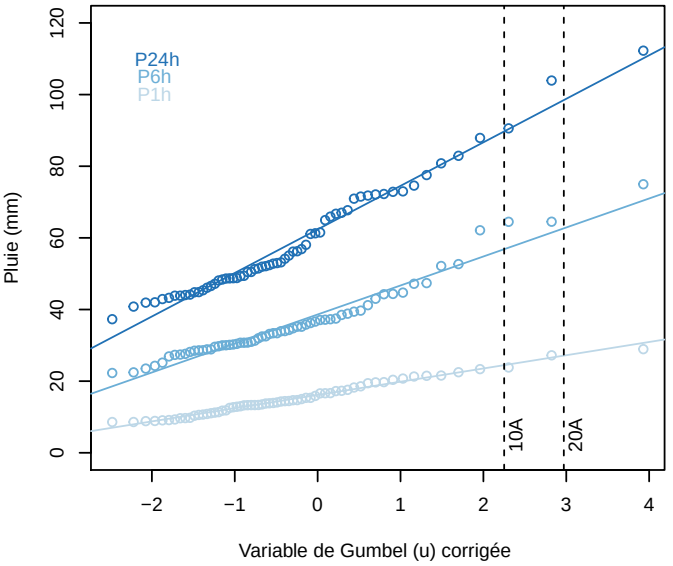
Torrent :RUISSEAU DE GORGETTE (1)
Commune: ST−PANCRASSE (38)
ID: ID171



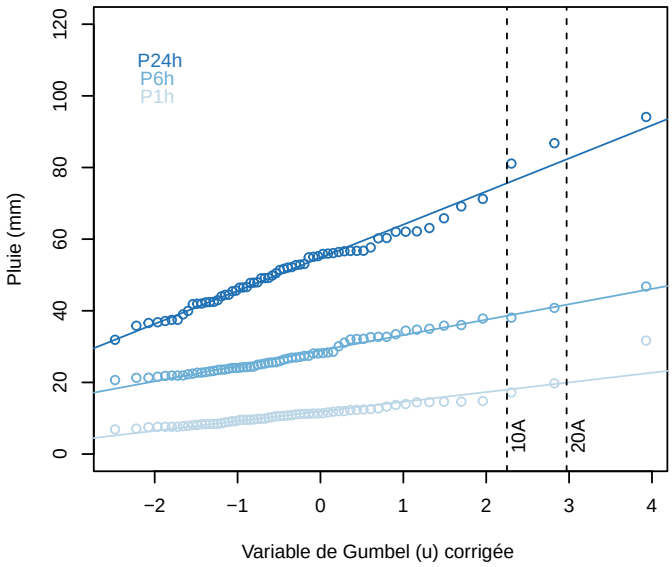
Torrent :MALSOUCHE
Commune: VOREPPE (38)
ID: ID200



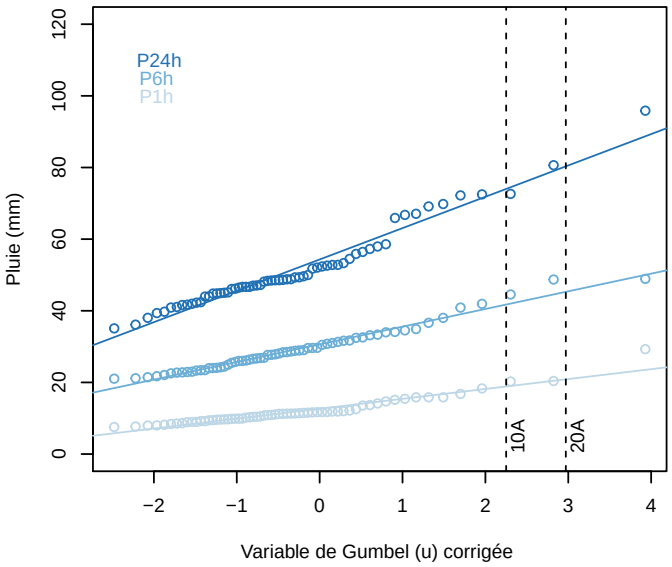
Torrent :LANFREY
Commune: FONTANIL−CORNILLON (38)
ID: AS14



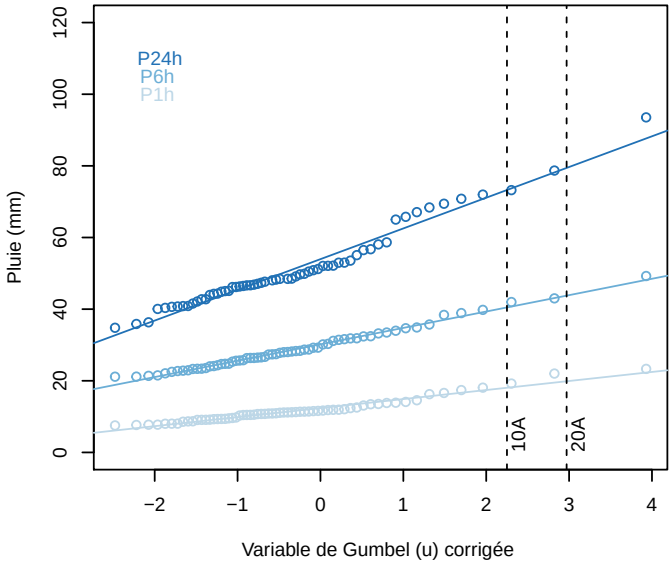
Torrent :TORRENT DE LA COMBAZ
Commune: NOTRE−DAME−DES−MILLIERES (73)
ID: ID242



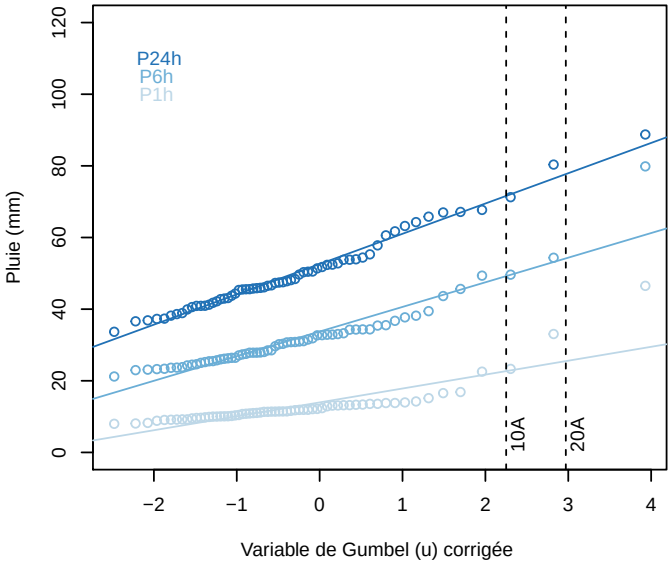
Torrent :LE PIEZAN (AMONT)
Commune: CONS−STE−COLOMBE (74)
ID: ID286



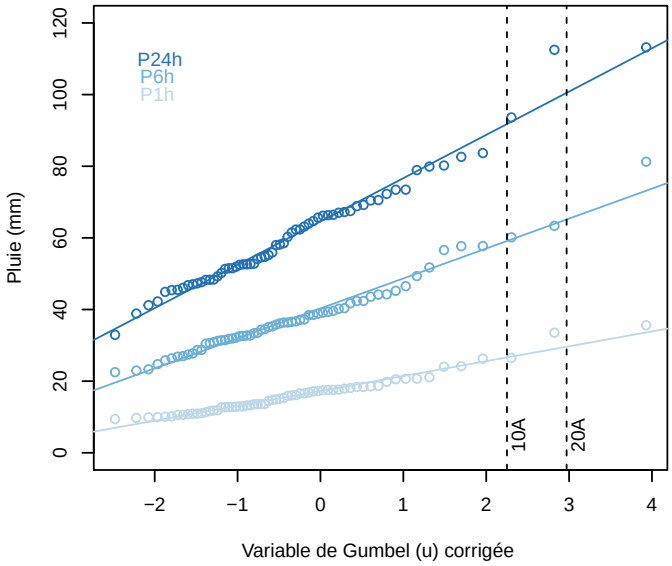
Torrent :LE PIEZAN (AVAL)
Commune: CONS−STE−COLOMBE (74)
ID: ID287



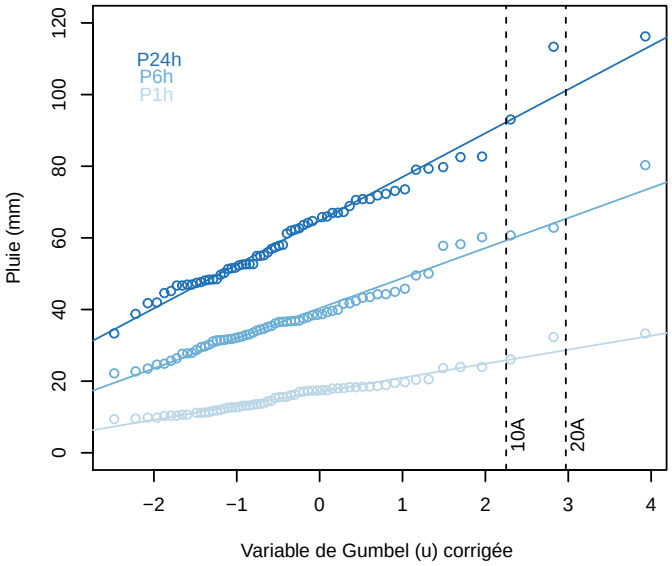
Torrent :MALADIERE
Commune: LA BUISSIERE (38)
ID: AS4



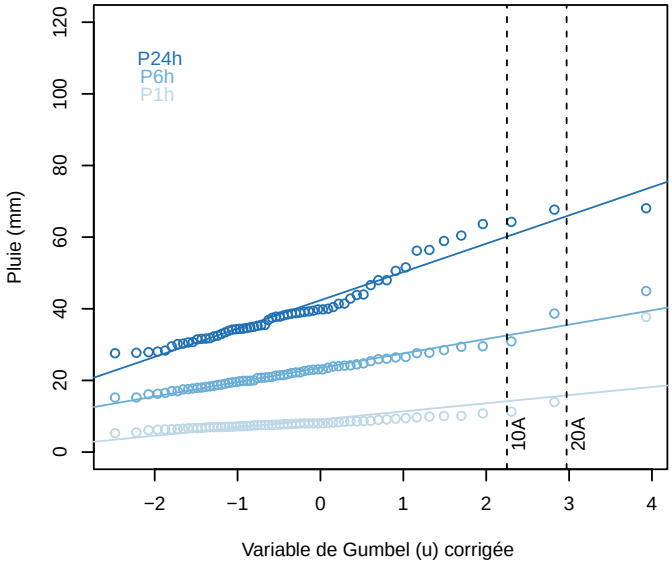
Torrent :LA ROIZE
Commune: VOREPPE (38)
ID: ID199



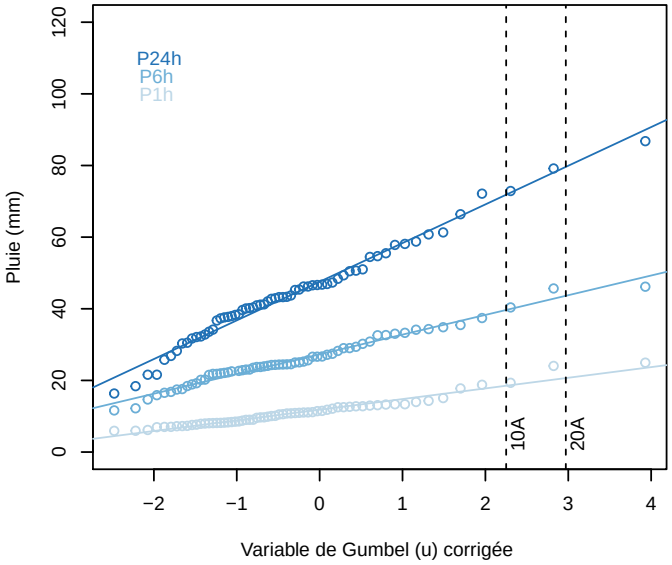
Torrent :ROIZE
Commune: VOREPPE (38)
ID: AS21



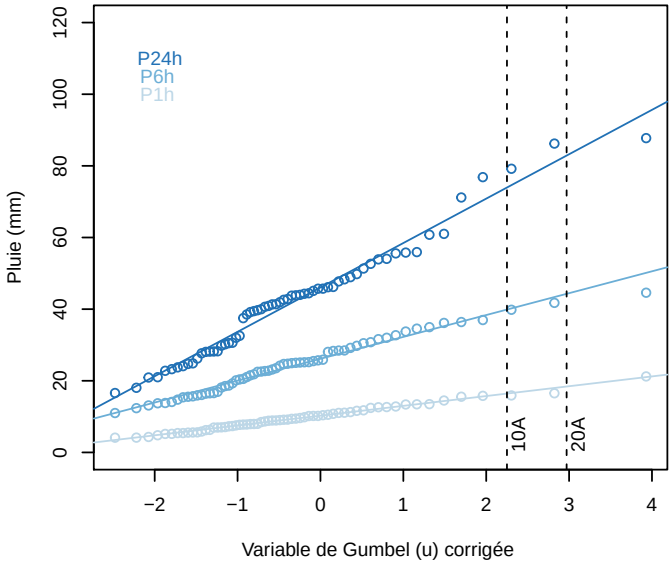
Torrent :LE RECLAZ
Commune: CHAMPAGNY EN VANOISE (73)
ID: ID219



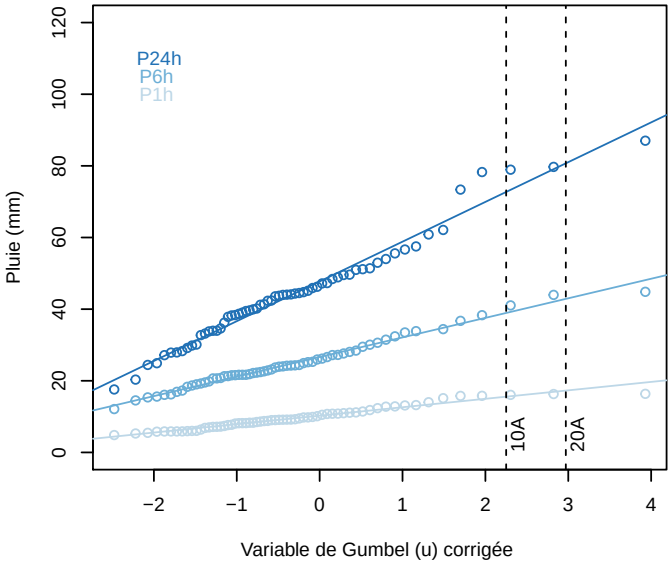
Torrent :LE BOURGEAT
Commune: LES HOUCHES (74)
ID: ID326



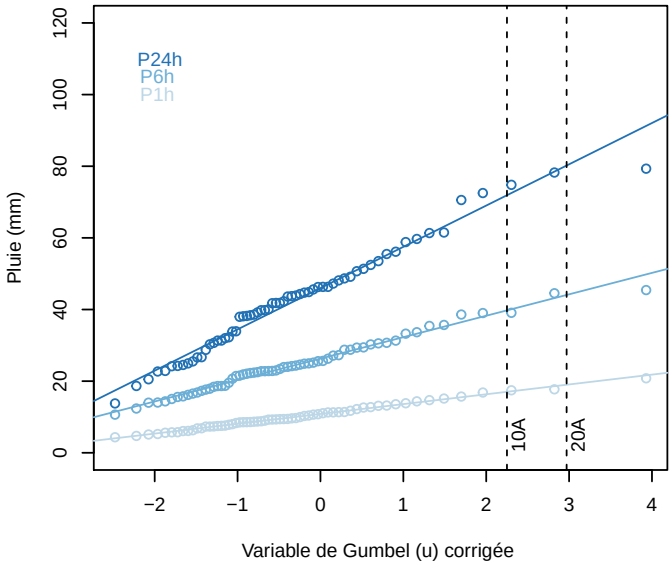
Torrent :BOSSONS
Commune: CHAMONIX (74)
ID: SMA2



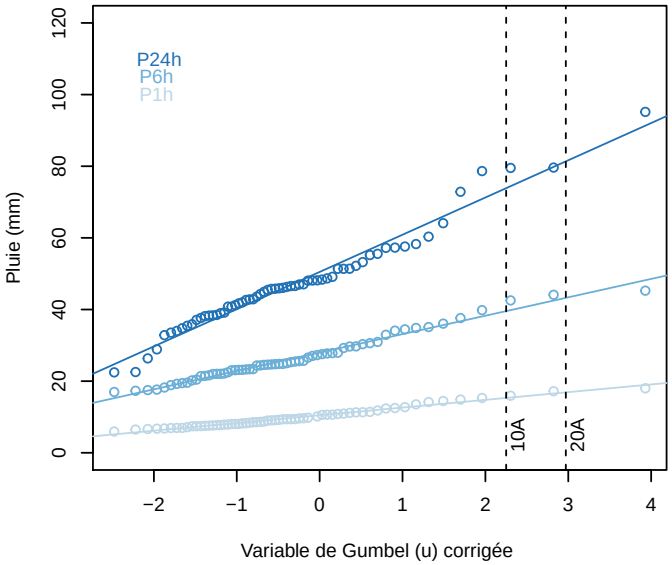
Torrent :LA CREUSAZ
Commune: CHAMONIX−MONT−BLANC (74)
ID: ID323



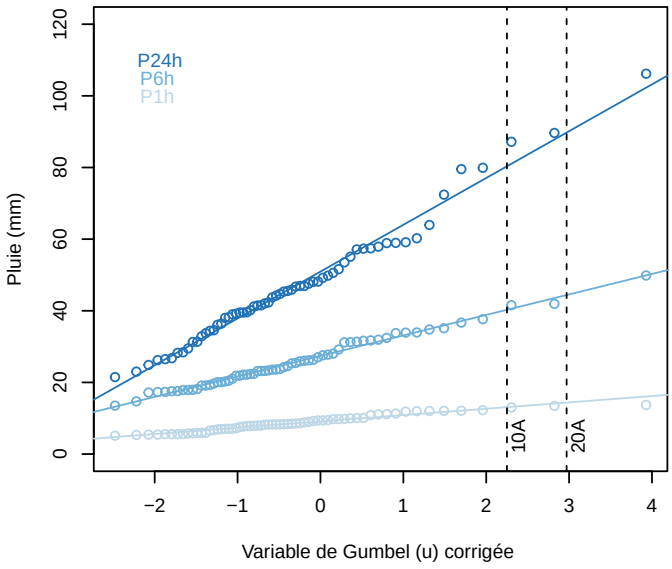
Torrent :TACONNAZ
Commune: CHAMONIX−MONT−BLANC (69)
ID: ID322



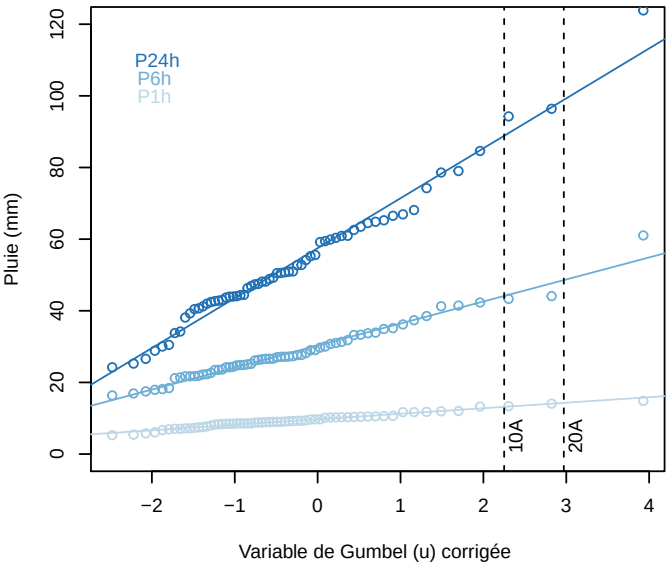
Torrent :LES FAVRANDS
Commune: CHAMONIX−MONT−BLANC (74)
ID: ID320



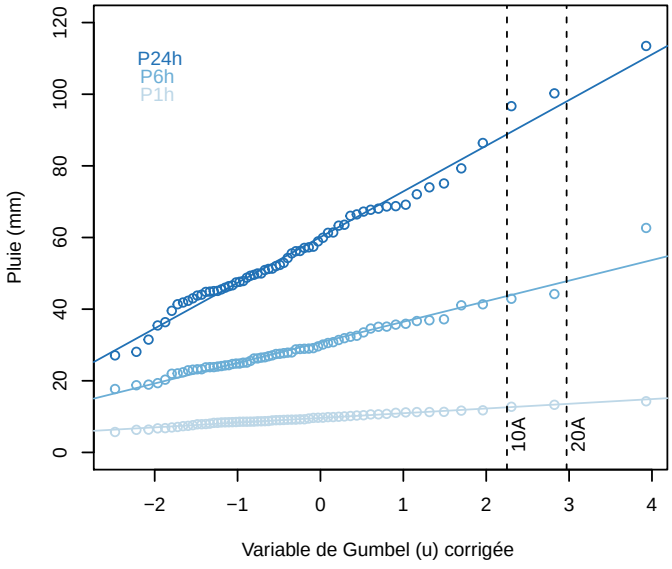
Torrent :ARVEYRON DE LA MER DE GLACE
Commune: CHAMONIX−MONT−BLANC (74)
ID: ID319



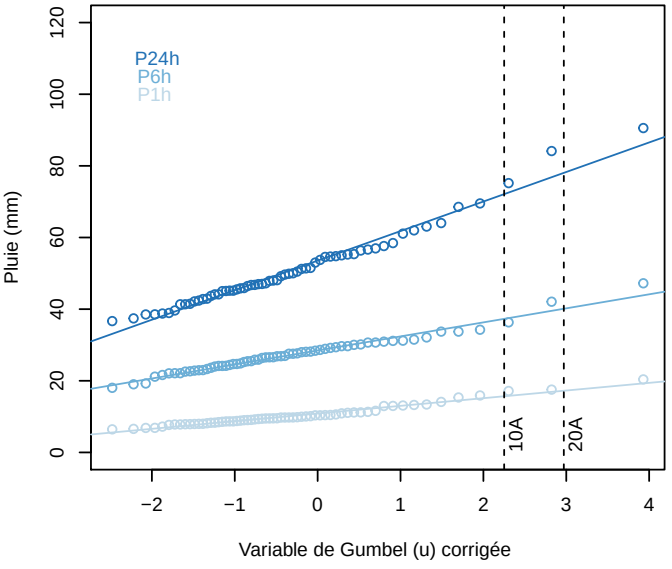
Torrent :ARVEYRON ARGENTIERE
Commune: CHAMONIX (74)
ID: ID501



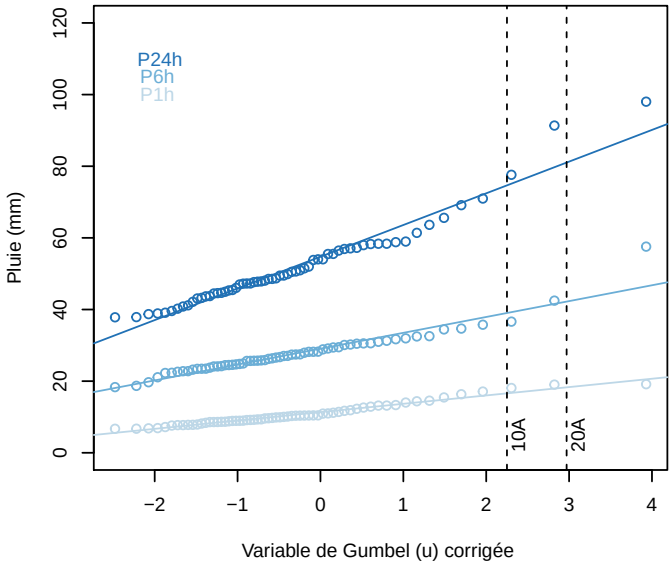
Torrent :ARVE
Commune: CHAMONIX (74)
ID: SMA1



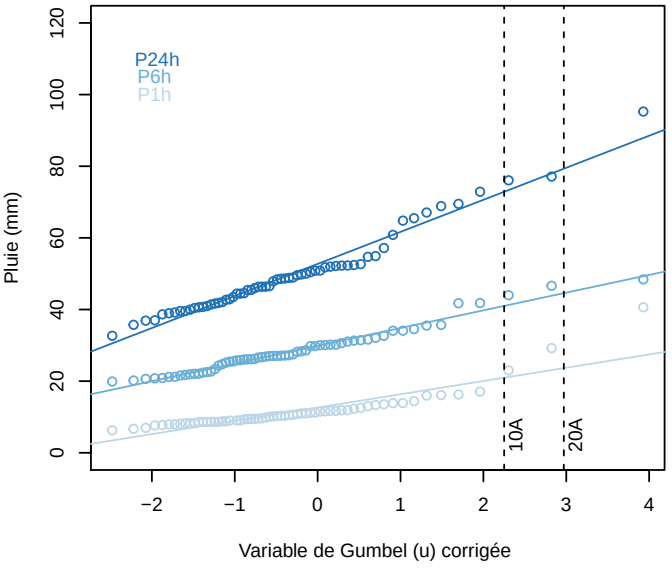
Torrent :LE NANT BORDON
Commune: PASSY (74)
ID: ID292



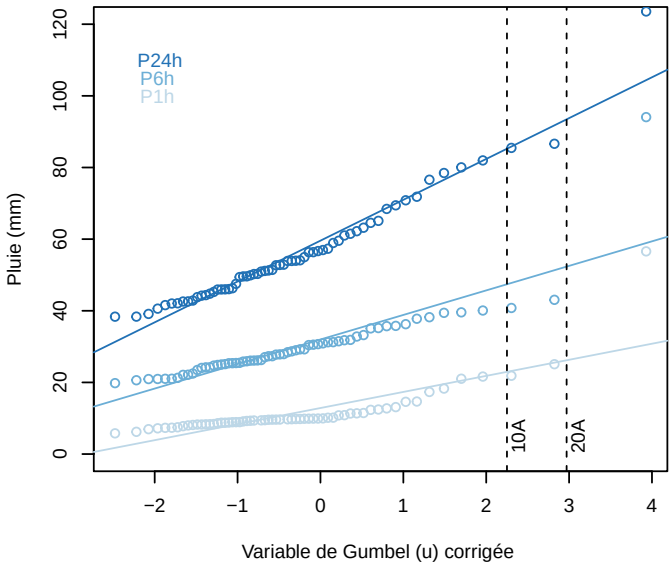
Torrent :LE NANT BORDON (2)
Commune: PASSY (74)
ID: ID329



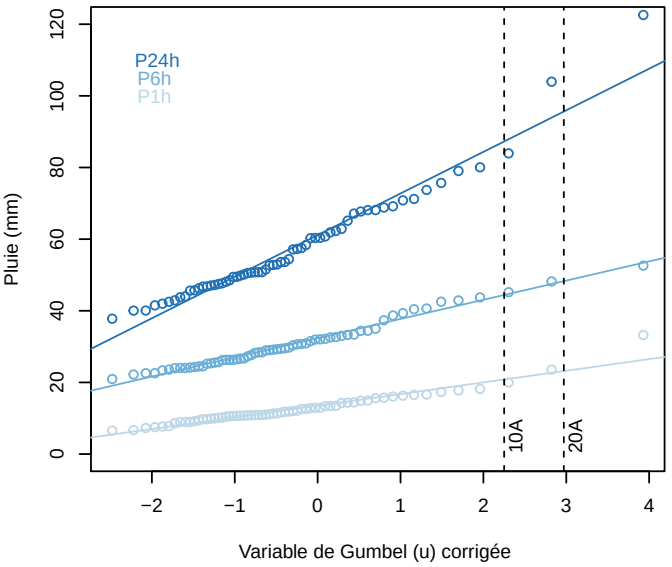
Torrent :FERNEY
Commune: SAINT GERVAIS LES BAINS (74)
ID: SMA3



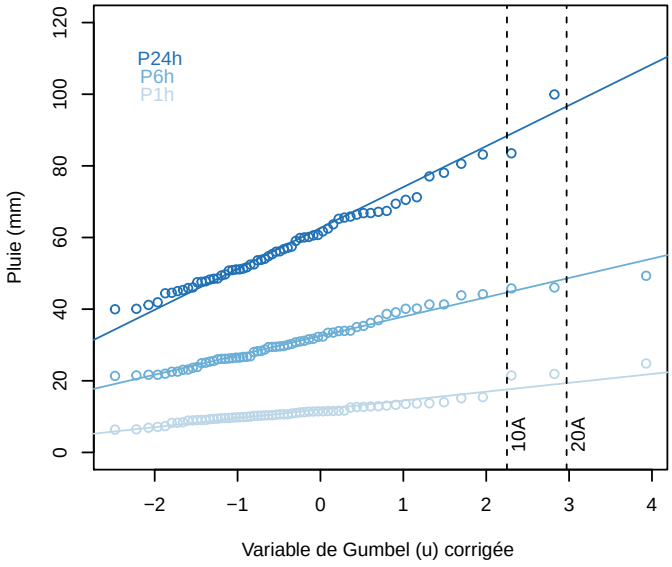
Torrent :NANT SEC
Commune: SIXT−FER−A−CHEVAL (74)
ID: ID305



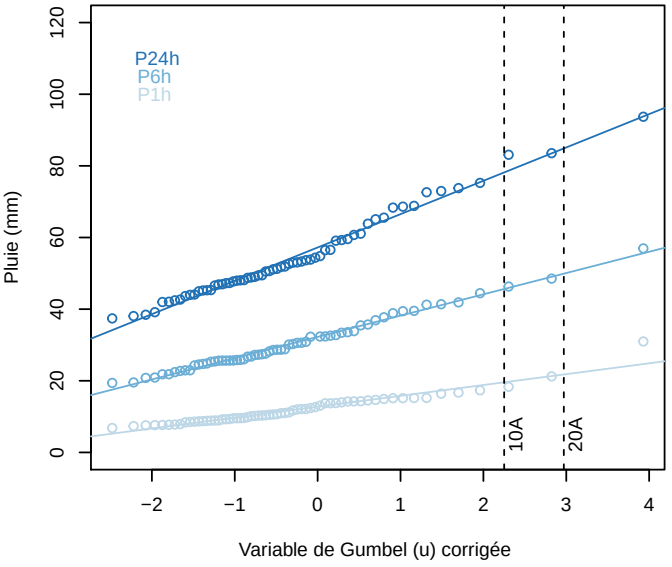
Torrent :RUISSEAU DE BEROUZE
Commune: SAMOËNS (74)
ID: ID299



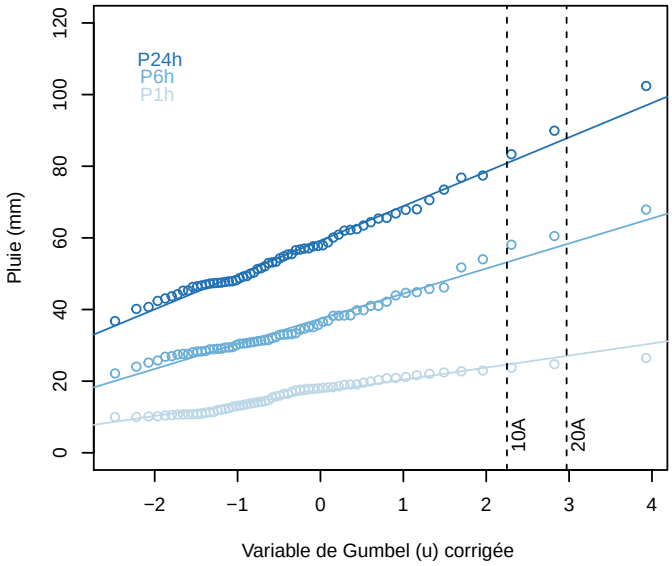
Torrent :LE CLEVIEUX
Commune: SAMOËNS (74)
ID: ID300



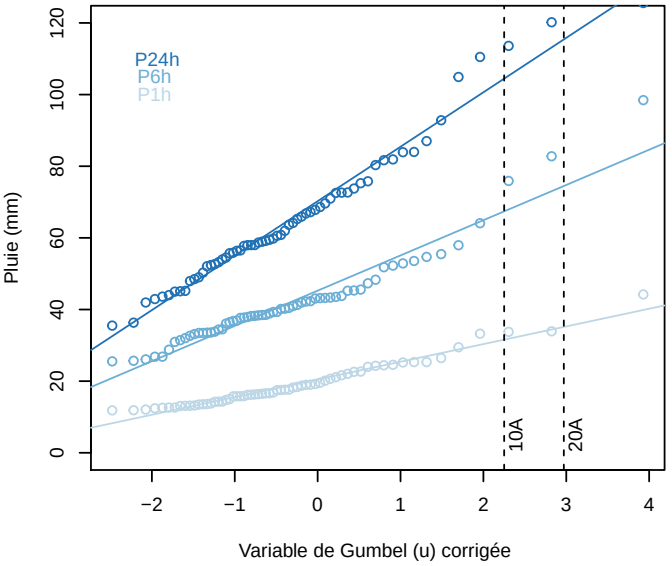
Torrent :TORRENT DE DORJON
Commune: MEGEVETTE (74)
ID: ID308



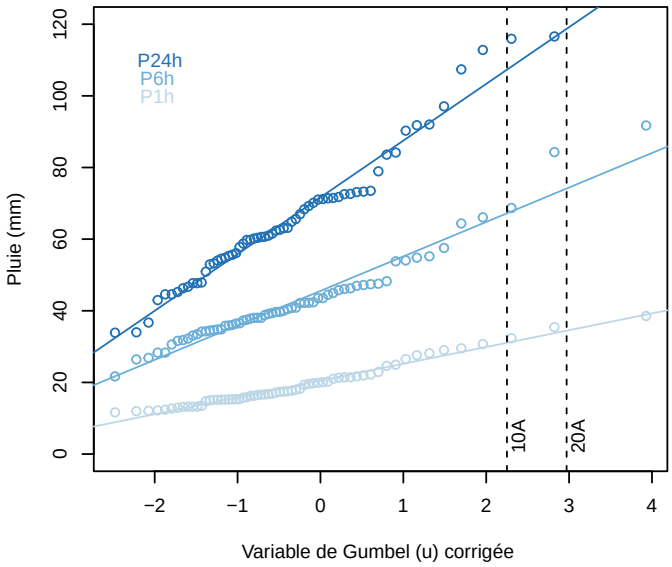
Torrent :LE REVERS
Commune: MERY (73)
ID: ID238



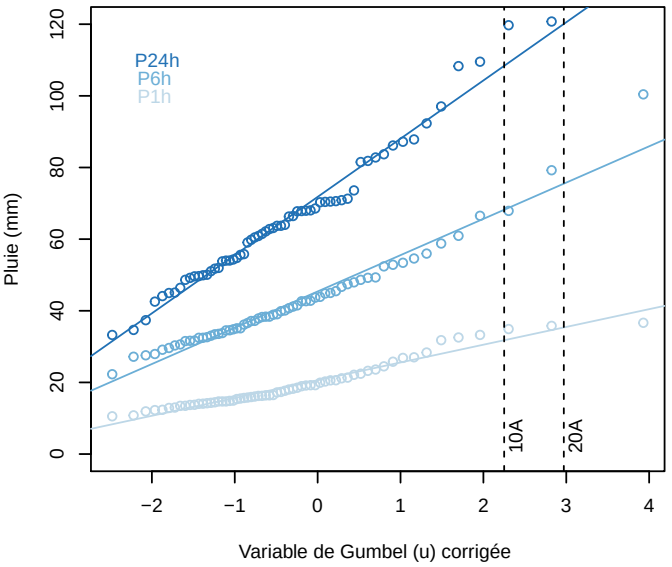
Torrent :RENAUDIERE
Commune: ST−QUENTIN−SUR−ISERE (38)
ID: AS33



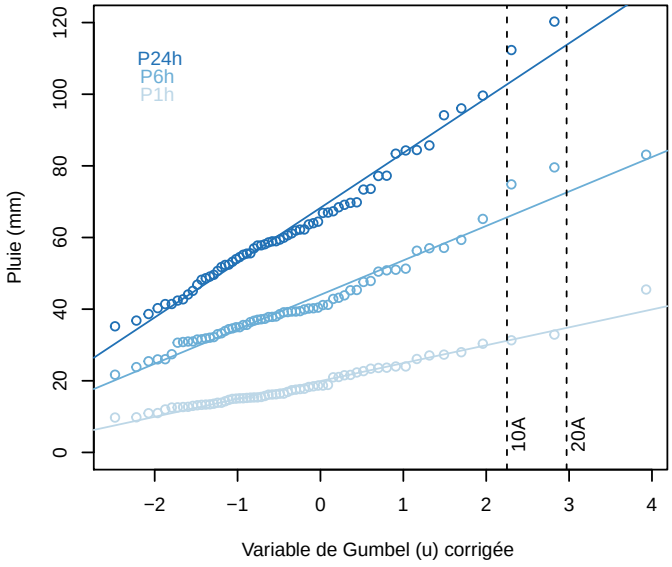
Torrent :ROMANETIERE
Commune: SAINT−QUENTIN−SUR−ISÈRE (38)
ID: AS32



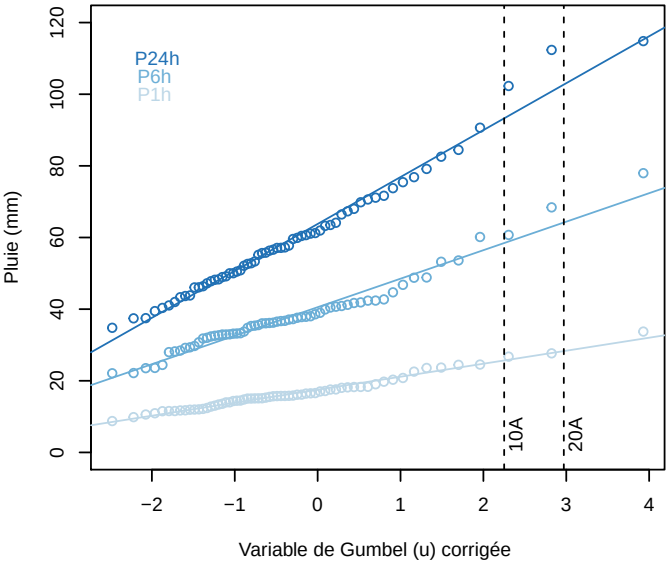
Torrent :MARTINET
Commune: SAINT−QUENTIN−SUR−ISÈRE (38)
ID: AS24



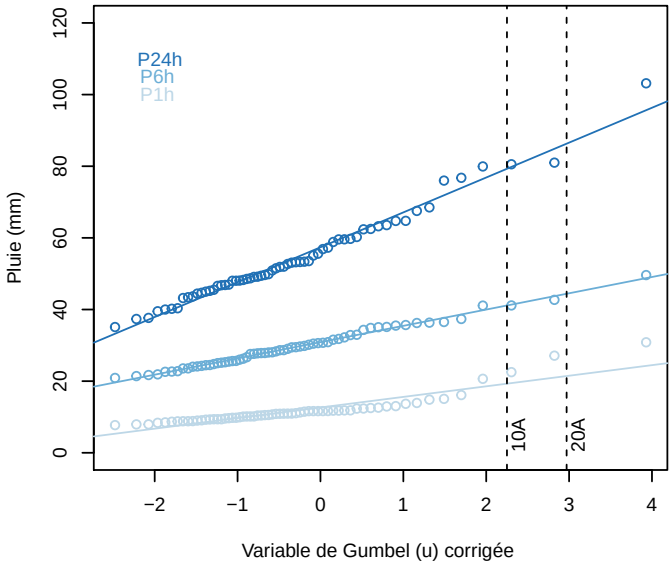
Torrent :VOROIZE
Commune: VEUREY (38)
ID: AS23



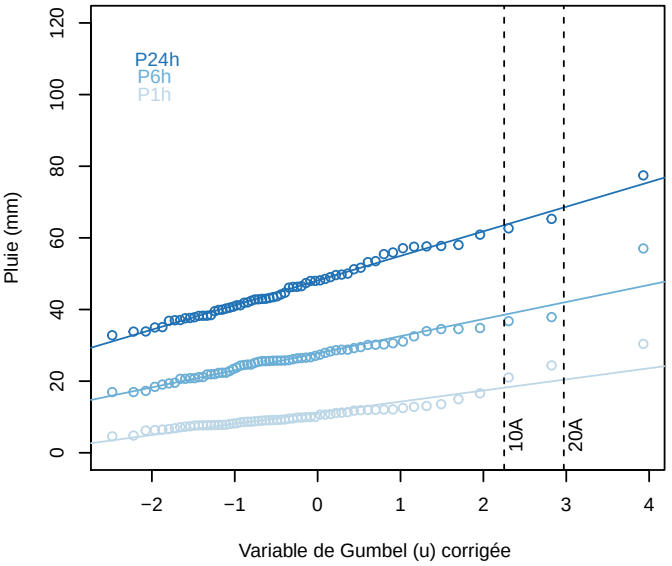
Torrent :EYRARD
Commune: NOYAREY (37)
ID: ID122

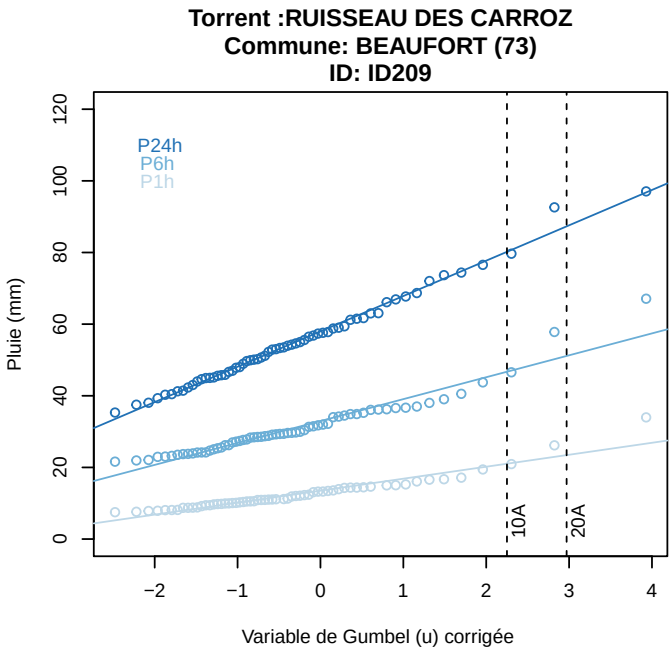


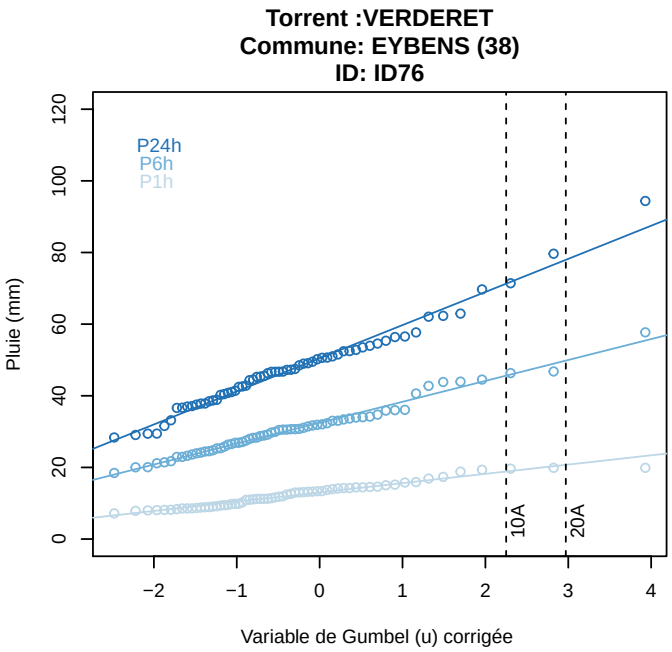
Torrent :LE NANT POTTIER
Commune: ALBERTVILLE (73)
ID: ID205

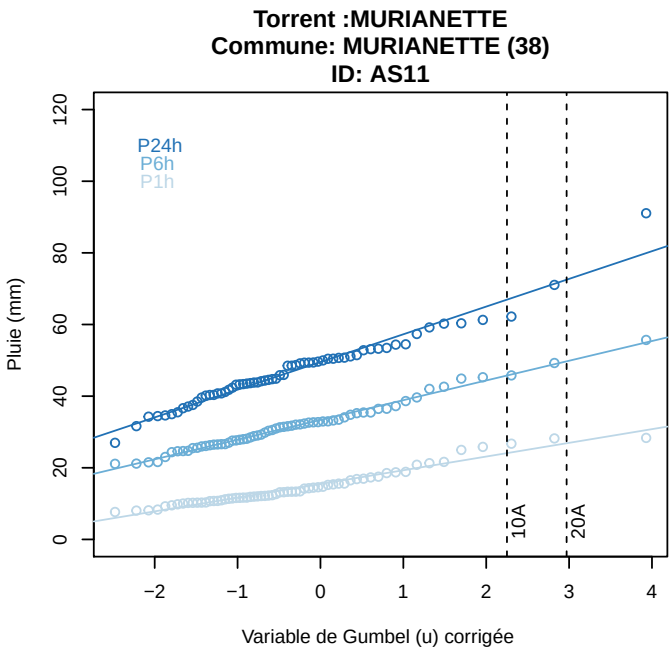


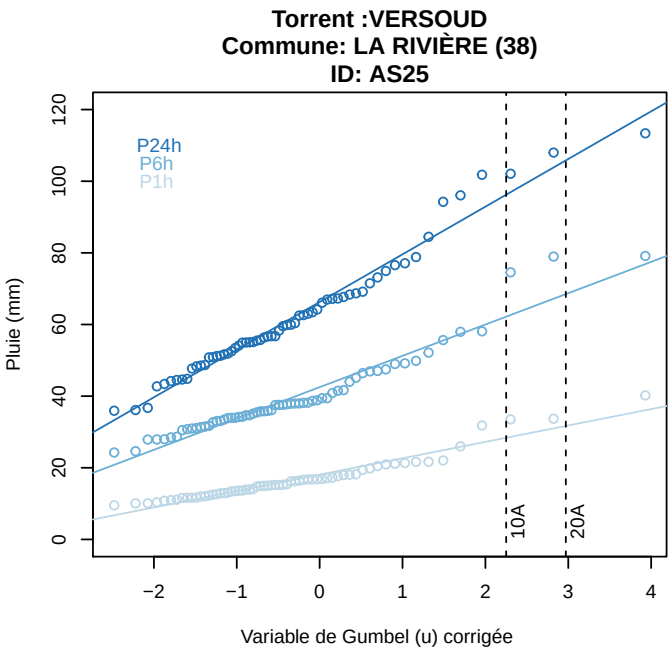
Torrent :TORRENT DE RENINGE
Commune: SALLANCHES (74)
ID: ID296

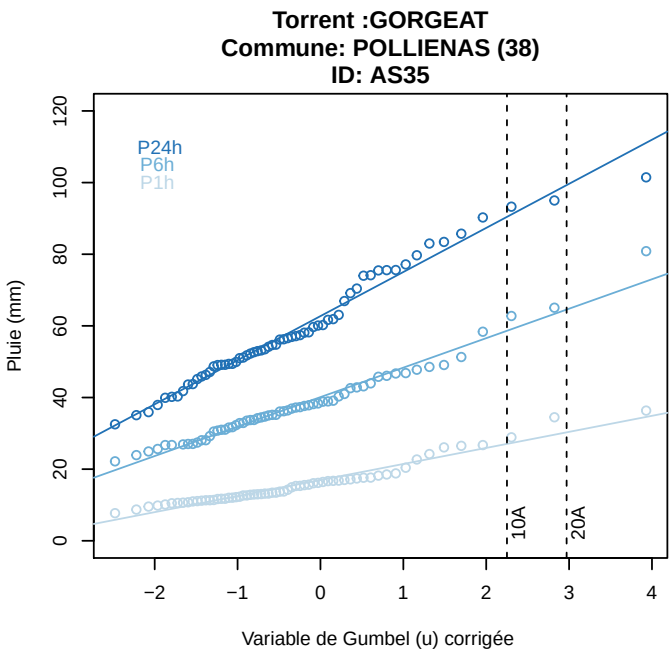


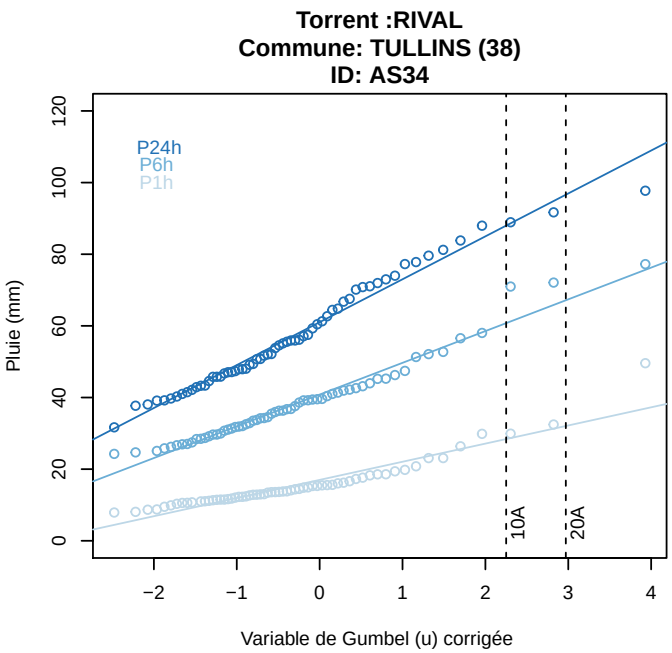

Torrent :RUISSEAU DES CARROZ
Commune: BEAUFORT (73)
ID: ID209
P24h
P6h
P1h
Pluie (mm)
Variable de Gumbel (u) corrigée
10A
20A


Torrent :VERDERET
Commune: EYBENS (38)
ID: ID76
P24h
P6h
P1h
Pluie (mm)
Variable de Gumbel (u) corrigée
10A
20A

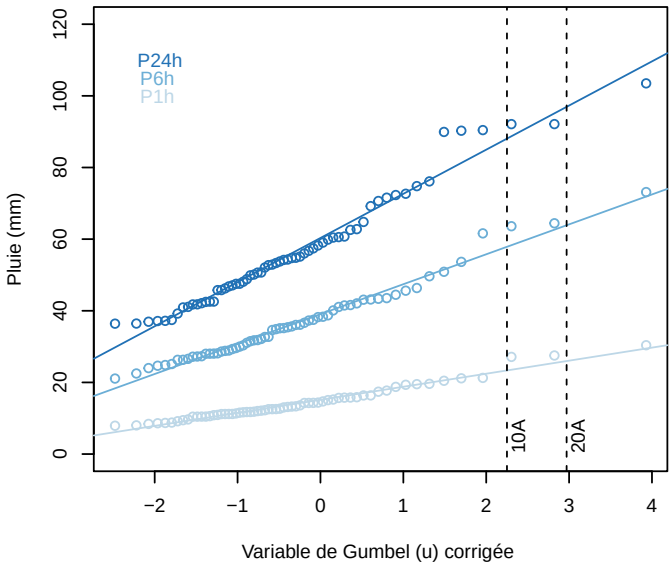

Torrent :MURIANETTE
Commune: MURIANETTE (38)
ID: AS11
P24h
P6h
P1h
Pluie (mm)
Variable de Gumbel (u) corrigée
10A
20A


Torrent :VERSOUD
Commune: LA RIVIÈRE (38)
ID: AS25
P24h
P6h
P1h
Pluie (mm)
Variable de Gumbel (u) corrigée
10A
20A

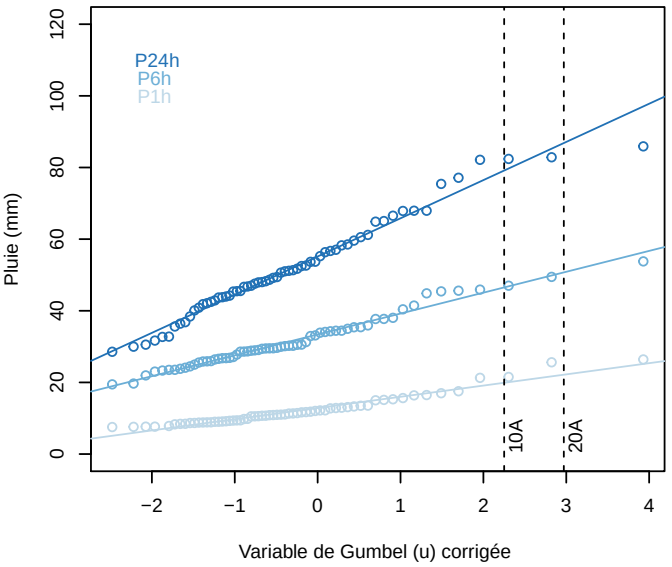

Torrent :GORGEAT
Commune: POLLIENAS (38)
ID: AS35
P24h
P6h
P1h
Pluie (mm)
Variable de Gumbel (u) corrigée
10A
20A


Torrent :RIVAL
Commune: TULLINS (38)
ID: AS34
P24h
P6h
P1h
Pluie (mm)
Variable de Gumbel (u) corrigée
10A
20A

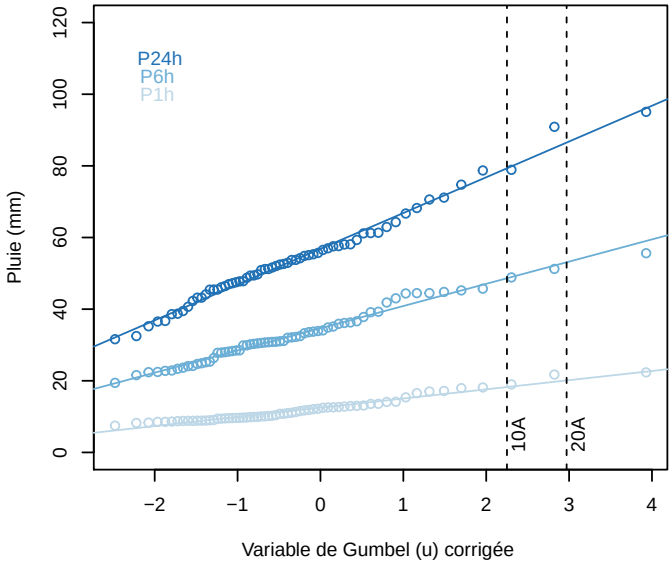
Torrent :OLON
Commune: VOUREY (38)
ID: AS31



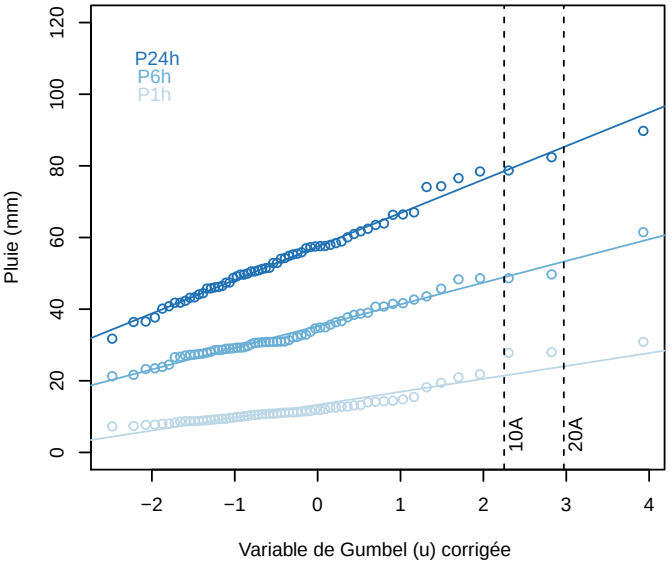
Torrent :LE TREUIL
Commune: LE BOURG D'OISANS (38)
ID: ID98



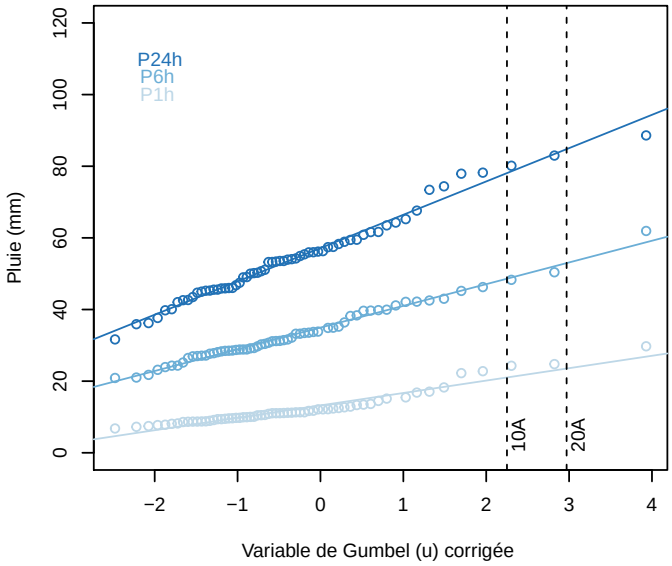
Torrent :LE SAINT−ANTOINE
Commune: LE BOURG D'OISANS (38)
ID: ID96



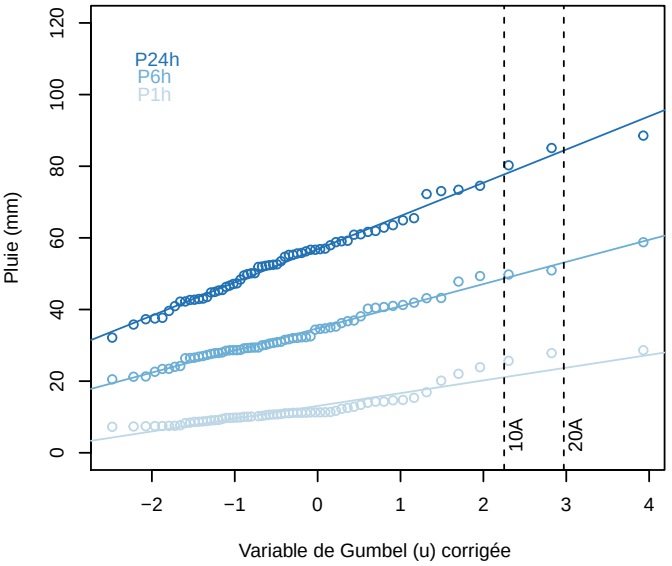
Torrent :LE MERDARET (AMONT)
Commune: CHANTELOUVE (38)
ID: ID48

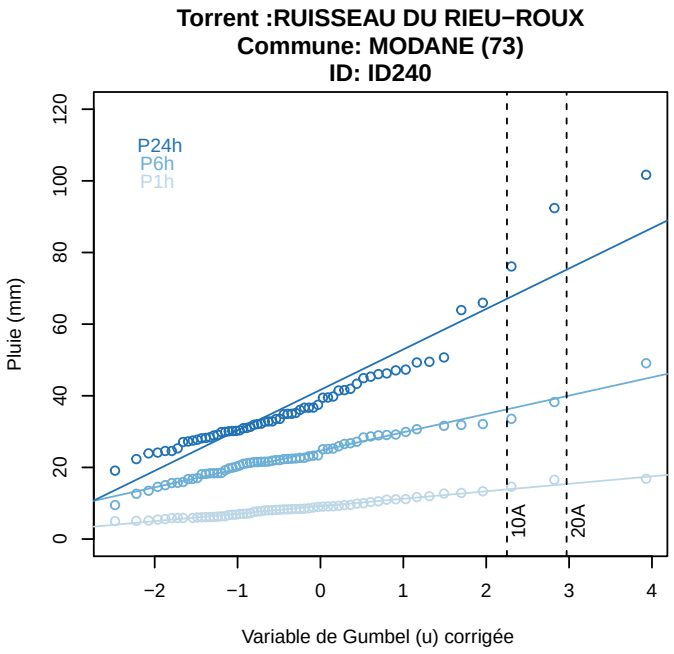


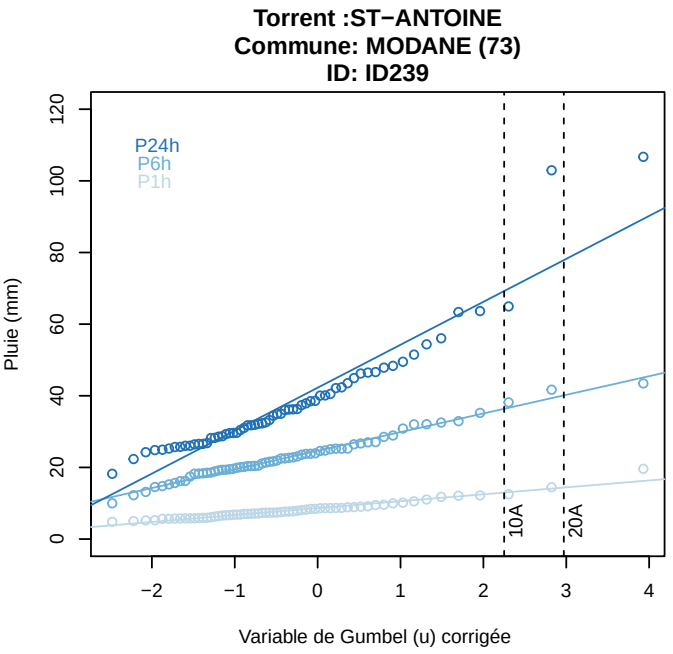
Torrent :RAVIN DES PÂLES
Commune: CHANTELOUVE (38)
ID: ID50

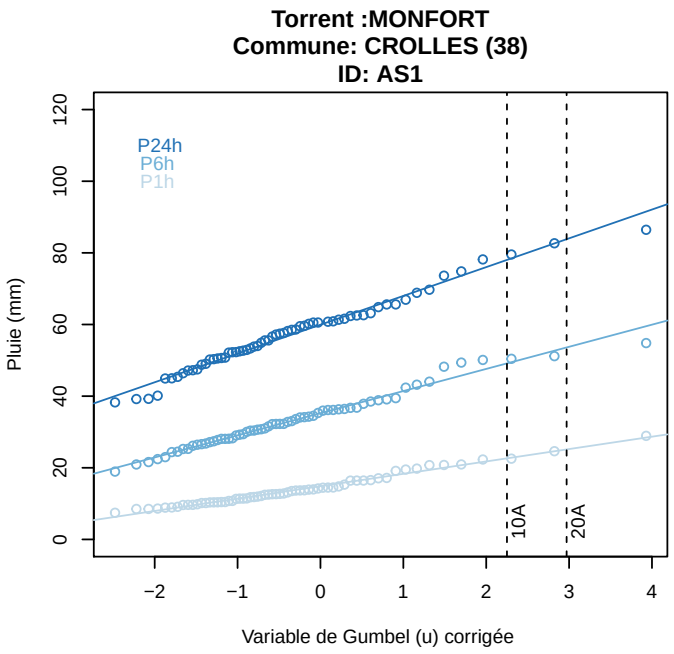


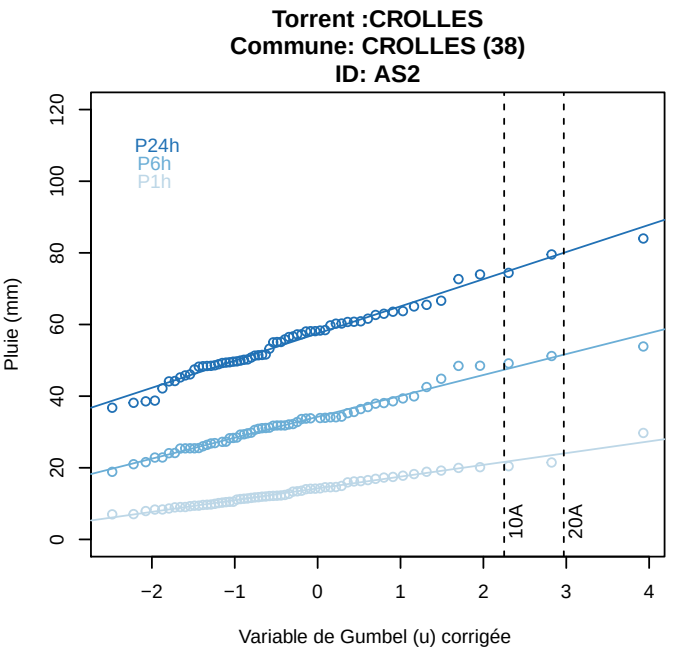
Torrent :LE MERDARET (AVAL)
Commune: CHANTELOUVE (38)
ID: ID49

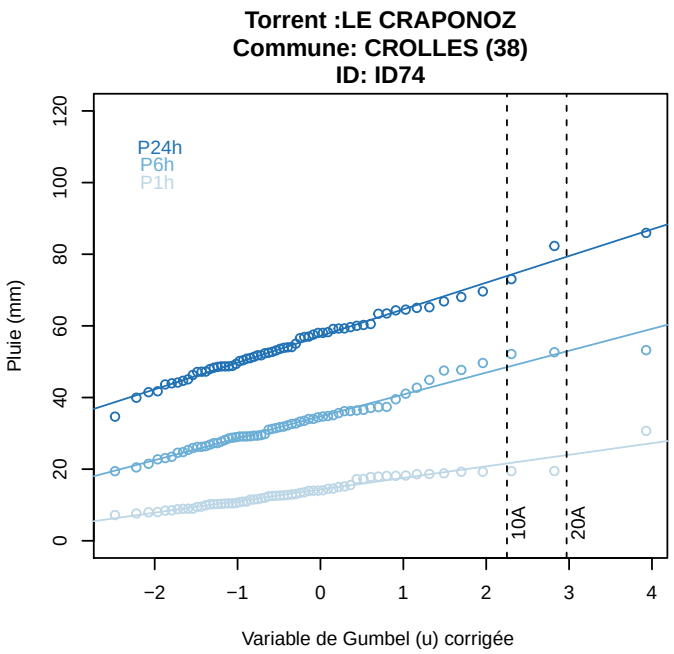


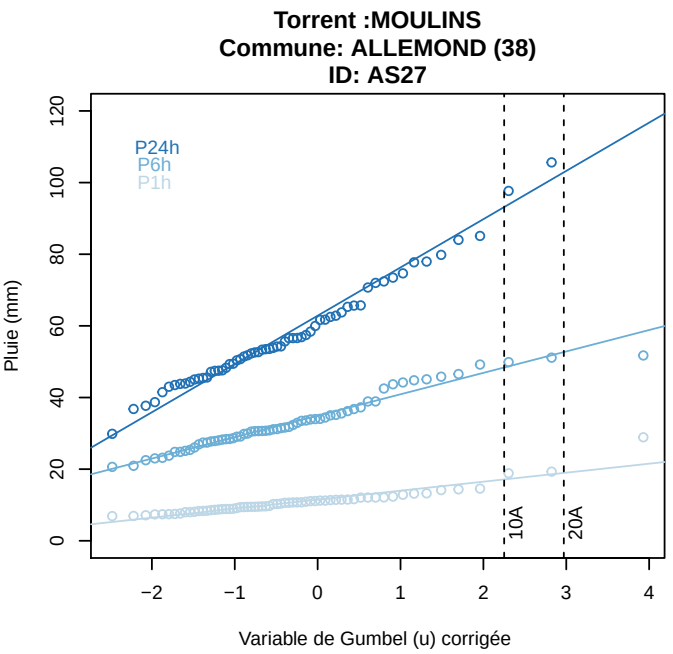

Torrent :RUISSEAU DU RIEU−ROUX
Commune: MODANE (73)
ID: ID240
P24h
P6h
P1h
10A
20A
Pluie (mm)
Variable de Gumbel (u) corrigée

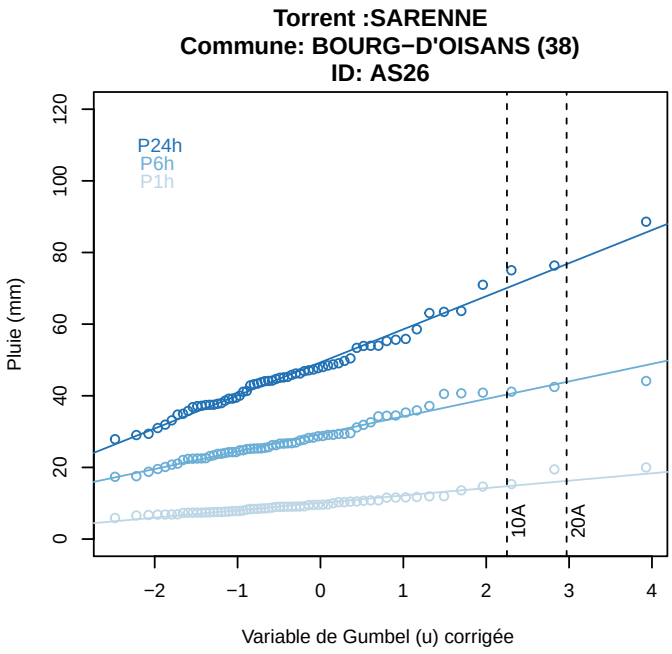

Torrent :ST−ANTOINE
Commune: MODANE (73)
ID: ID239
P24h
P6h
P1h
10A
20A
Pluie (mm)
Variable de Gumbel (u) corrigée

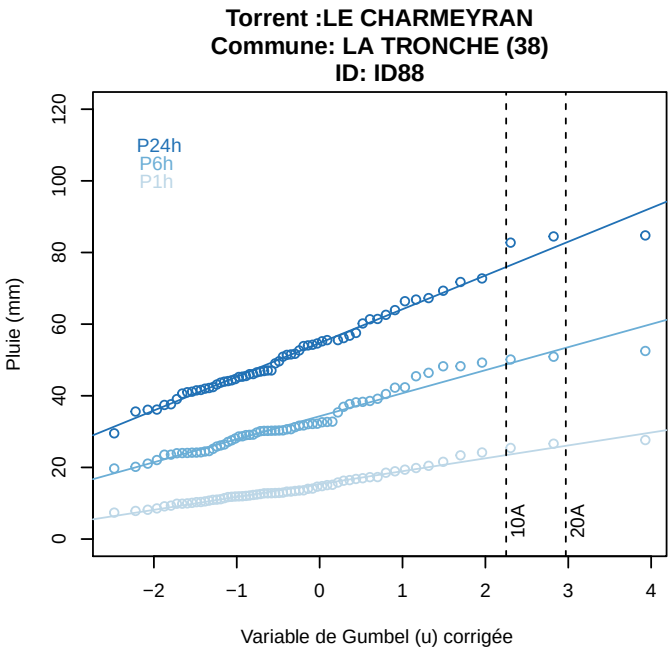

Torrent :MONFORT
Commune: CROLLES (38)
ID: AS1
P24h
P6h
P1h
10A
20A
Pluie (mm)
Variable de Gumbel (u) corrigée

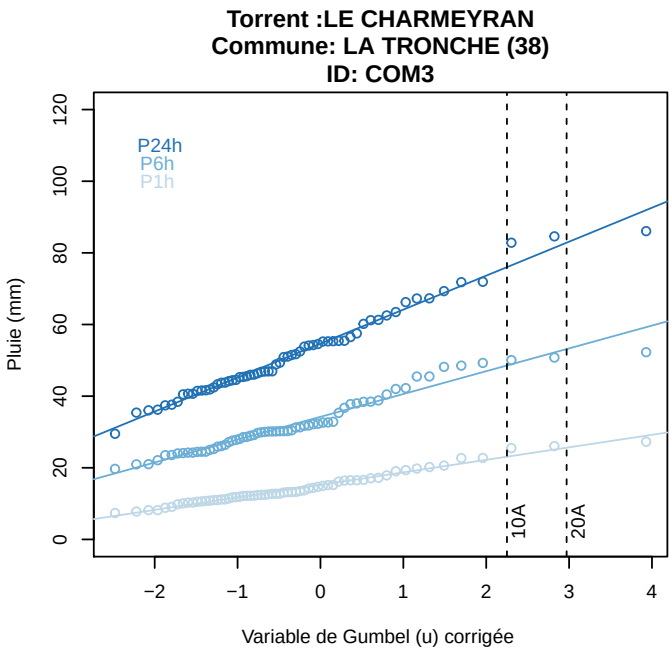

Torrent :CROLLES
Commune: CROLLES (38)
ID: AS2
P24h
P6h
P1h
10A
20A
Pluie (mm)
Variable de Gumbel (u) corrigée

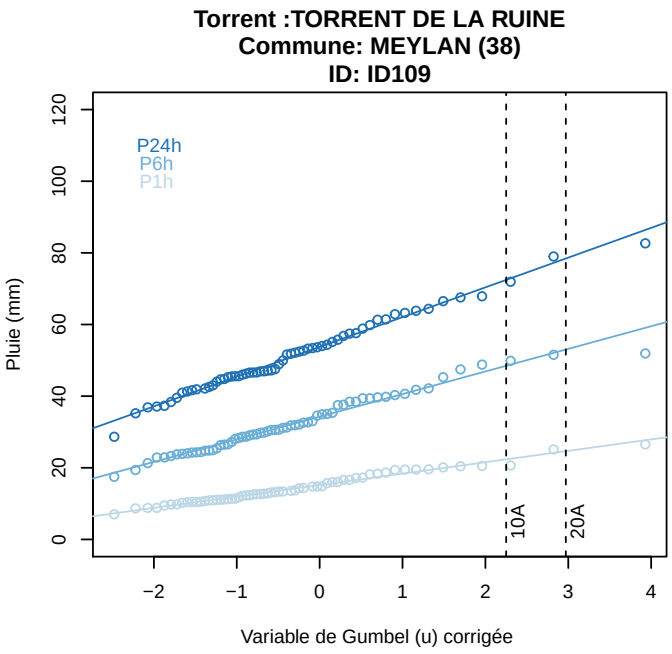

Torrent :LE CRAPONOZ
Commune: CROLLES (38)
ID: ID74
P24h
P6h
P1h
10A
20A
Pluie (mm)
Variable de Gumbel (u) corrigée

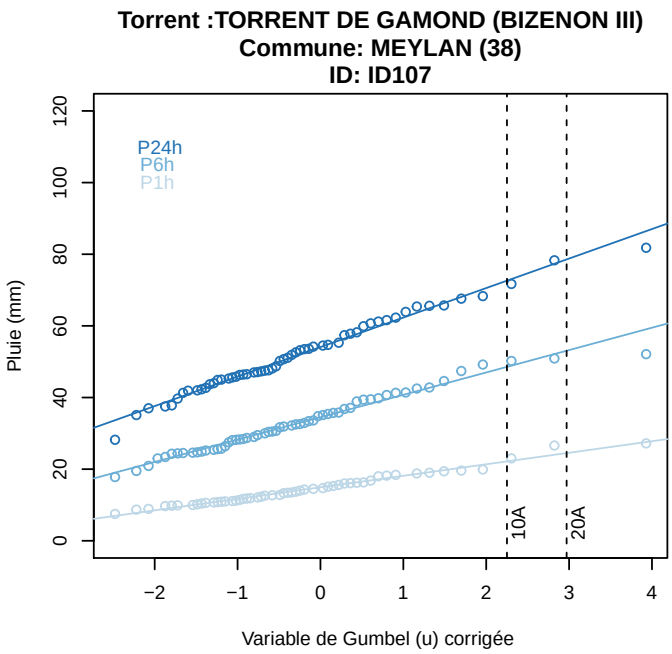

Torrent :MOULINS
Commune: ALLEMOND (38)
ID: AS27
P24h
P6h
P1h
10A
20A
Pluie (mm)
Variable de Gumbel (u) corrigée

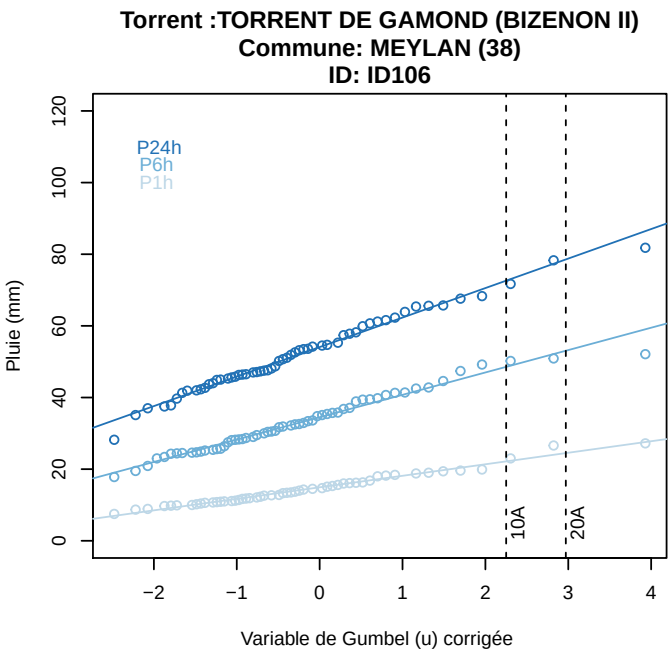

Torrent :SARENNE
Commune: BOURG−D'OISANS (38)
ID: AS26
P24h
P6h
P1h
Pluie (mm)
Variable de Gumbel (u) corrigée
10A
20A


Torrent :LE CHARMEYRAN
Commune: LA TRONCHE (38)
ID: ID88
P24h
P6h
P1h
Pluie (mm)
Variable de Gumbel (u) corrigée
10A
20A

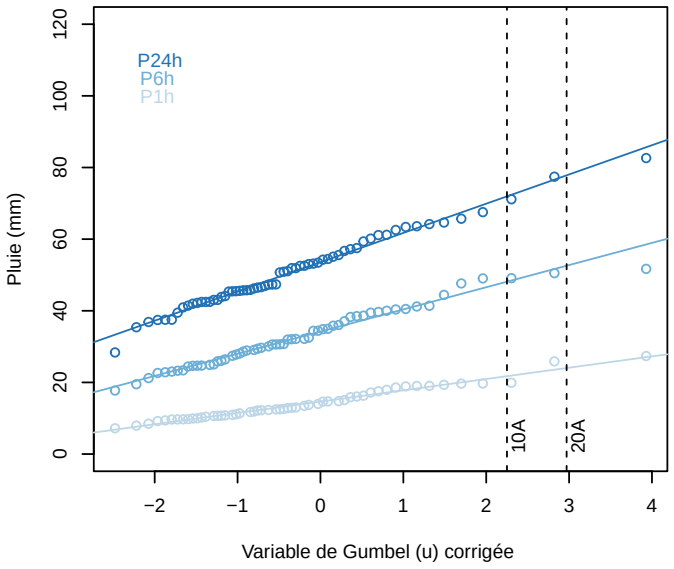

Torrent :LE CHARMEYRAN
Commune: LA TRONCHE (38)
ID: COM3
P24h
P6h
P1h
Pluie (mm)
Variable de Gumbel (u) corrigée
10A
20A


Torrent :TORRENT DE LA RUINE
Commune: MEYLAN (38)
ID: ID109
P24h
P6h
P1h
Pluie (mm)
Variable de Gumbel (u) corrigée
10A
20A

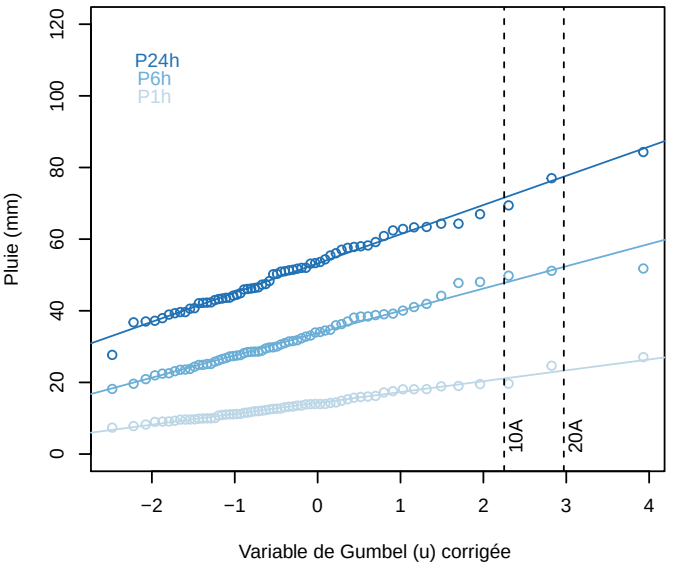

Torrent :TORRENT DE GAMOND (BIZENON III)
Commune: MEYLAN (38)
ID: ID107
P24h
P6h
P1h
Pluie (mm)
Variable de Gumbel (u) corrigée
10A
20A


Torrent :TORRENT DE GAMOND (BIZENON II)
Commune: MEYLAN (38)
ID: ID106
P24h
P6h
P1h
Pluie (mm)
Variable de Gumbel (u) corrigée
10A
20A

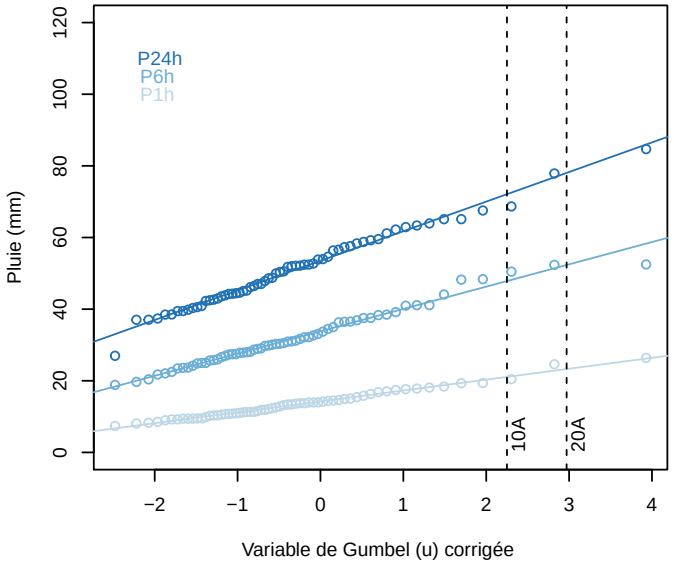
Torrent :TORRENT DE GAMOND (BIZENON I)
Commune: MEYLAN (38)
ID: ID105



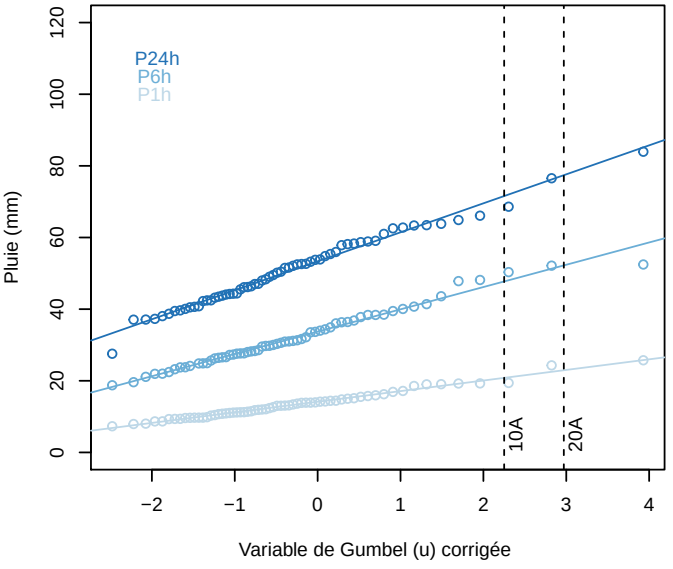
Torrent :TORRENT DE GAMOND (ST−HUGUES)
Commune: BIVIERS (38)
ID: ID47



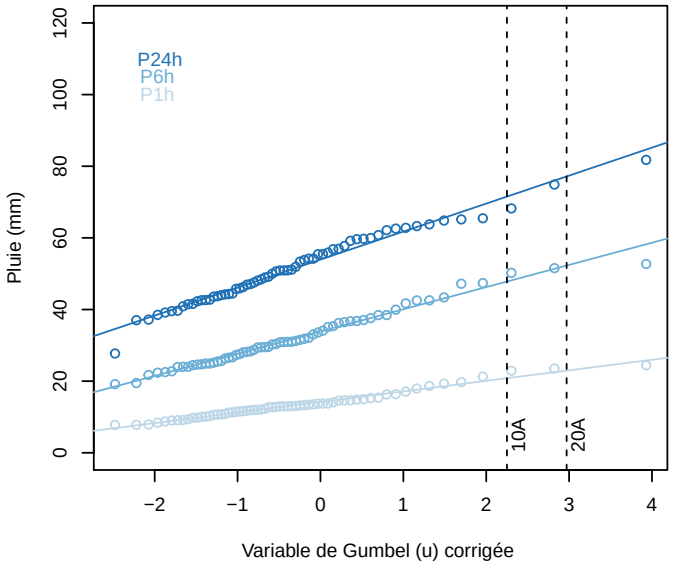
Torrent :TORRENT DE L'AIGUILLE
Commune: BIVIERS (38)
ID: ID40



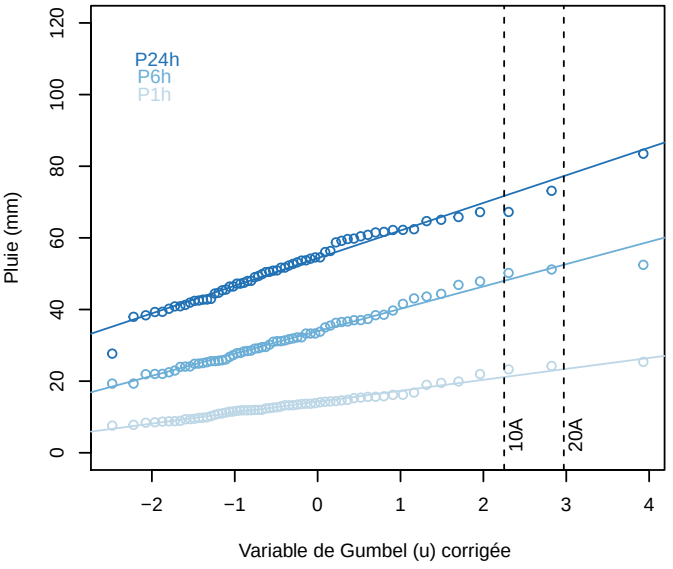
Torrent :TORRENT DE CREPON
Commune: BIVIERS (38)
ID: ID44



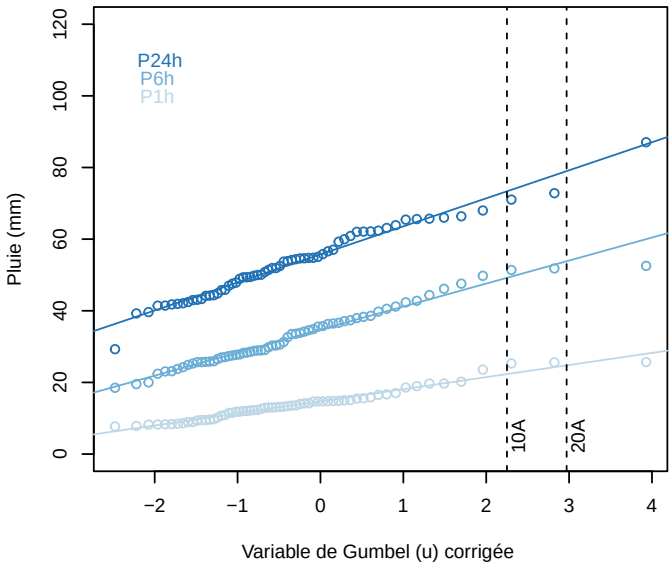
Torrent :TORRENT DES GUICHARDS
Commune: BIVIERS (38)
ID: ID43



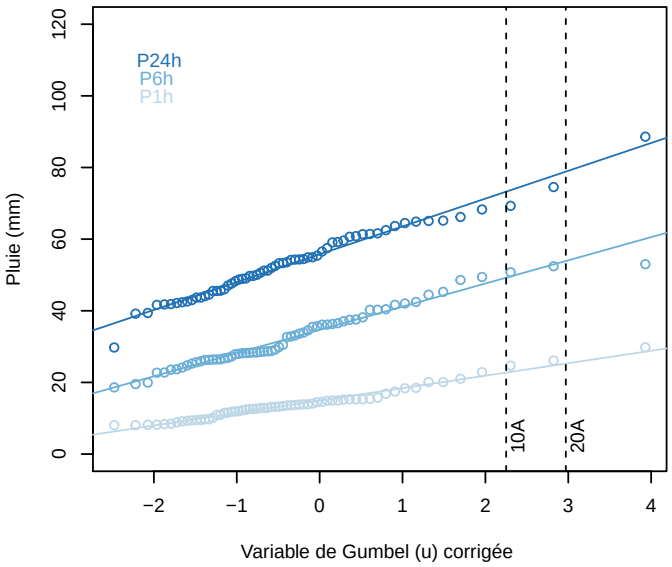
Torrent :TORRENT DE CORBONNE
Commune: ST−ISMIER (38)
ID: ID150



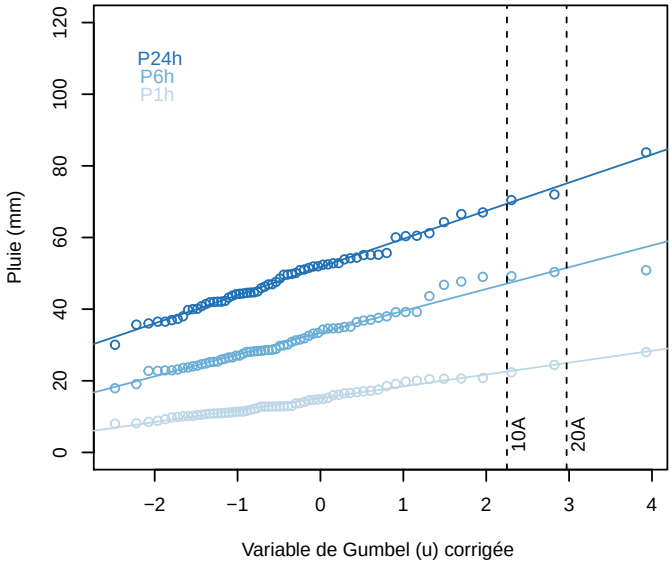
Torrent :RUISSEAU DE DARGUIL
Commune: ST−ISMIER (38)
ID: ID147



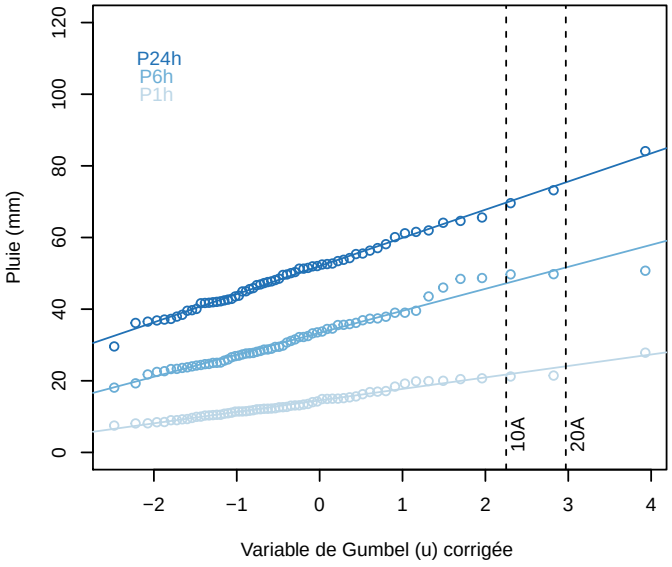
Torrent :RUISSEAU DE DARGUIL (LES ECORCHIERS)
Commune: ST−ISMIER (38)
ID: ID148



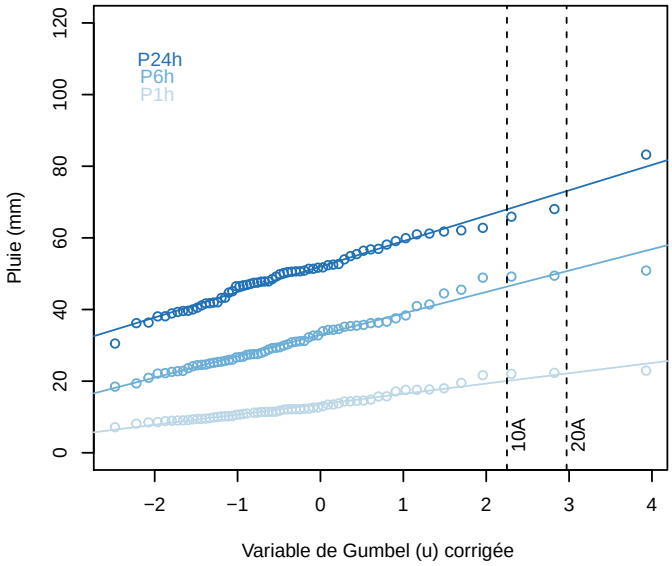
Torrent :JAILLIERES
Commune: MEYLAN (38)
ID: AS15



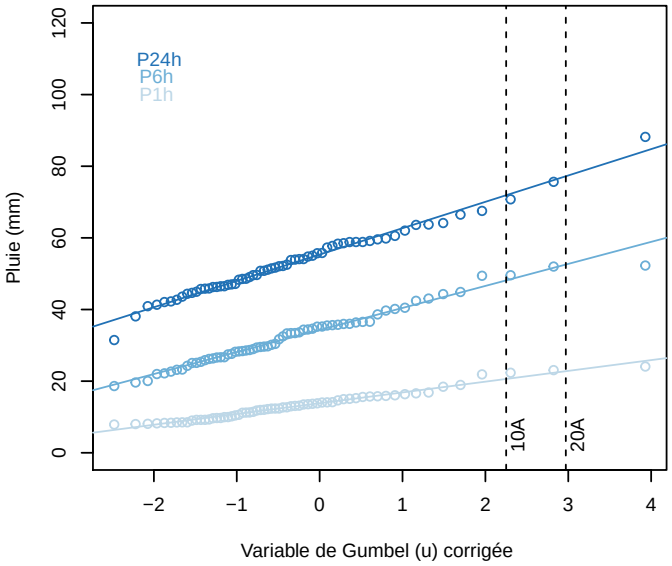
Torrent :GAMOND
Commune: MEYLAN (38)
ID: AS8



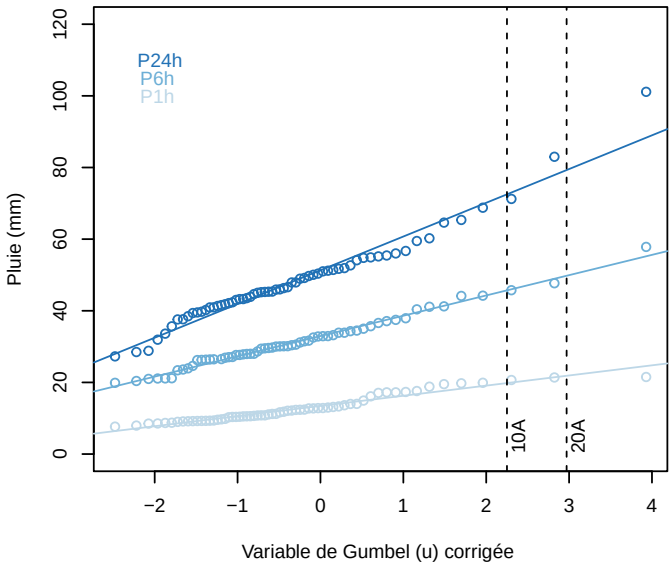
Torrent :CORBONNE
Commune: SAINT ISMIER (38)
ID: AS9



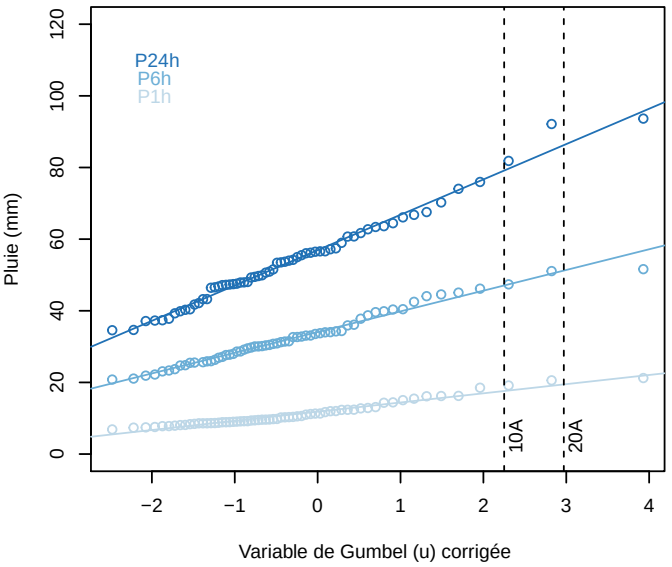
Torrent :TORRENT DU MANIVAL
Commune: ST−NAZAIRE−LES−EYMES (38)
ID: AS3



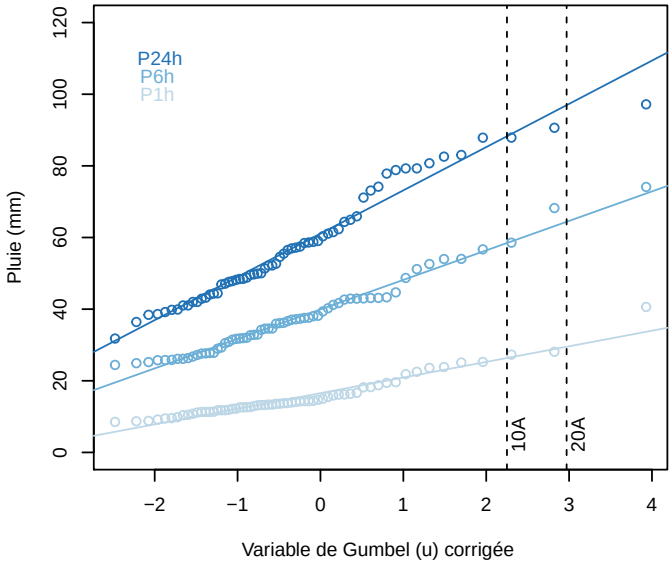
Torrent :SONNANT
Commune: GIERES (38)
ID: ID79



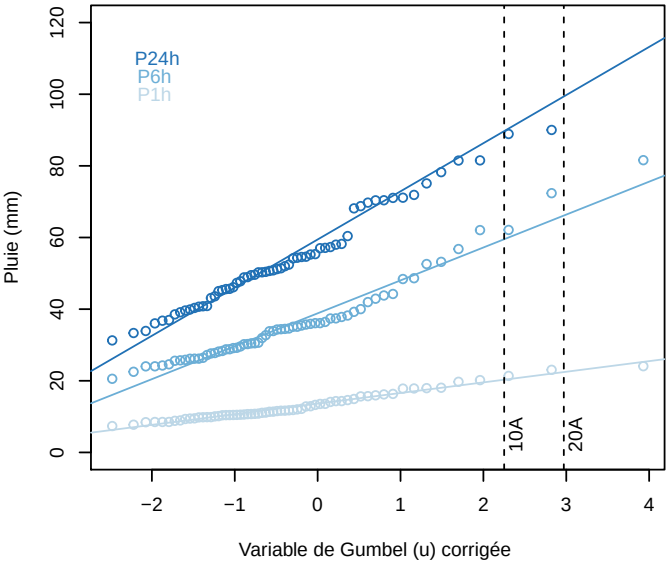
Torrent :TORRENT DE LA LIGNARRE
Commune: OULLES (38)
ID: ID123



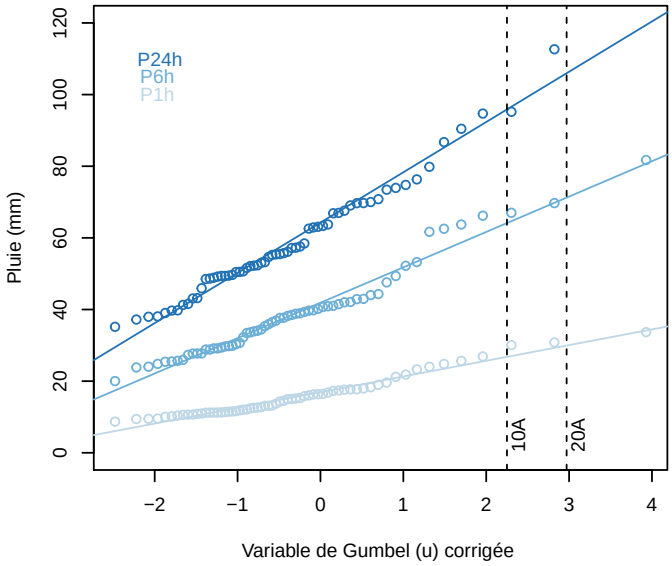
Torrent :GRANDE RIGOLE
Commune: POLIENAS (38)
ID: AS18



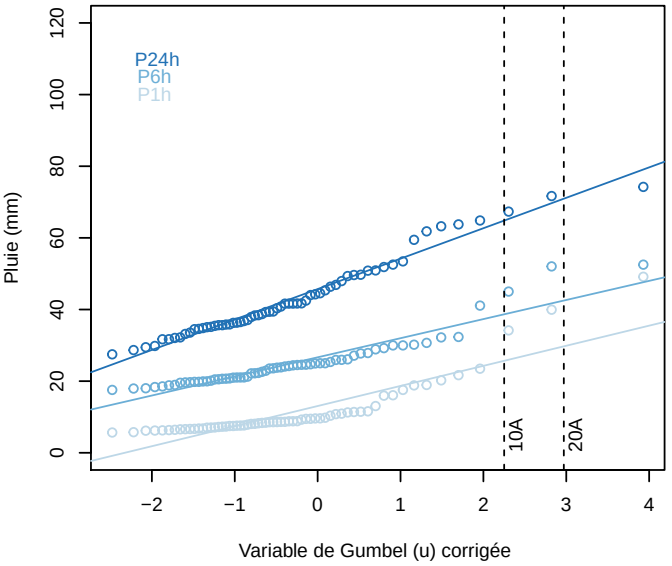
Torrent :LA FURE
Commune: TULLINS (38)
ID: AS19



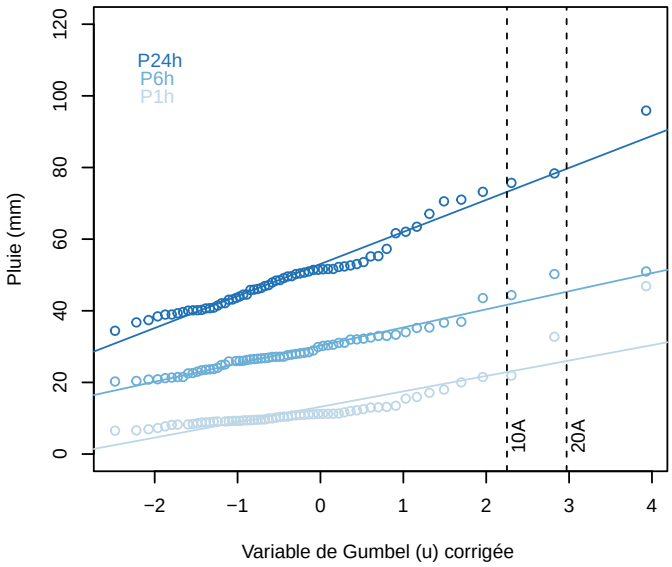
Torrent :LA MORGE
Commune: MOIRANS (38)
ID: AS20



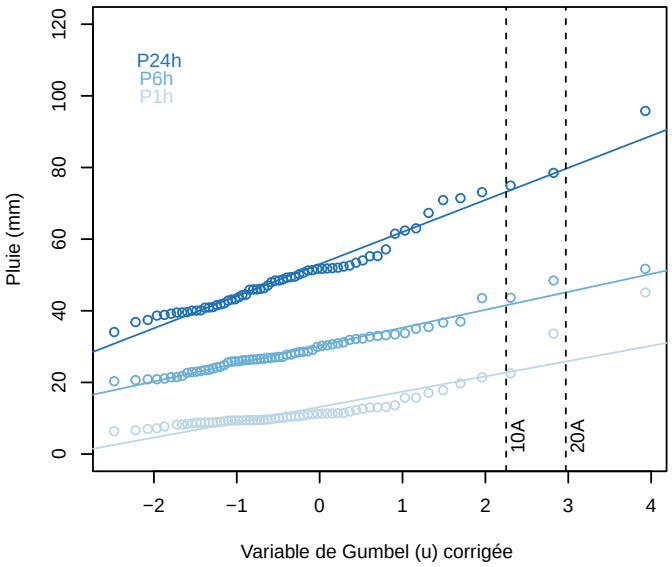
Torrent :RUISSEAU DE MÂCOT
Commune: MÂCOT−LA−PLAGNE (73)
ID: ID237



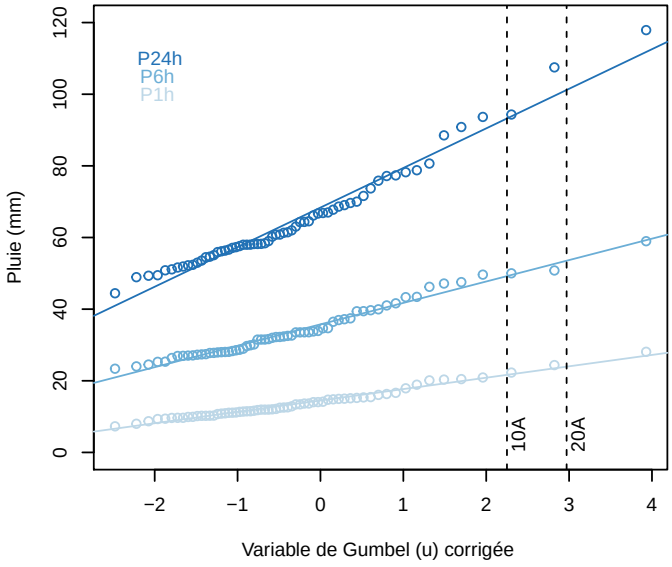
Torrent :TORRENT DU DARD (AMONT)
Commune: ST−GERVAIS−LES−BAINS (74)
ID: ID317



Torrent :TORRENT DU DARD (AVAL)
Commune: ST−GERVAIS−LES−BAINS (74)
ID: ID318

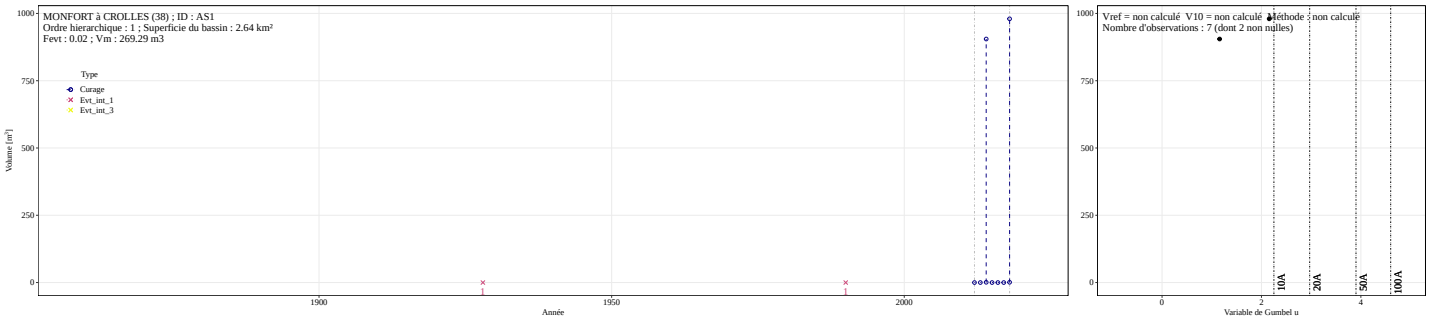


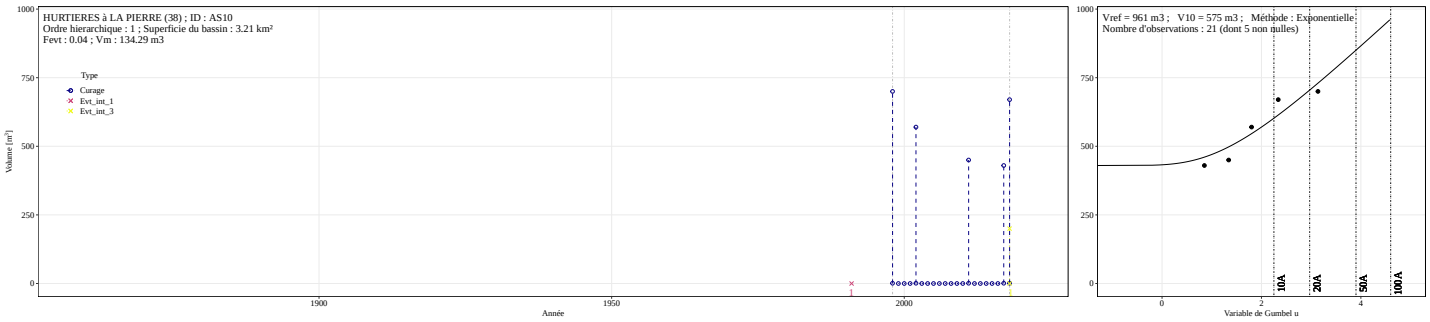
Torrent :LE CHINAILLON
Commune: LE GRAND−BORNAND (74)
ID: ID288

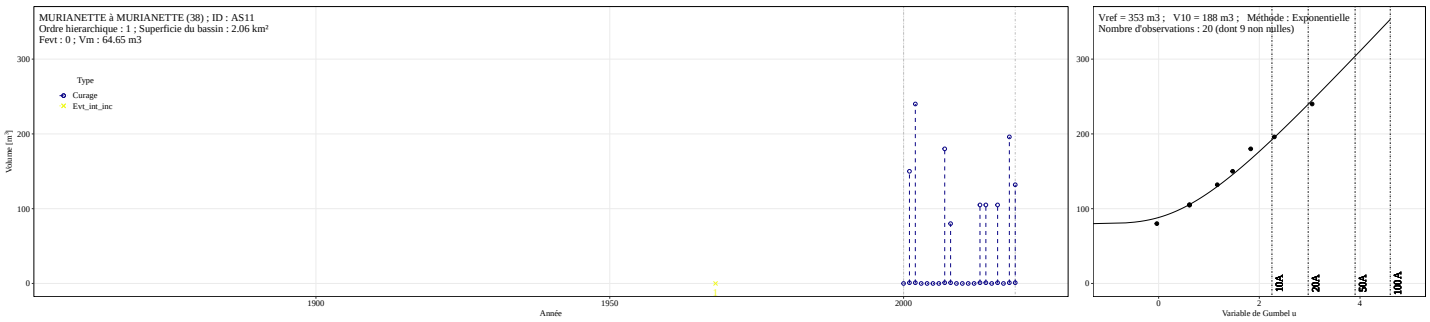


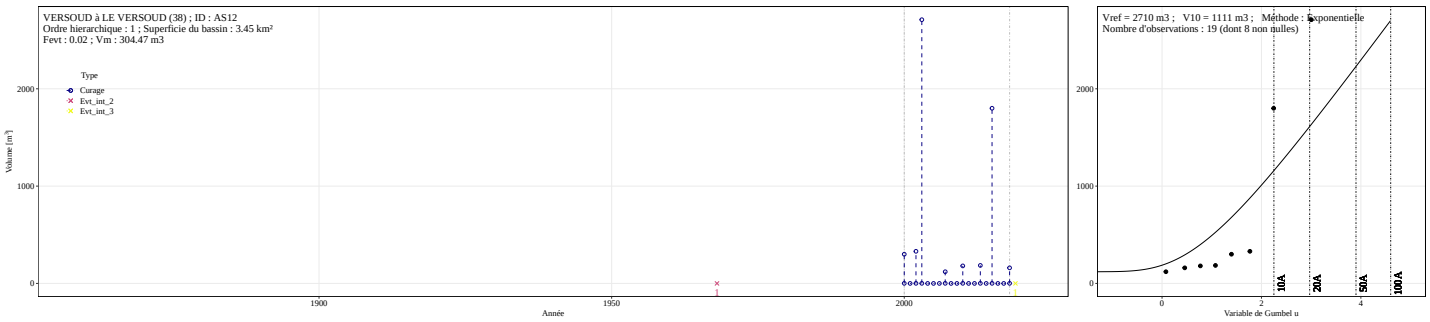
F Données d'apports sédimentaires

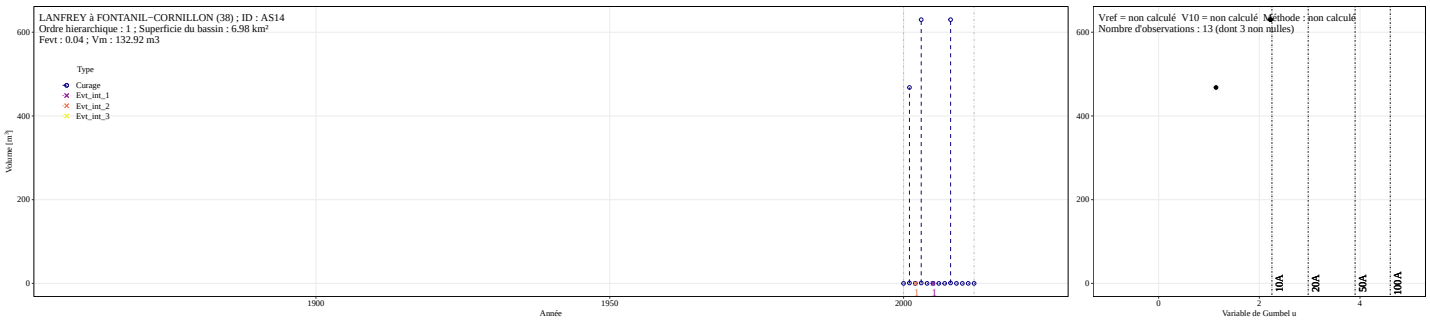
Cette annexe présente les données d'apports sédimentaires collectée pour chaque bassin versant étudié et les ajustement réalisé pour les estimations des volumes de production sédimentaire. La Figure de gauche correspond à l'historique d'apport sédimentaire sur la période entre 1860 et 2020. Les couleurs et formes des points/traits indiquent les types de sources des données (curage ou Évènement-RTM) et l'intensité des Évènements-RTM (se référer à la légende de la Figure 16 pour plus de détails). Les cumuls des volumes de curages des plages de dépôt amont sont indiqués en noir (trait plein) pour les plages de dépôt d'ordre 2. La Figure à droite montre l'ajustement réalisé pour l'estimation des volumes de référence et de période de retour décennal.

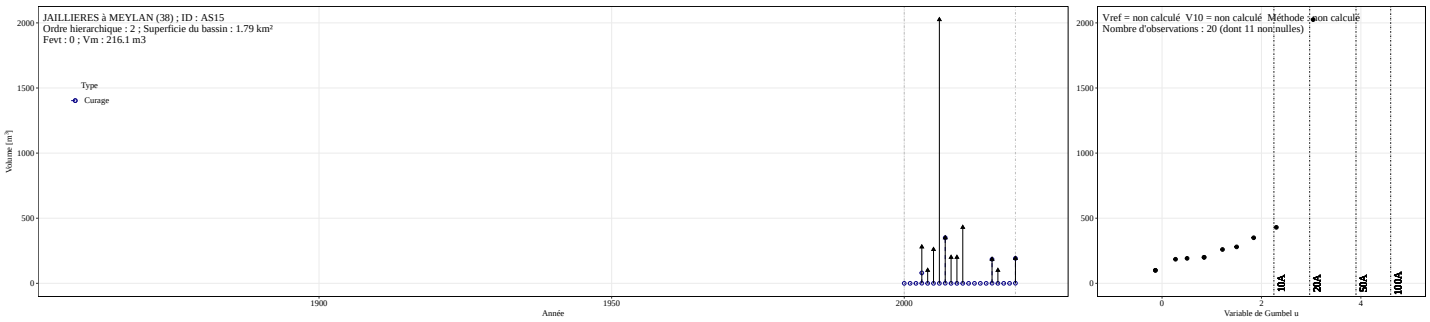

MONFORT à CROLLES (38) ; ID : AS1
Ordre hierarchique : 1 ; Superficie du bassin : 2.64 km²
Fevt : 0.02 ; Vm : 269.29 m3
Type
Curage
Evt_int_1
Evt_int_3
Volume [m³]
Année
Vref = non calculé V10 = non calculé Méthode : non calculé
Nombre d'observations : 7 (dont 2 non nulles)
10A
20A
50A
100A
Variable de Gumbel u

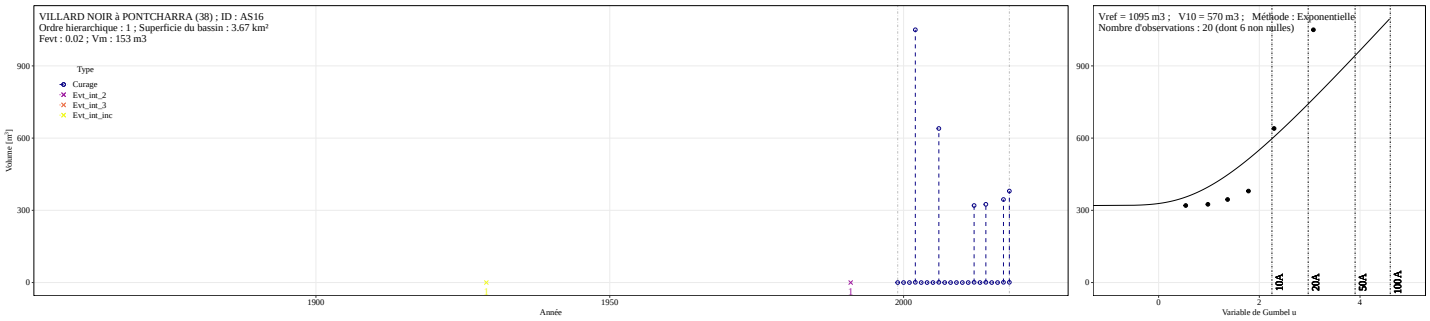

HURTIERES à LA PIERRE (38) ; ID : AS10
Ordre hierarchique : 1 ; Superficie du bassin : 3.21 km²
Fevt : 0.04 ; Vm : 134.29 m3
Type
Curage
Evt_int_1
Evt_int_3
Volume [m³]
Année
Vref = 961 m3 ; V10 = 575 m3 ; Méthode : Exponentielle
Nombre d'observations : 21 (dont 5 non nulles)
10A
20A
50A
100A
Variable de Gumbel u

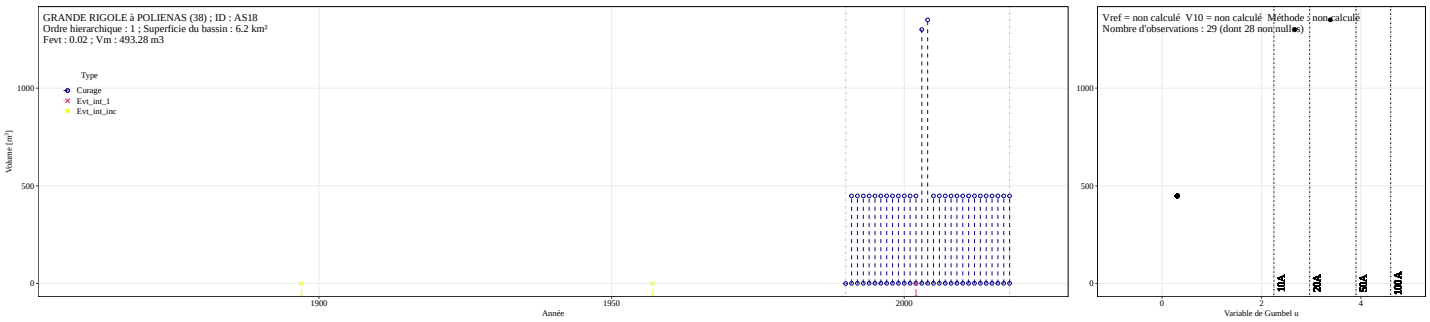

MURIANETTE à MURIANETTE (38) ; ID : AS11
Ordre hierarchique : 1 ; Superficie du bassin : 2.06 km²
Fevt : 0 ; Vm : 64.65 m3
Type
Curage
Evt_int_inc
Volume [m³]
Année
Vref = 353 m3 ; V10 = 188 m3 ; Méthode : Exponentielle
Nombre d'observations : 20 (dont 9 non nulles)
10A
20A
50A
100A
Variable de Gumbel u

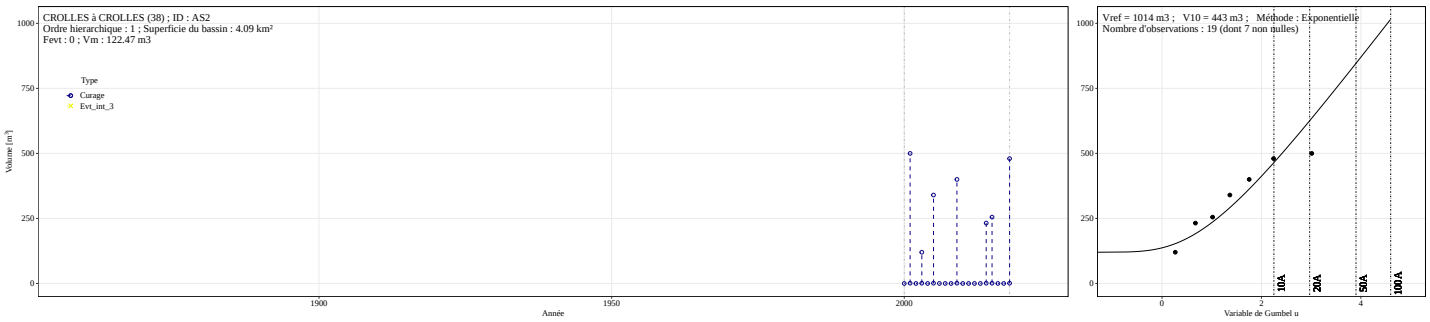

VERSOUD à LE VERSOUD (38) ; ID : AS12
Ordre hierarchique : 1 ; Superficie du bassin : 3.45 km²
Fevt : 0.02 ; Vm : 304.47 m3
Type
Curage
Evt_int_2
Evt_int_3
Volume [m³]
Année
Vref = 2710 m3 ; V10 = 1111 m3 ; Méthode : Exponentielle
Nombre d'observations : 19 (dont 8 non nulles)
10A
20A
50A
100A
Variable de Gumbel u

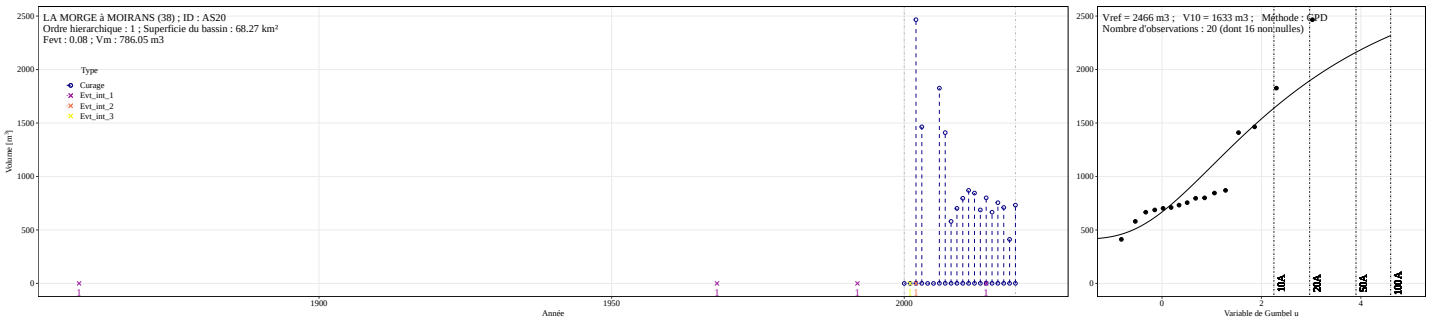

LANFREY à FONTANIL−CORNILLON (38) ; ID : AS14
Ordre hierarchique : 1 ; Superficie du bassin : 6.98 km²
Fevt : 0.04 ; Vm : 132.92 m3
Type
Curage
Evt_int_1
Evt_int_2
Evt_int_3
Volume [m³]
Année
Vref = non calculé V10 = non calculé Méthode : non calculé
Nombre d'observations : 13 (dont 3 non nulles)
10A
20A
50A
100A
Variable de Gumbel u

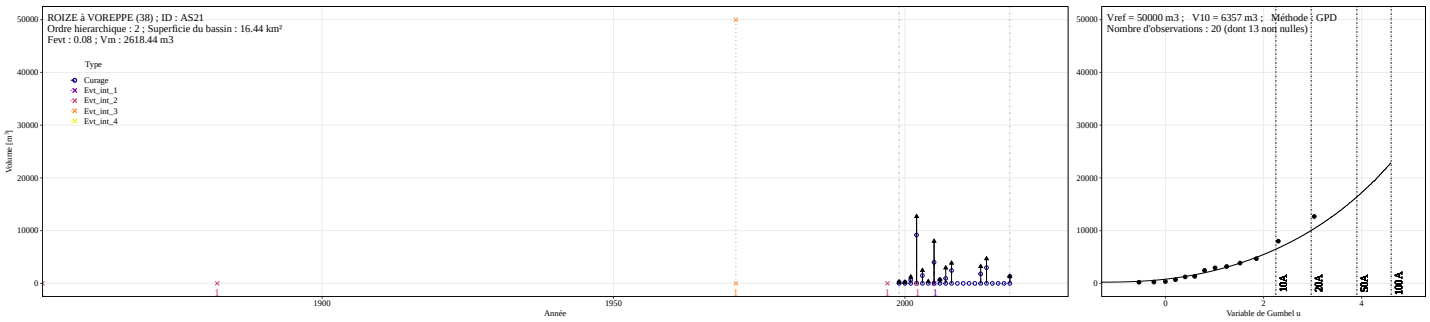

JAILLIERES à MEYLAN (38) ; ID : AS15
Ordre hierarchique : 2 ; Superficie du bassin : 1.79 km²
Fevt : 0 ; Vm : 216.1 m3
Type
Curage
Volume [m³]
Année
Vref = non calculé V10 = non calculé Méthode : non calculé
Nombre d'observations : 20 (dont 11 non nulles)
10A
20A
50A
100A
Variable de Gumbel u

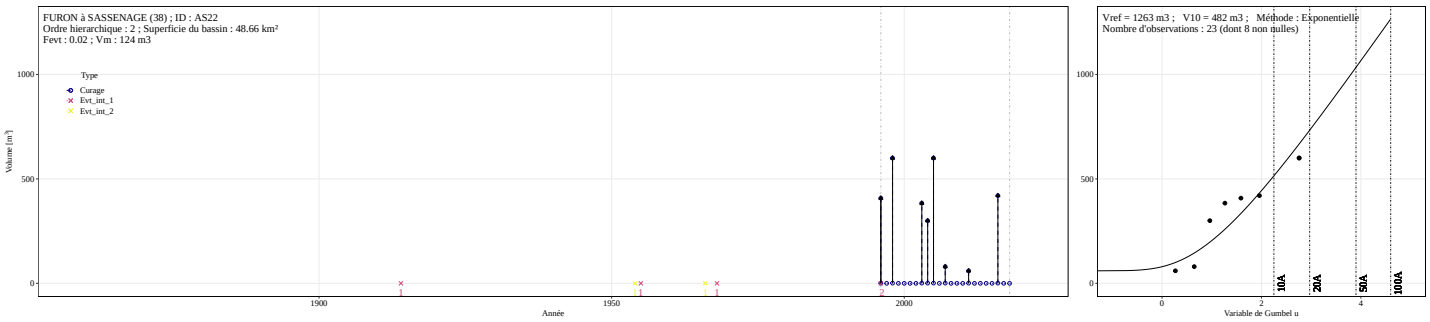

VILLARD NOIR à PONTCHARRA (38) ; ID : AS16
Ordre hierarchique : 1 ; Superficie du bassin : 3.67 km²
Fevt : 0.02 ; Vm : 153 m3
Type
Curage
Evt_int_2
Evt_int_3
Evt_int_inc
Volume [m³]
Année
Vref = 1095 m3 ; V10 = 570 m3 ; Méthode : Exponentielle
Nombre d'observations : 20 (dont 6 non nulles)
Variable de Gumbel u
10A
20A
50A
100A

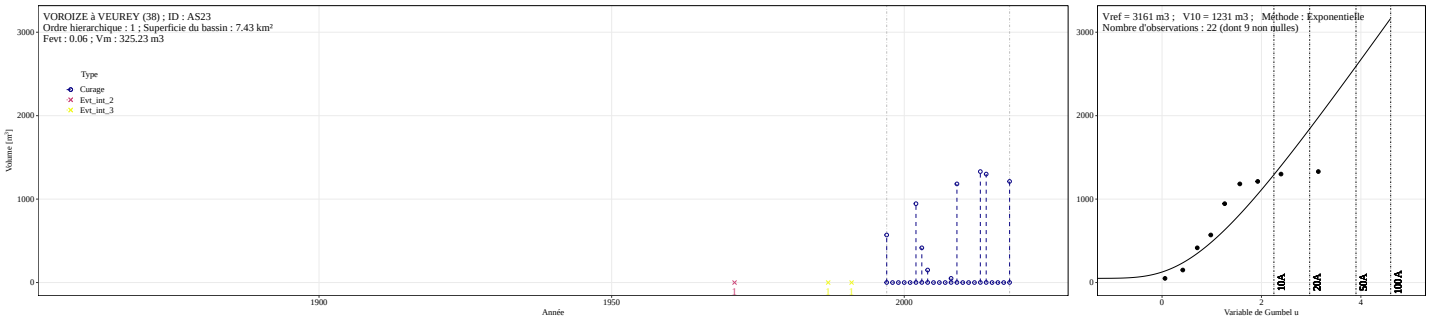

GRANDE RIGOLE à POLIENAS (38) ; ID : AS18
Ordre hierarchique : 1 ; Superficie du bassin : 6.2 km²
Fevt : 0.02 ; Vm : 493.28 m3
Type
Curage
Evt_int_1
Evt_int_inc
Volume [m³]
Année
Vref = non calculé V10 = non calculé Méthode : non calculé
Nombre d'observations : 29 (dont 28 non nulles)
Variable de Gumbel u
10A
20A
50A
100A

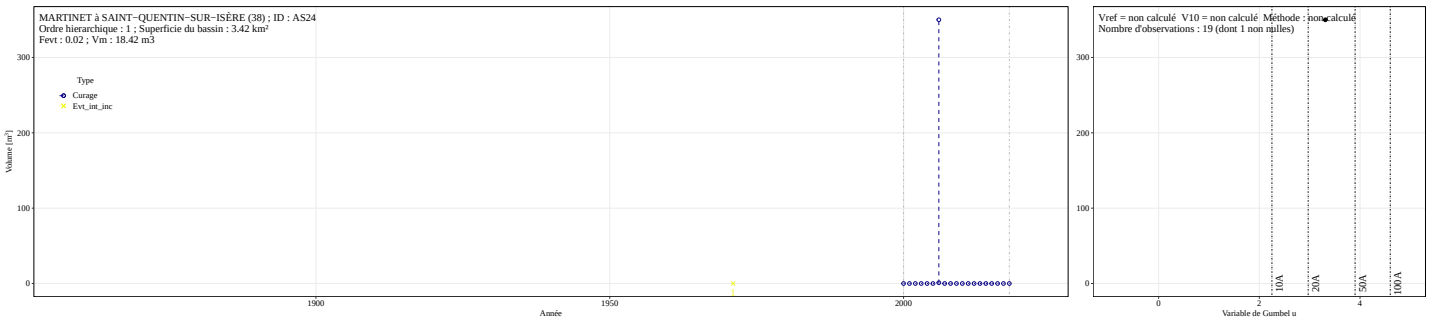

CROLLES à CROLLES (38) ; ID : AS2
Ordre hierarchique : 1 ; Superficie du bassin : 4.09 km²
Fevt : 0 ; Vm : 122.47 m3
Type
Curage
Evt_int_3
Volume [m³]
Année
Vref = 1014 m3 ; V10 = 443 m3 ; Méthode : Exponentielle
Nombre d'observations : 19 (dont 7 non nulles)
Variable de Gumbel u
10A
20A
50A
100A

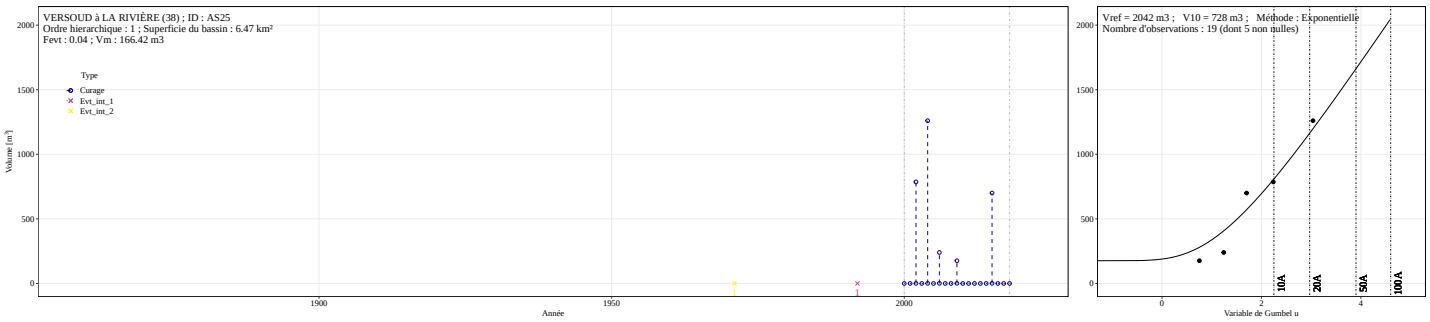

LA MORGE à MOIRANS (38) ; ID : AS20
Ordre hierarchique : 1 ; Superficie du bassin : 68.27 km²
Fevt : 0.08 ; Vm : 786.05 m3
Type
Curage
Evt_int_1
Evt_int_2
Evt_int_3
Volume [m³]
Année
Vref = 2466 m3 ; V10 = 1633 m3 ; Méthode : GPD
Nombre d'observations : 20 (dont 16 non nulles)
Variable de Gumbel u
10A
20A
50A
100A

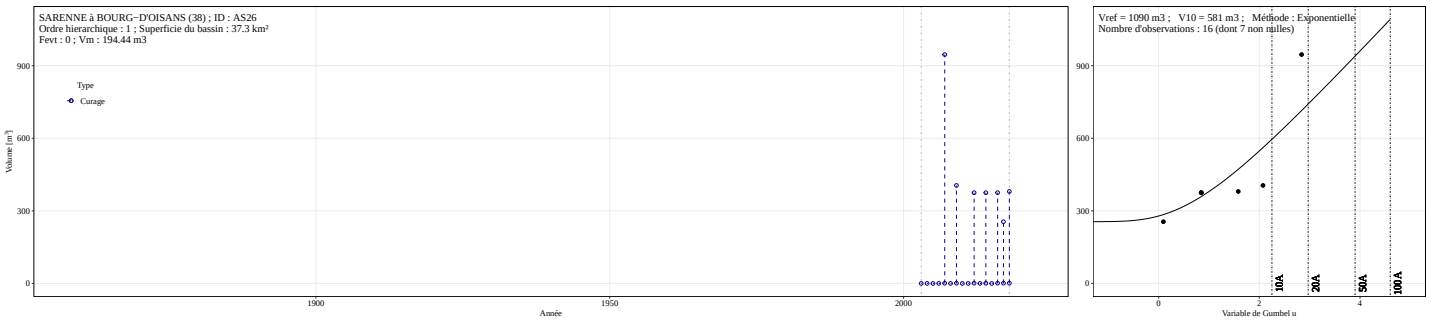

ROIZE à VOREPPE (38) ; ID : AS21
Ordre hierarchique : 2 ; Superficie du bassin : 16.44 km²
Fevt : 0.08 ; Vm : 2618.44 m3
Type
Curage
Evt_int_1
Evt_int_2
Evt_int_3
Evt_int_4
Volume [m³]
Année
Vref = 50000 m3 ; V10 = 6357 m3 ; Méthode : GPD
Nombre d'observations : 20 (dont 13 non nulles)
Variable de Gumbel u
10A
20A
50A
100A

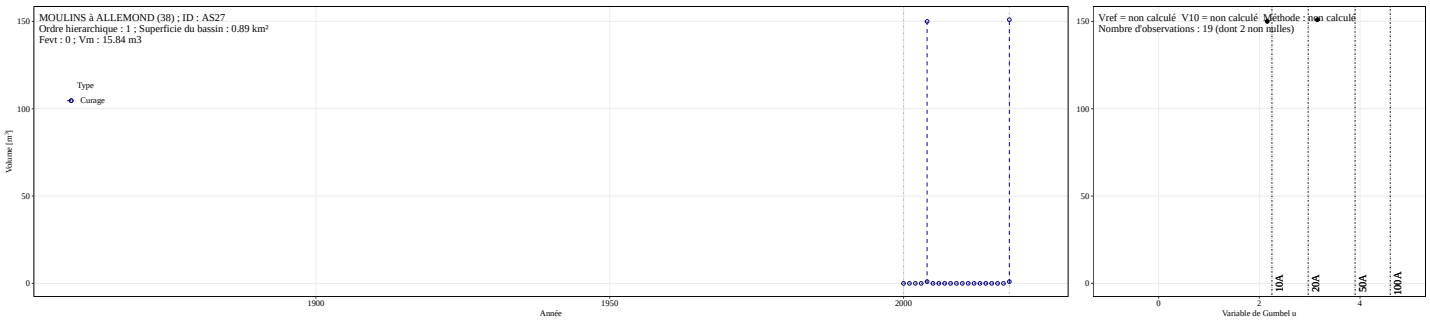

FURON à SASSENAGE (38) ; ID : AS22
Ordre hierarchique : 2 ; Superficie du bassin : 48.66 km²
Fevt : 0.02 ; Vm : 124 m3
Type
Curage
Evt_int_1
Evt_int_2
Volume [m³]
Année
Vref = 1263 m3 ; V10 = 482 m3 ; Méthode : Exponentielle
Nombre d'observations : 23 (dont 8 non nulles)
Variable de Gumbel u
10A
20A
50A
100A

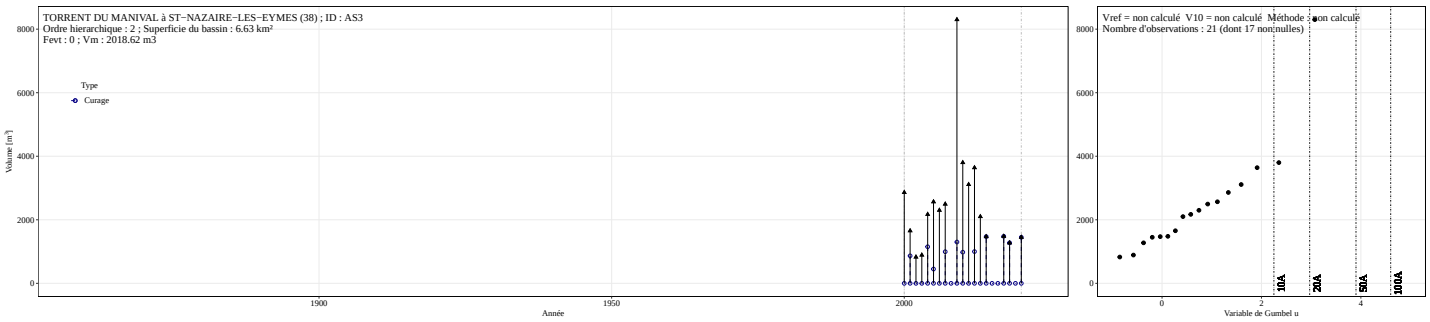

VOROIZE à VEUREY (38) ; ID : AS23
Ordre hierarchique : 1 ; Superficie du bassin : 7.43 km²
Fevt : 0.06 ; Vm : 325.23 m3
Type
Curage
Evt_int_2
Evt_int_3
Volume [m³]
Année
Vref = 3161 m3 ; V10 = 1231 m3 ; Méthode : Exponentielle
Nombre d'observations : 22 (dont 9 non nulles)
10A
20A
50A
100A
Variable de Gumbel u

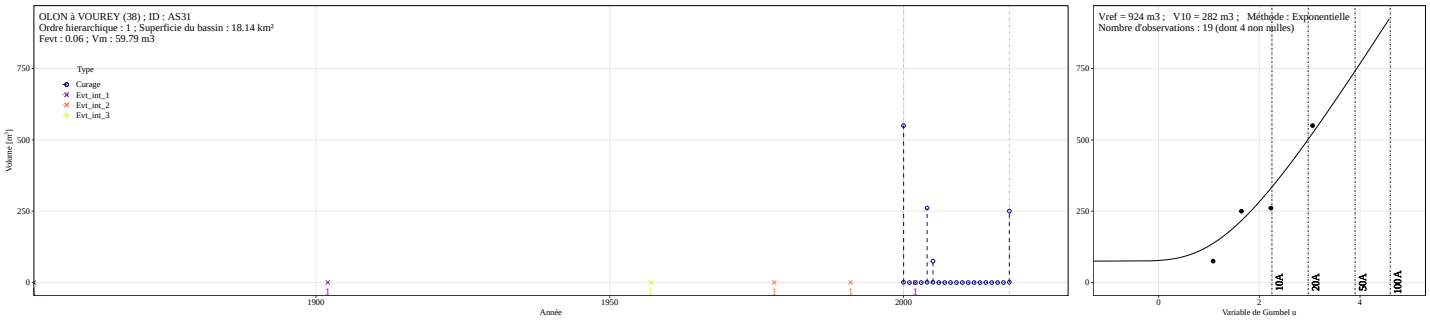

MARTINET à SAINT−QUENTIN−SUR−ISÈRE (38) ; ID : AS24
Ordre hierarchique : 1 ; Superficie du bassin : 3.42 km²
Fevt : 0.02 ; Vm : 18.42 m3
Type
Curage
Evt_int_inc
Volume [m³]
Année
Vref = non calculé V10 = non calculé Méthode : non calculé
Nombre d'observations : 19 (dont 1 non nulles)
10A
20A
50A
100A
Variable de Gumbel u

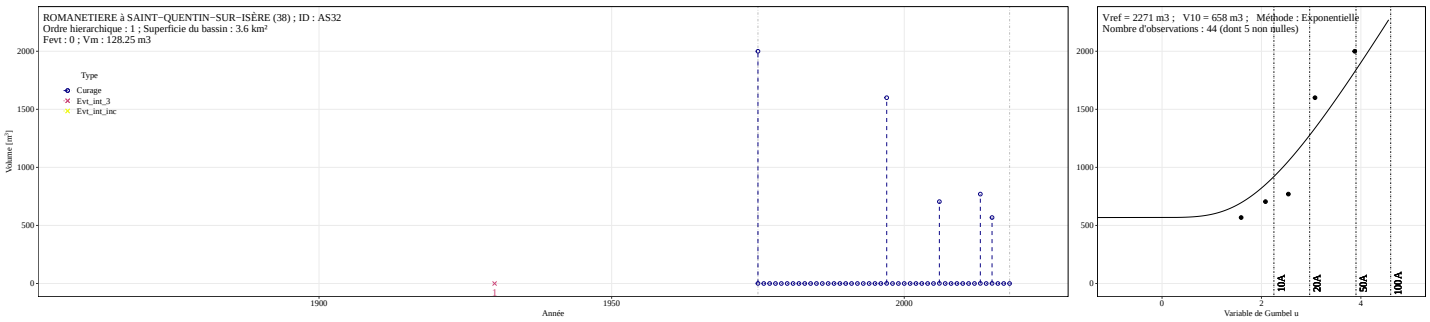

VERSOUD à LA RIVIÈRE (38) ; ID : AS25
Ordre hierarchique : 1 ; Superficie du bassin : 6.47 km²
Fevt : 0.04 ; Vm : 166.42 m3
Type
Curage
Evt_int_1
Evt_int_2
Volume [m³]
Année
Vref = 2042 m3 ; V10 = 728 m3 ; Méthode : Exponentielle
Nombre d'observations : 19 (dont 5 non nulles)
10A
20A
50A
100A
Variable de Gumbel u

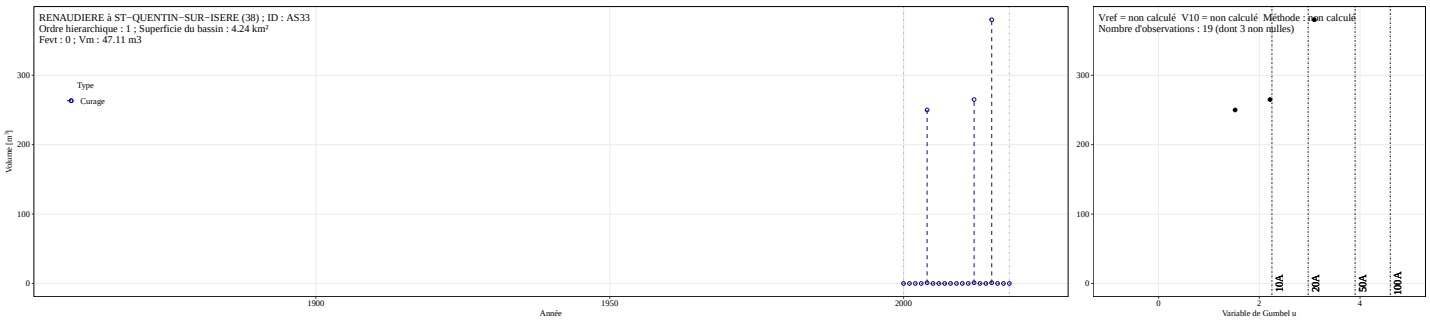

SARENNE à BOURG−D'OISANS (38) ; ID : AS26
Ordre hierarchique : 1 ; Superficie du bassin : 37.3 km²
Fevt : 0 ; Vm : 194.44 m3
Type
Curage
Volume [m³]
Année
Vref = 1090 m3 ; V10 = 581 m3 ; Méthode : Exponentielle
Nombre d'observations : 16 (dont 7 non nulles)
10A
20A
50A
100A
Variable de Gumbel u

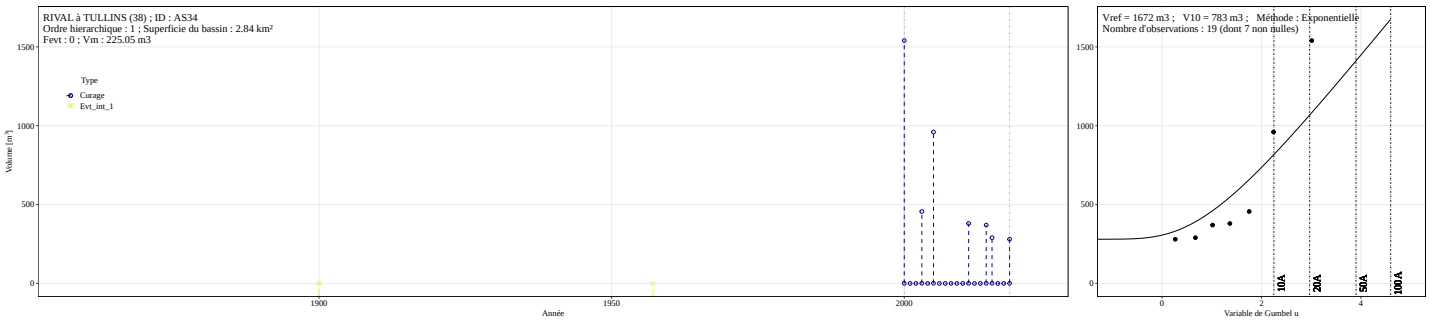

MOULINS à ALLEMOND (38) ; ID : AS27
Ordre hierarchique : 1 ; Superficie du bassin : 0.89 km²
Fevt : 0 ; Vm : 15.84 m3
Type
Curage
Volume [m³]
Année
Vref = non calculé V10 = non calculé Méthode : non calculé
Nombre d'observations : 19 (dont 2 non nulles)
10A
20A
50A
100A
Variable de Gumbel u

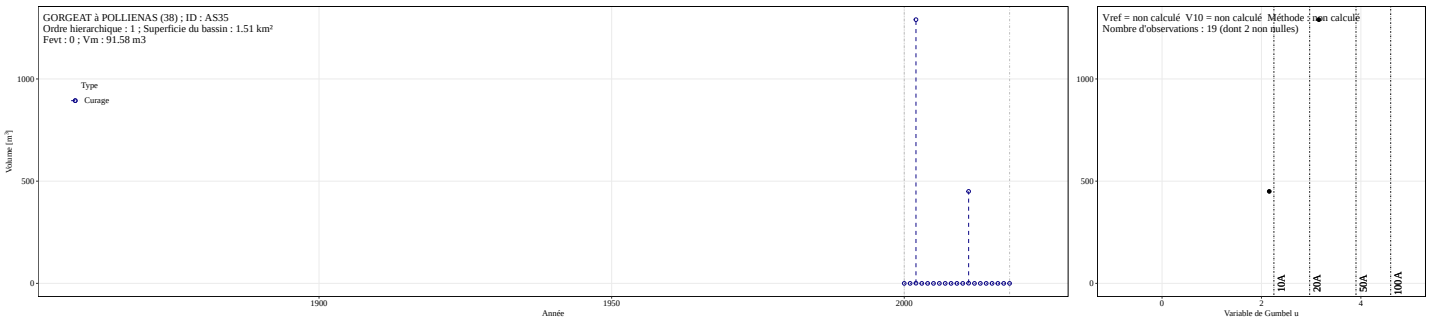

TORRENT DU MANIVAL à ST−NAZAIRE−LES−EYMES (38) ; ID : AS3
Ordre hierarchique : 2 ; Superficie du bassin : 6.63 km²
Fevt : 0 ; Vm : 2018.62 m3
Type
Curage
Volume [m³]
Année
Vref = non calculé V10 = non calculé Méthode : non calculé
Nombre d'observations : 21 (dont 17 non nulles)
10A
20A
50A
100A
Variable de Gumbel u

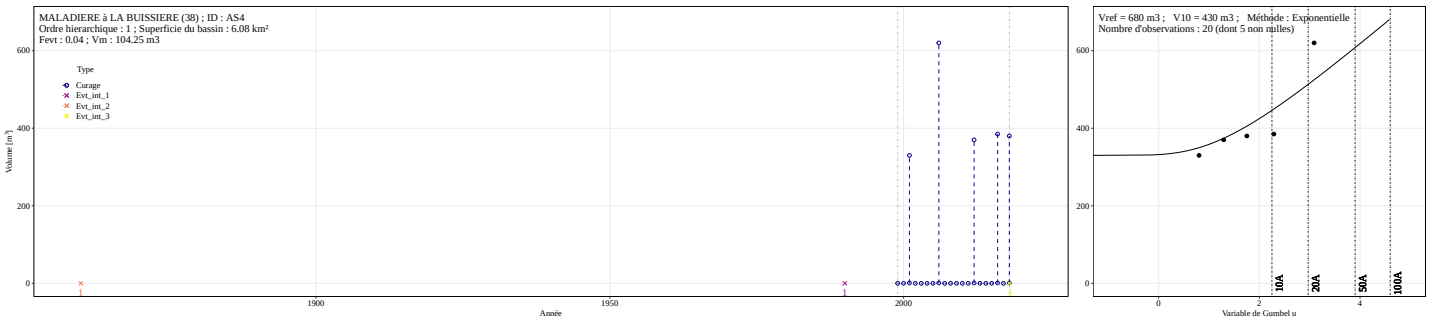

OLON à VOUREY (38) ; ID : AS31
Ordre hierarchique : 1 ; Superficie du bassin : 18.14 km²
Fevt : 0.06 ; Vm : 59.79 m3
Type
Curage
Evt_int_1
Evt_int_2
Evt_int_3
Volume [m³]
Année
Vref = 924 m3 ; V10 = 282 m3 ; Méthode : Exponentielle
Nombre d'observations : 19 (dont 4 non nulles)
10A
20A
50A
100A
Variable de Gumbel u

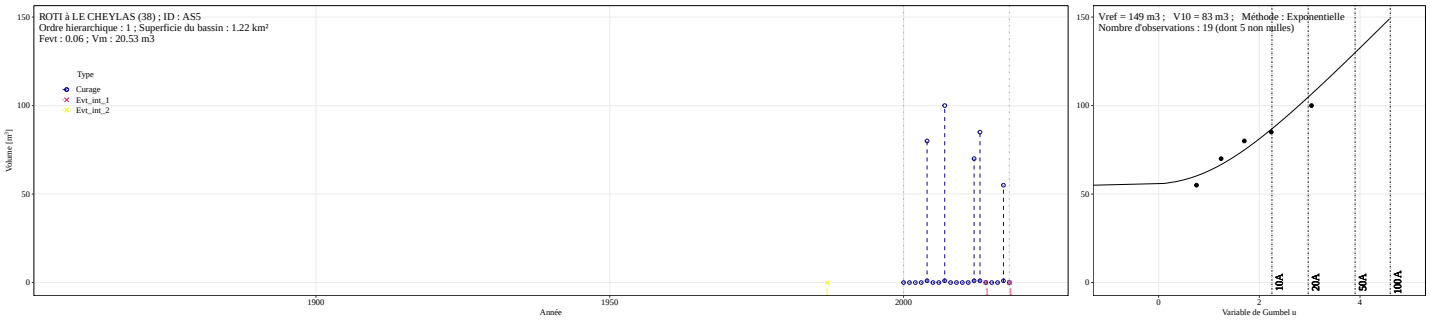

ROMANETIERE à SAINT−QUENTIN−SUR−ISÈRE (38) ; ID : AS32
Ordre hierarchique : 1 ; Superficie du bassin : 3.6 km²
Fevt : 0 ; Vm : 128.25 m3
Type
Curage
Evt_int_3
Evt_int_inc
Volume [m³]
Année
Vref = 2271 m3 ; V10 = 658 m3 ; Méthode : Exponentielle
Nombre d'observations : 44 (dont 5 non nulles)
10A
20A
50A
100A
Variable de Gumbel u

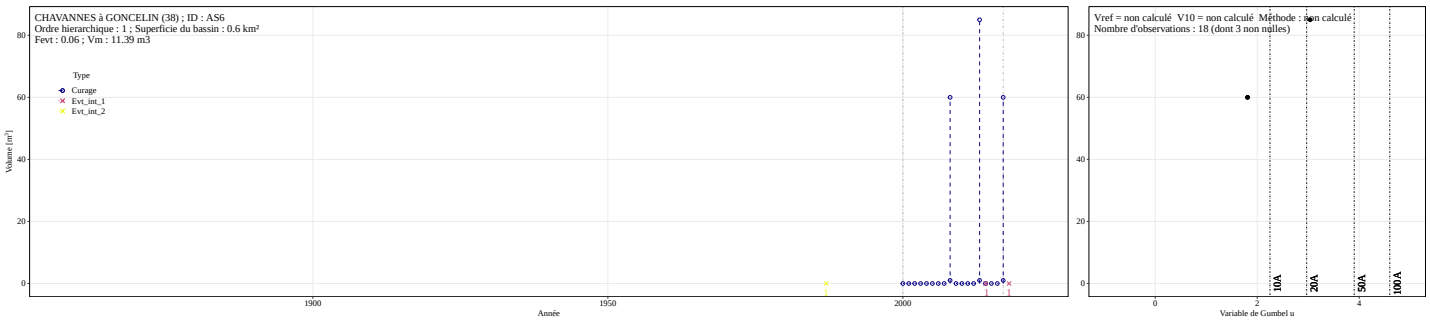

RENAUDIERE à ST−QUENTIN−SUR−ISERE (38) ; ID : AS33
Ordre hierarchique : 1 ; Superficie du bassin : 4.24 km²
Fevt : 0 ; Vm : 47.11 m3
Type
Curage
Volume [m³]
Année
Vref = non calculé V10 = non calculé Méthode : non calculé
Nombre d'observations : 19 (dont 3 non nulles)
10A
20A
50A
100A
Variable de Gumbel u

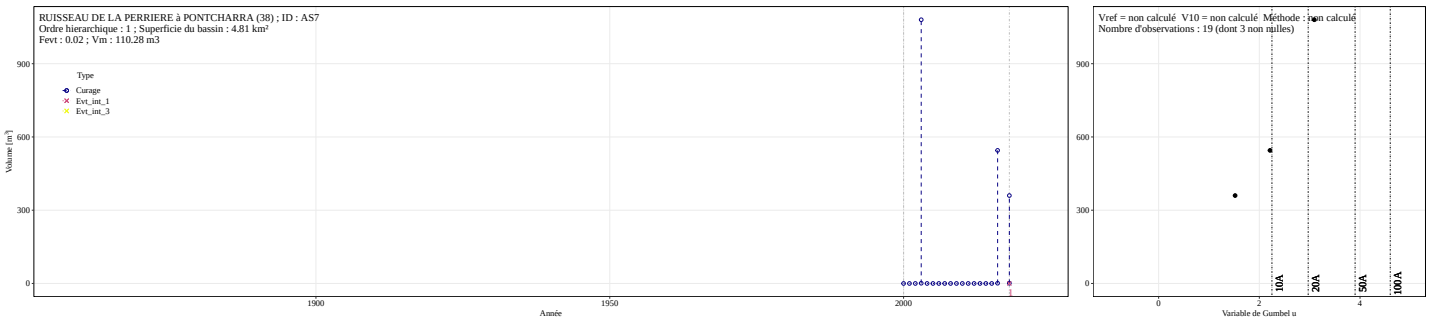

RIVAL à TULLINS (38) ; ID : AS34
Ordre hierarchique : 1 ; Superficie du bassin : 2.84 km²
Fevt : 0 ; Vm : 225.05 m3
Type
Curage
Evt_int_1
Volume [m³]
Année
Vref = 1672 m3 ; V10 = 783 m3 ; Méthode : Exponentielle
Nombre d'observations : 19 (dont 7 non nulles)
10A
20A
50A
100A
Variable de Gumbel u

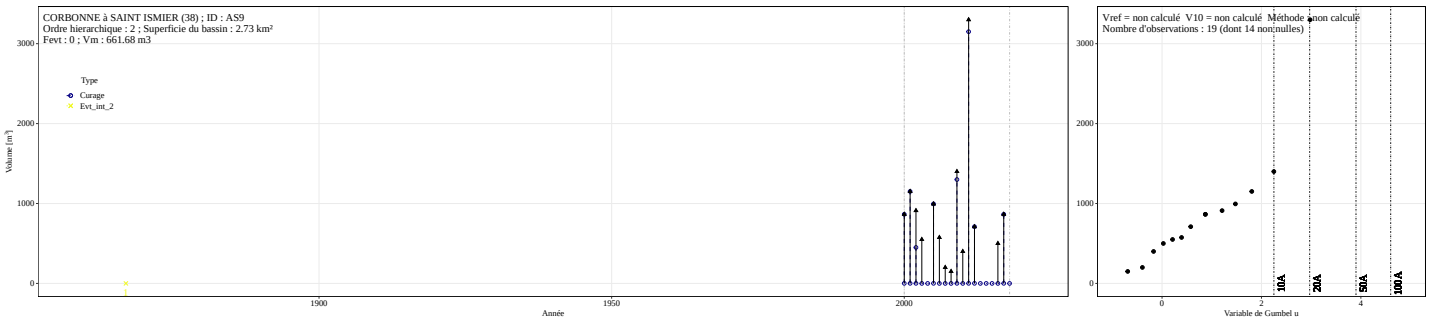

GORGEAT à POLLIENAS (38) ; ID : AS35
Ordre hierarchique : 1 ; Superficie du bassin : 1.51 km²
Fevt : 0 ; Vm : 91.58 m3
Type
Curage
Volume [m³]
Année
Vref = non calculé V10 = non calculé Méthode : non calculé
Nombre d'observations : 19 (dont 2 non nulles)
10A
20A
50A
100A
Variable de Gumbel u

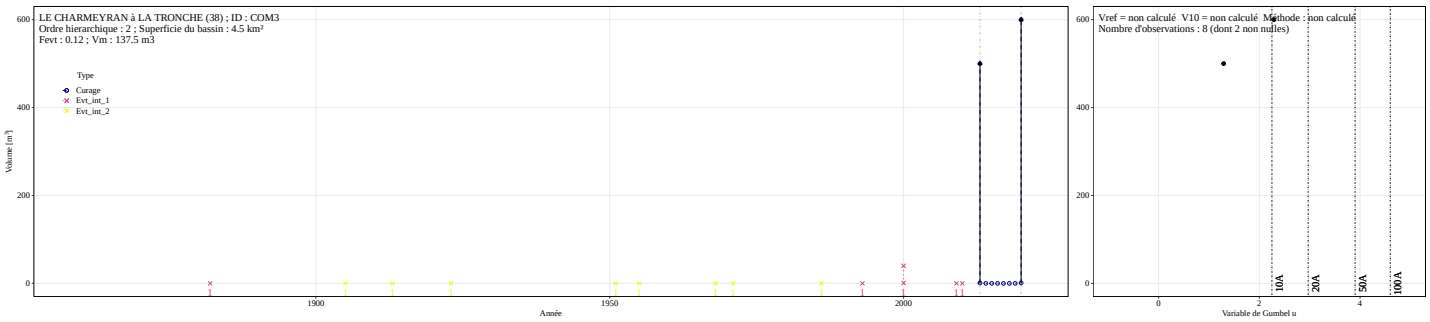

MALADIERE à LA BUISSIERE (38) ; ID : AS4
Ordre hierarchique : 1 ; Superficie du bassin : 6.08 km²
Fevt : 0.04 ; Vm : 104.25 m3
Type
Curage
Evt_int_1
Evt_int_2
Evt_int_3
Volume [m³]
Année
Vref = 680 m3 ; V10 = 430 m3 ; Méthode : Exponentielle
Nombre d'observations : 20 (dont 5 non nulles)
10A
20A
50A
100A
Variable de Gumbel u

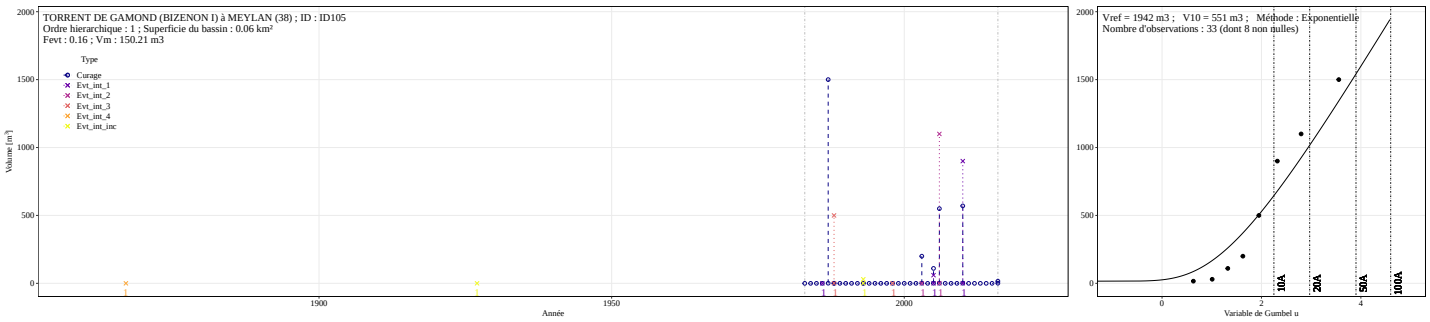

ROTI à LE CHEYLAS (38) ; ID : AS5
Ordre hierarchique : 1 ; Superficie du bassin : 1.22 km²
Fevt : 0.06 ; Vm : 20.53 m3
Type
Curage
Evt_int_1
Evt_int_2
Volume [m³]
Année
Vref = 149 m3 ; V10 = 83 m3 ; Méthode : Exponentielle
Nombre d'observations : 19 (dont 5 non nulles)
10A
20A
50A
100A
Variable de Gumbel u

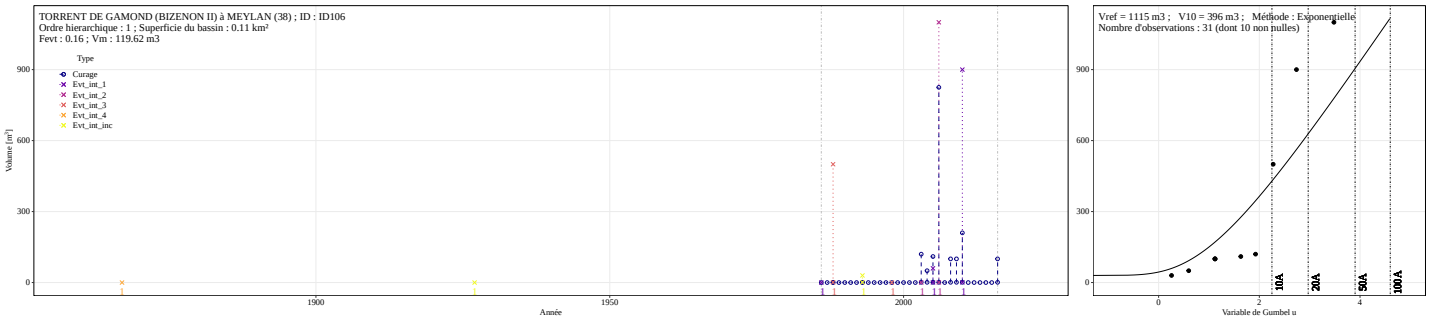

CHAVANNES à GONCELIN (38) ; ID : AS6
Ordre hierarchique : 1 ; Superficie du bassin : 0.6 km²
Fevt : 0.06 ; Vm : 11.39 m3
Type
Curage
Evt_int_1
Evt_int_2
Volume [m³]
Année
Vref = non calculé V10 = non calculé Méthode : non calculé
Nombre d'observations : 18 (dont 3 non nulles)
10A
20A
50A
100A
Variable de Gumbel u

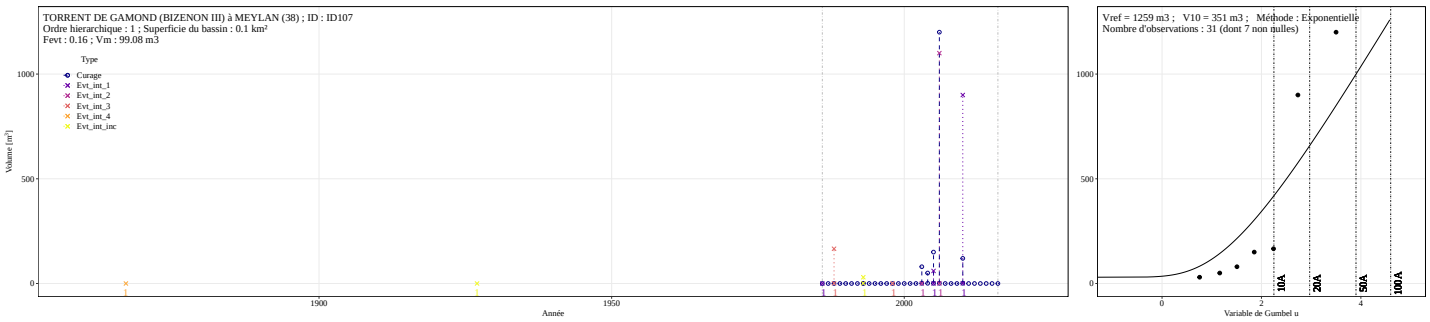

RUISSEAU DE LA PERRIERE à PONTCHARRA (38) ; ID : AS7
Ordre hierarchique : 1 ; Superficie du bassin : 4.81 km²
Fevt : 0.02 ; Vm : 110.28 m3
Type
Curage
Evt_int_1
Evt_int_3
Volume [m³]
Année
Vref = non calculé V10 = non calculé Méthode : non calculé
Nombre d'observations : 19 (dont 3 non nulles)
10A
20A
50A
100A
Variable de Gumbel u

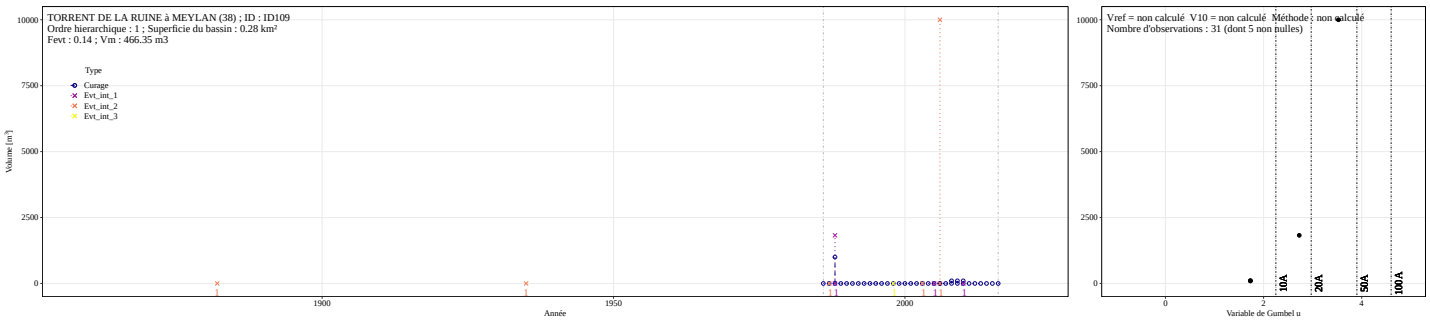

CORBONNE à SAINT ISMIER (38) ; ID : AS9
Ordre hierarchique : 2 ; Superficie du bassin : 2.73 km²
Fevt : 0 ; Vm : 661.68 m3
Type
Curage
Evt_int_2
Volume [m³]
Année
Vref = non calculé V10 = non calculé Méthode : non calculé
Nombre d'observations : 19 (dont 14 non nulles)
10A
20A
50A
100A
Variable de Gumbel u

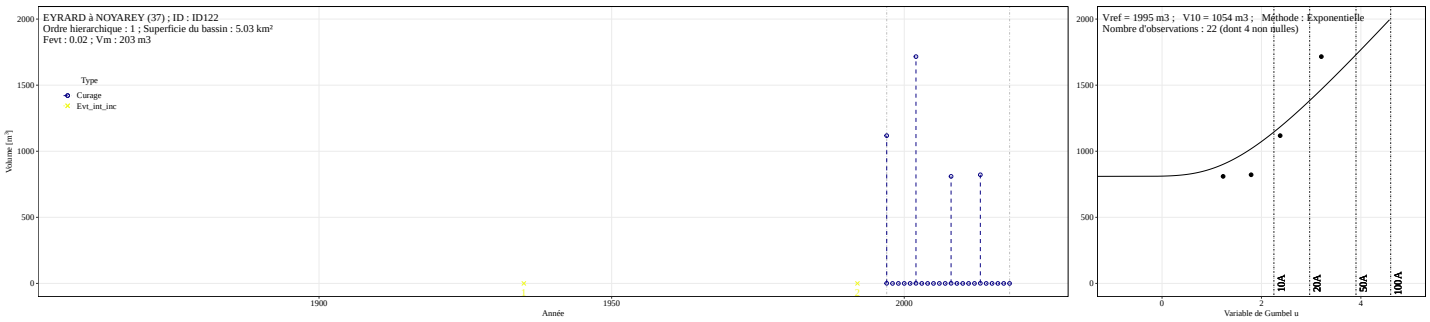

LE CHARMEYRAN à LA TRONCHE (38) ; ID : COM3
Ordre hierarchique : 2 ; Superficie du bassin : 4.5 km²
Fevt : 0.12 ; Vm : 137.5 m3
Type
Curage
Evt_int_1
Evt_int_2
Volume [m³]
Année
Vref = non calculé V10 = non calculé Méthode : non calculé
Nombre d'observations : 8 (dont 2 non nulles)
10A
20A
50A
100A
Variable de Gumbel u

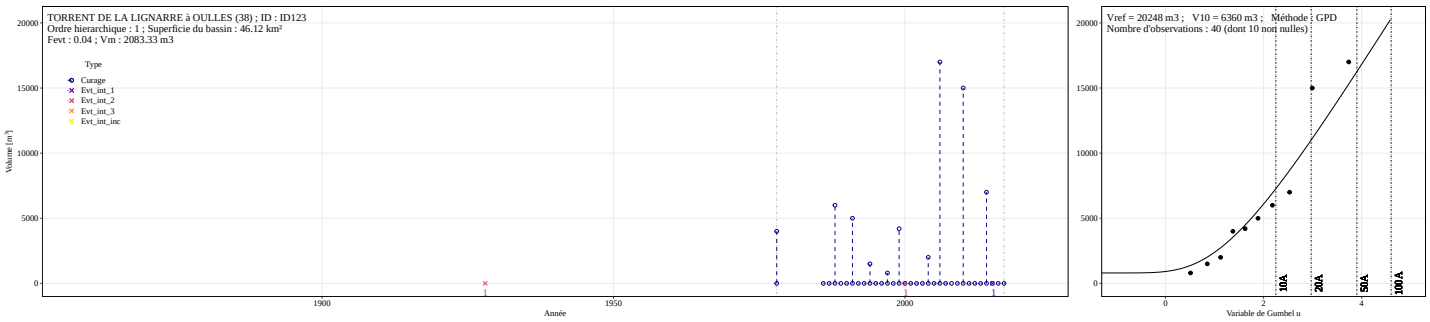

TORRENT DE GAMOND (BIZENON I) à MEYLAN (38) ; ID : ID105
Ordre hierarchique : 1 ; Superficie du bassin : 0.06 km²
Fevt : 0.16 ; Vm : 150.21 m3
Type
Curage
Evt_int_1
Evt_int_2
Evt_int_3
Evt_int_4
Evt_int_inc
Volume [m³]
Année
Vref = 1942 m3 ; V10 = 551 m3 ; Méthode : Exponentielle
Nombre d'observations : 33 (dont 8 non nulles)
10A
20A
50A
100A
Variable de Gumbel u

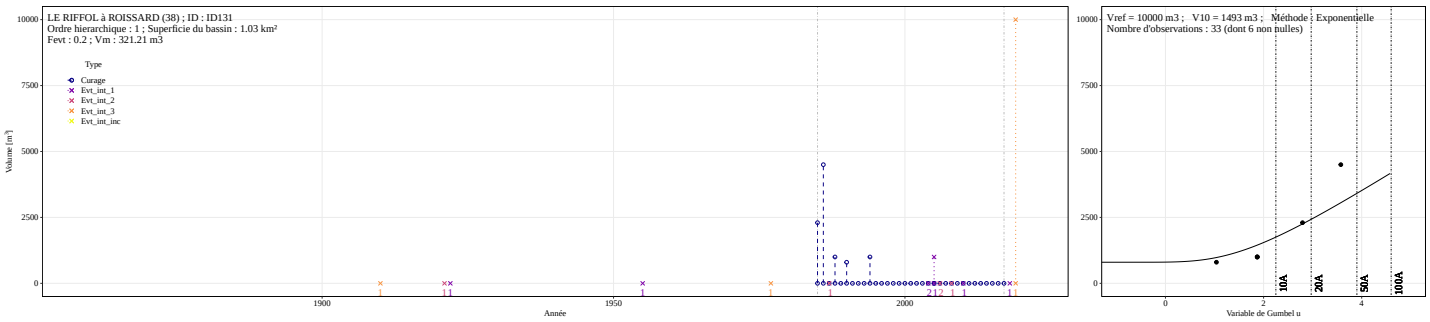

TORRENT DE GAMOND (BIZENON II) à MEYLAN (38) ; ID : ID106
Ordre hierarchique : 1 ; Superficie du bassin : 0.11 km²
Fevt : 0.16 ; Vm : 119.62 m3
Type
Curage
Evt_int_1
Evt_int_2
Evt_int_3
Evt_int_4
Evt_int_inc
Volume [m³]
Année
Vref = 1115 m3 ; V10 = 396 m3 ; Méthode : Exponentielle
Nombre d'observations : 31 (dont 10 non nulles)
10A
20A
50A
100A
Variable de Gumbel u

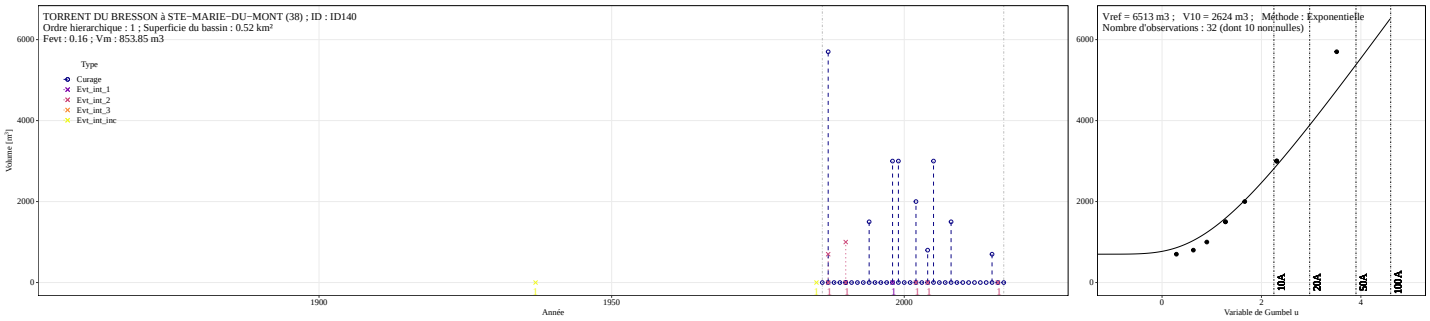

TORRENT DE GAMOND (BIZENON III) à MEYLAN (38) ; ID : ID107
Ordre hierarchique : 1 ; Superficie du bassin : 0.1 km²
Fevt : 0.16 ; Vm : 99.08 m3
Type
Curage
Evt_int_1
Evt_int_2
Evt_int_3
Evt_int_4
Evt_int_inc
Volume [m³]
Année
Vref = 1259 m3 ; V10 = 351 m3 ; Méthode : Exponentielle
Nombre d'observations : 31 (dont 7 non nulles)
10A
20A
50A
100A
Variable de Gumbel u

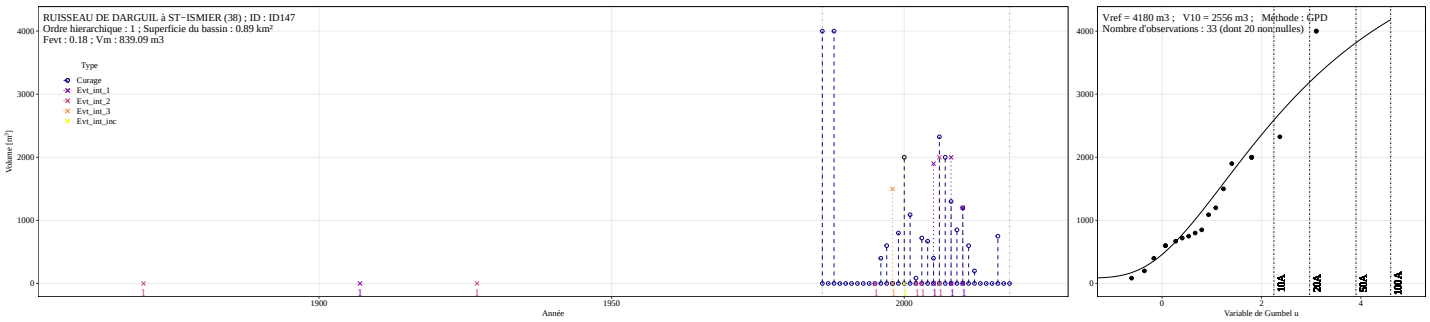

TORRENT DE LA RUINE à MEYLAN (38) ; ID : ID109
Ordre hierarchique : 1 ; Superficie du bassin : 0.28 km²
Fevt : 0.14 ; Vm : 466.35 m3
Type
Curage
Evt_int_1
Evt_int_2
Evt_int_3
Volume [m³]
Année
Vref = non calculé V10 = non calculé Méthode : non calculé
Nombre d'observations : 31 (dont 5 non nulles)
10A
20A
50A
100A
Variable de Gumbel u

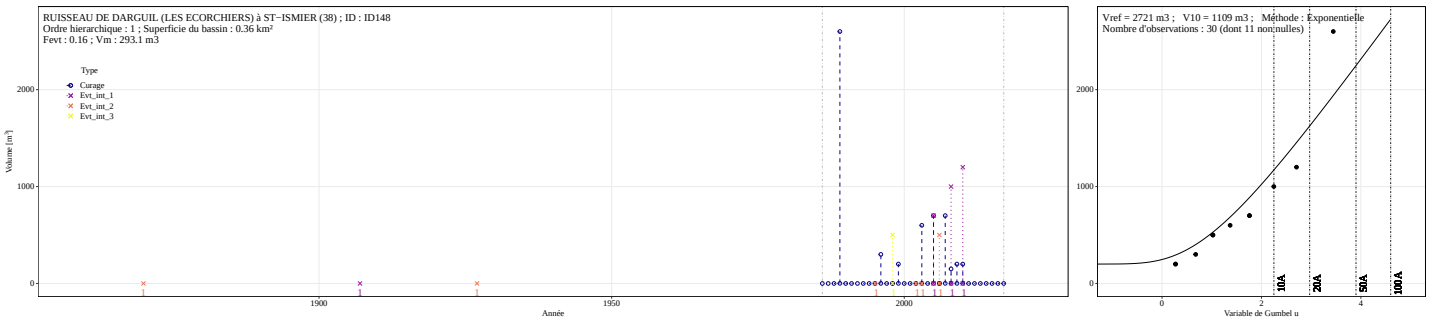

EYRARD à NOYAREY (37) ; ID : ID122
Ordre hierarchique : 1 ; Superficie du bassin : 5.03 km²
Fevt : 0.02 ; Vm : 203 m3
Type
Curage
Evt_int_inc
Volume [m³]
Année
Vref = 1995 m3 ; V10 = 1054 m3 ; Méthode : Exponentielle
Nombre d'observations : 22 (dont 4 non nulles)
10A
20A
50A
100A
Variable de Gumbel u

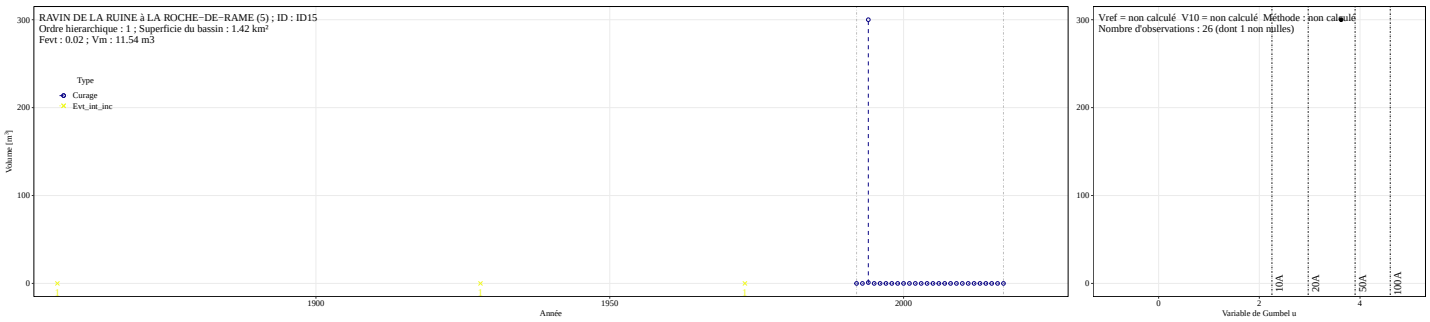

TORRENT DE LA LIGNARRE à OULLES (38) ; ID : ID123
Ordre hierarchique : 1 ; Superficie du bassin : 46.12 km²
Fevt : 0.04 ; Vm : 2083.33 m3
Type
Curage
Evt_int_1
Evt_int_2
Evt_int_3
Evt_int_inc
Volume [m³]
Année
Vref = 20248 m3 ; V10 = 6360 m3 ; Méthode : GPD
Nombre d'observations : 40 (dont 10 non nulles)
10A
20A
50A
100A
Variable de Gumbel u

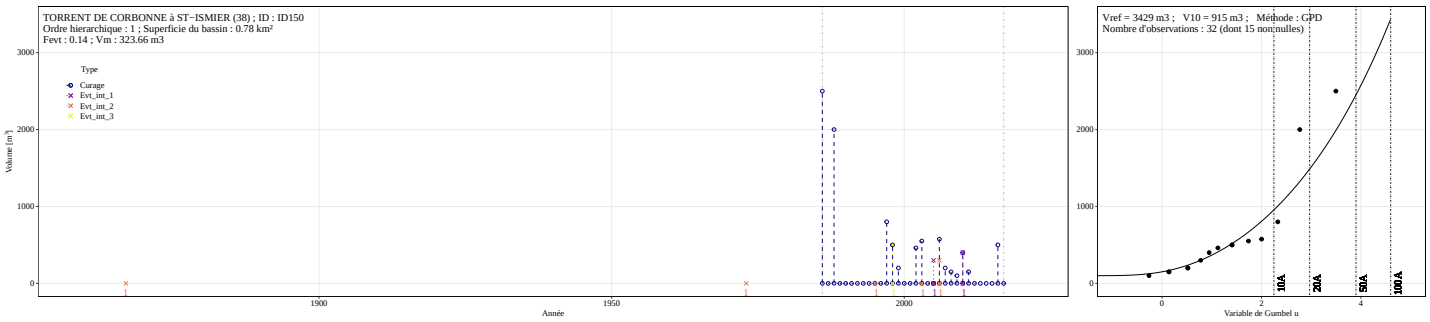

LE RIFFOL à ROISSARD (38) ; ID : ID131
Ordre hierarchique : 1 ; Superficie du bassin : 1.03 km²
Fevt : 0.2 ; Vm : 321.21 m3
Type
Curage
Evt_int_1
Evt_int_2
Evt_int_3
Evt_int_inc
Volume [m³]
Année
Vref = 10000 m3 ; V10 = 1493 m3 ; Méthode : Exponentielle
Nombre d'observations : 33 (dont 6 non nulles)
10A
20A
50A
100A
Variable de Gumbel u

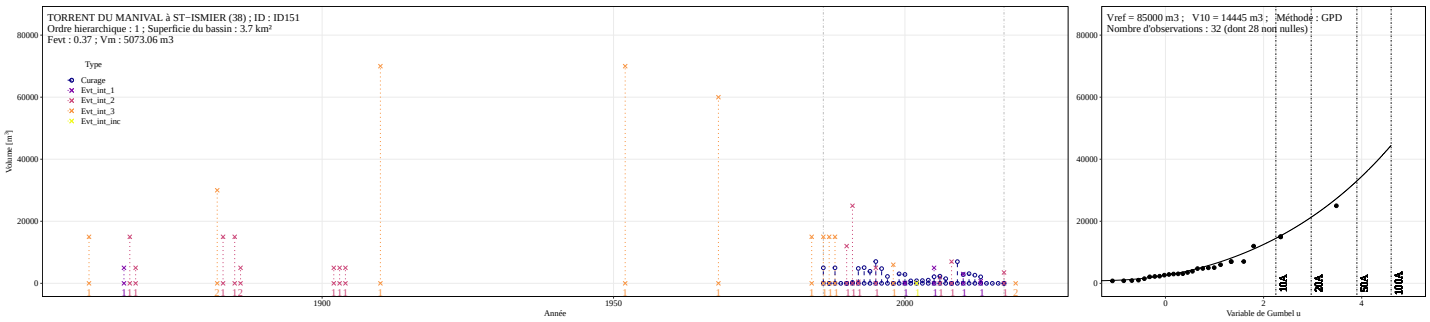

TORRENT DU BRESSON à STE−MARIE−DU−MONT (38) ; ID : ID140
Ordre hierarchique : 1 ; Superficie du bassin : 0.52 km²
Fevt : 0.16 ; Vm : 853.85 m3
Type
Curage
Evt_int_1
Evt_int_2
Evt_int_3
Evt_int_inc
Volume [m³]
Année
Vref = 6513 m3 ; V10 = 2624 m3 ; Méthode : Exponentielle
Nombre d'observations : 32 (dont 10 non nulles)
10A
20A
50A
100A
Variable de Gumbel u

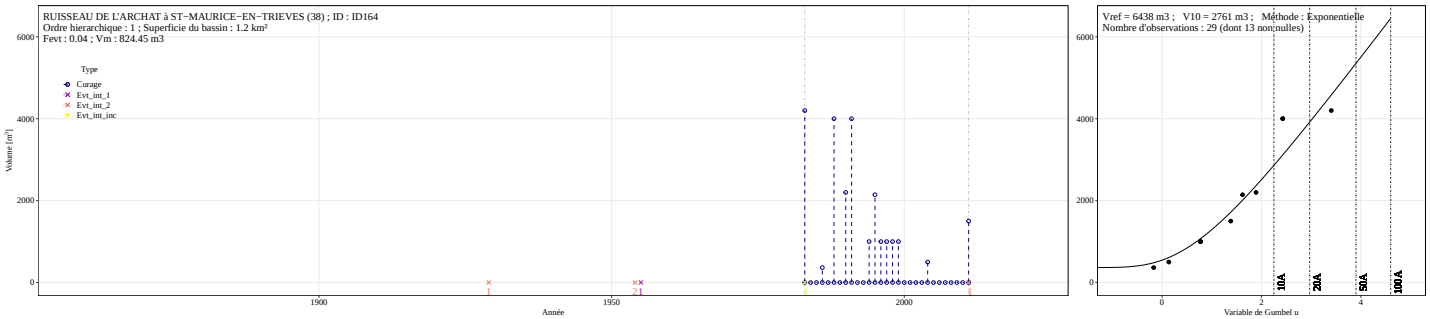

RUISSEAU DE DARGUIL à ST−ISMIER (38) ; ID : ID147
Ordre hierarchique : 1 ; Superficie du bassin : 0.89 km²
Fevt : 0.18 ; Vm : 839.09 m3
Type
Curage
Evt_int_1
Evt_int_2
Evt_int_3
Evt_int_inc
Volume [m³]
Année
Vref = 4180 m3 ; V10 = 2556 m3 ; Méthode : GPD
Nombre d'observations : 33 (dont 20 non nulles)
10A
20A
50A
100A
Variable de Gumbel u

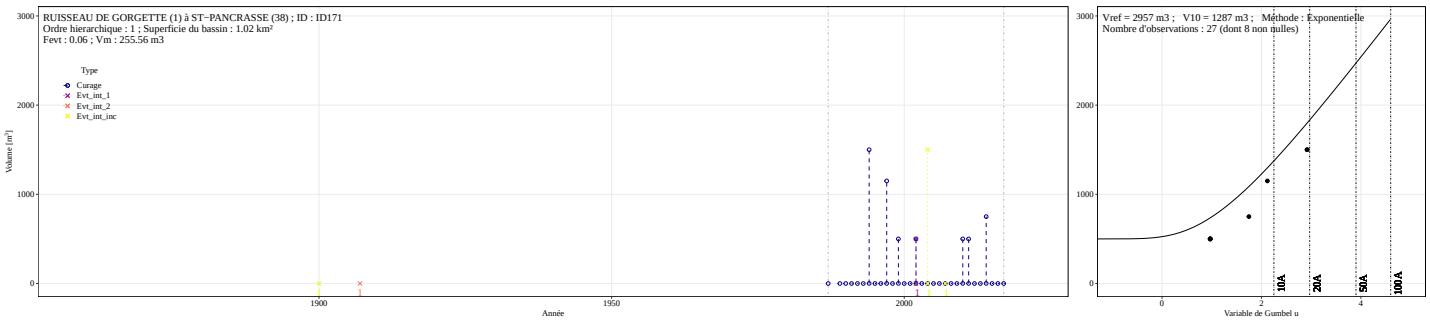

RUISSEAU DE DARGUIL (LES ECORCHIERS) à ST−ISMIER (38) ; ID : ID148
Ordre hierarchique : 1 ; Superficie du bassin : 0.36 km²
Fevt : 0.16 ; Vm : 293.1 m3
Type
Curage
Evt_int_1
Evt_int_2
Evt_int_3
Volume [m³]
Année
Vref = 2721 m3 ; V10 = 1109 m3 ; Méthode : Exponentielle
Nombre d'observations : 30 (dont 11 non nulles)
10A
20A
50A
100A
Variable de Gumbel u

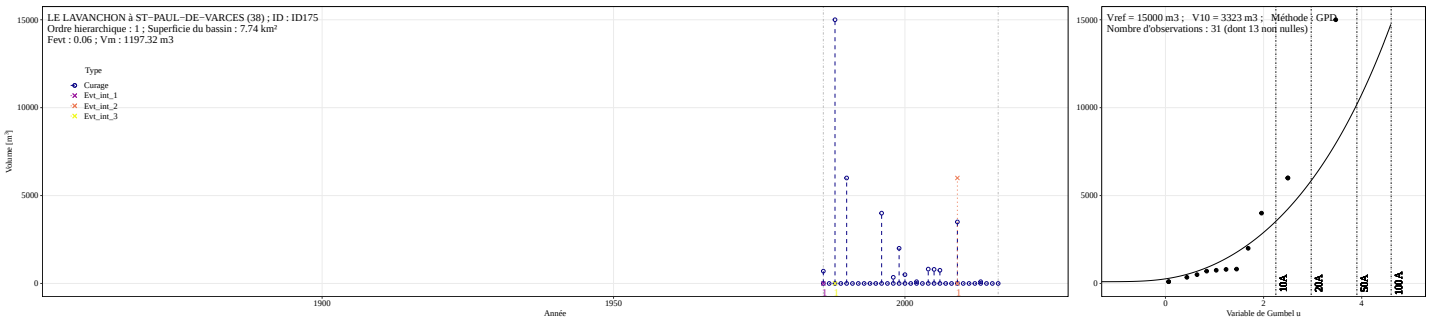

RAVIN DE LA RUINE à LA ROCHE−DE−RAME (5) ; ID : ID15
Ordre hierarchique : 1 ; Superficie du bassin : 1.42 km²
Fevt : 0.02 ; Vm : 11.54 m3
Type
Curage
Evt_int_inc
Volume [m³]
Année
Vref = non calculé V10 = non calculé Méthode : non calculé
Nombre d'observations : 26 (dont 1 non nulles)
10A
20A
50A
100A
Variable de Gumbel u

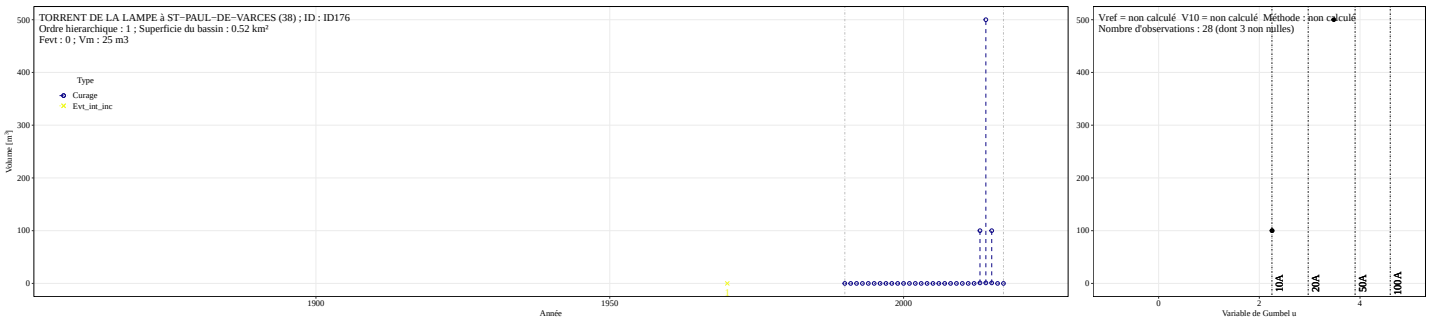

TORRENT DE CORBONNE à ST−ISMIER (38) ; ID : ID150
Ordre hierarchique : 1 ; Superficie du bassin : 0.78 km²
Fevt : 0.14 ; Vm : 323.66 m3
Type
Curage
Evt_int_1
Evt_int_2
Evt_int_3
Volume [m³]
Année
Vref = 3429 m3 ; V10 = 915 m3 ; Méthode : GPD
Nombre d'observations : 32 (dont 15 non nulles)
10A
20A
50A
100A
Variable de Gumbel u

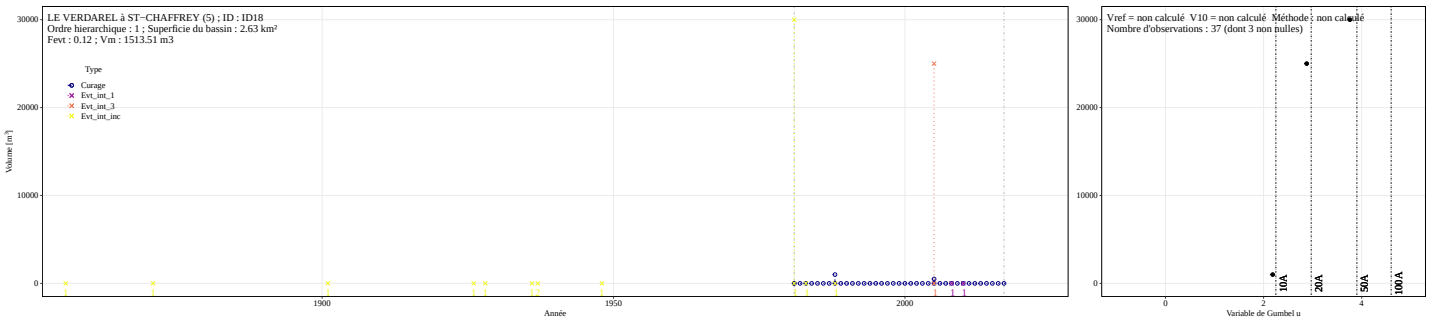

TORRENT DU MANIVAL à ST−ISMIER (38) ; ID : ID151
Ordre hierarchique : 1 ; Superficie du bassin : 3.7 km²
Fevt : 0.37 ; Vm : 5073.06 m3
Type
Curage
Evt_int_1
Evt_int_2
Evt_int_3
Evt_int_inc
Volume [m³]
Année
Vref = 85000 m3 ; V10 = 14445 m3 ; Méthode : GPD
Nombre d'observations : 32 (dont 28 non nulles)
10A
20A
50A
100A
Variable de Gumbel u

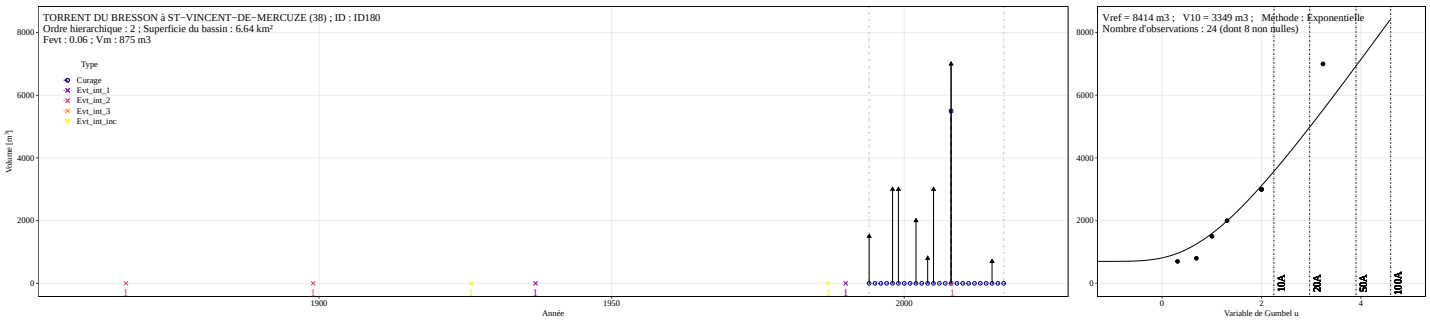

RUISSEAU DE L'ARCHAT à ST−MAURICE−EN−TRIEVES (38) ; ID : ID164
Ordre hierarchique : 1 ; Superficie du bassin : 1.2 km²
Fevt : 0.04 ; Vm : 824.45 m3
Type
Curage
Evt_int_1
Evt_int_2
Evt_int_inc
Volume [m³]
Année
Vref = 6438 m3 ; V10 = 2761 m3 ; Méthode : Exponentielle
Nombre d'observations : 29 (dont 13 non nulles)
10A
20A
50A
100A
Variable de Gumbel u

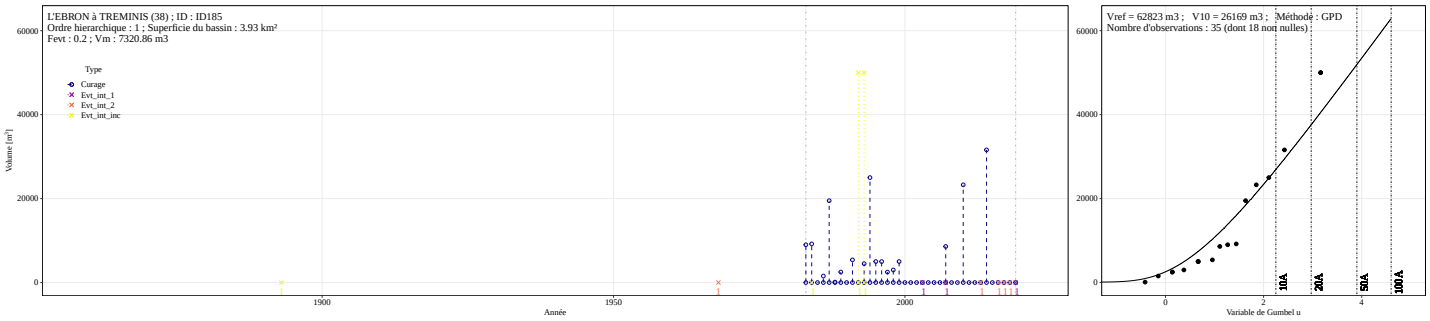

RUISSEAU DE GORGETTE (1) à ST−PANCRASSE (38) ; ID : ID171
Ordre hierarchique : 1 ; Superficie du bassin : 1.02 km²
Fevt : 0.06 ; Vm : 255.56 m3
Type
Curage
Evt_int_1
Evt_int_2
Evt_int_inc
Volume [m³]
Année
Vref = 2957 m3 ; V10 = 1287 m3 ; Méthode : Exponentielle
Nombre d'observations : 27 (dont 8 non nulles)
10A
20A
50A
100A
Variable de Gumbel u

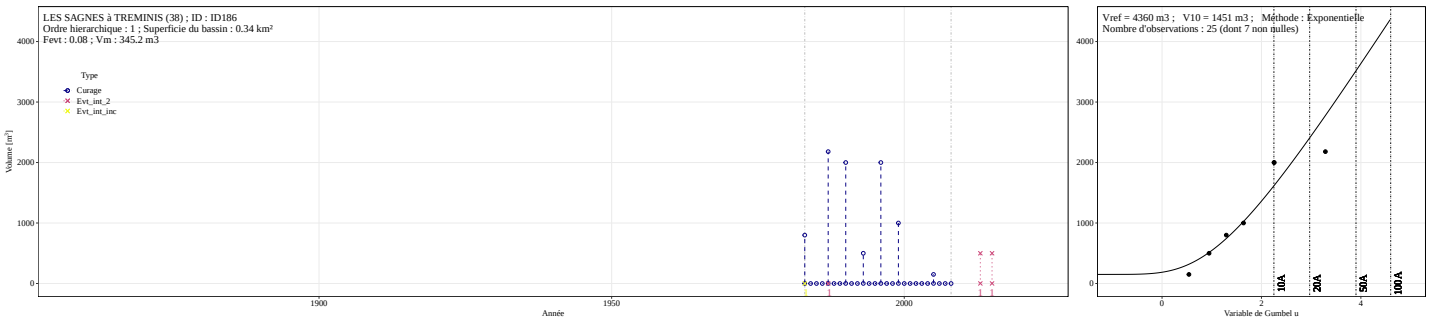

LE LAVANCHON à ST−PAUL−DE−VARCES (38) ; ID : ID175
Ordre hierarchique : 1 ; Superficie du bassin : 7.74 km²
Fevt : 0.06 ; Vm : 1197.32 m3
Type
Curage
Evt_int_1
Evt_int_2
Evt_int_3
Volume [m³]
Année
Vref = 15000 m3 ; V10 = 3323 m3 ; Méthode : GPD
Nombre d'observations : 31 (dont 13 non nulles)
10A
20A
50A
100A
Variable de Gumbel u

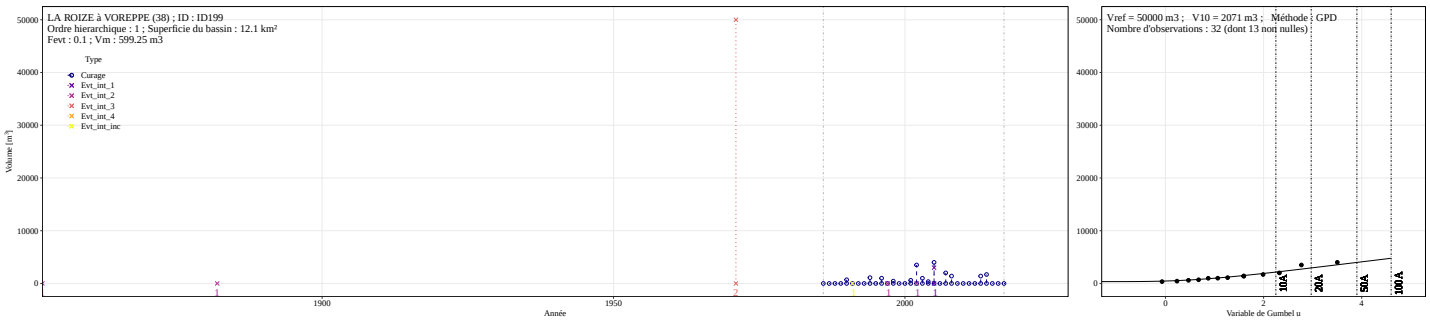

TORRENT DE LA LAMPE à ST−PAUL−DE−VARCES (38) ; ID : ID176
Ordre hierarchique : 1 ; Superficie du bassin : 0.52 km²
Fevt : 0 ; Vm : 25 m3
Type
Curage
Evt_int_inc
Volume [m³]
Année
Vref = non calculé V10 = non calculé Méthode : non calculé
Nombre d'observations : 28 (dont 3 non nulles)
10A
20A
50A
100A
Variable de Gumbel u

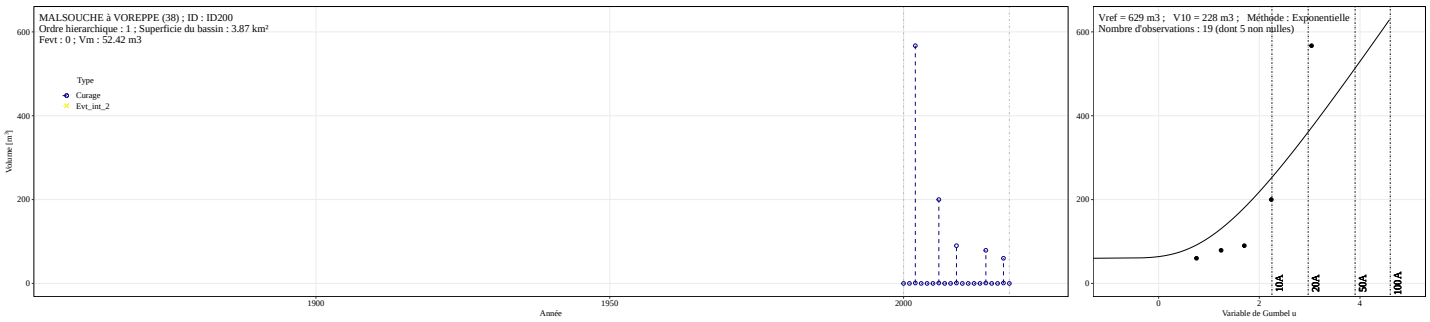

LE VERDAREL à ST−CHAFFREY (5) ; ID : ID18
Ordre hierarchique : 1 ; Superficie du bassin : 2.63 km²
Fevt : 0.12 ; Vm : 1513.51 m3
Type
Curage
Evt_int_1
Evt_int_3
Evt_int_inc
Volume [m³]
Année
Vref = non calculé V10 = non calculé Méthode : non calculé
Nombre d'observations : 37 (dont 3 non nulles)
10A
20A
50A
100A
Variable de Gumbel u

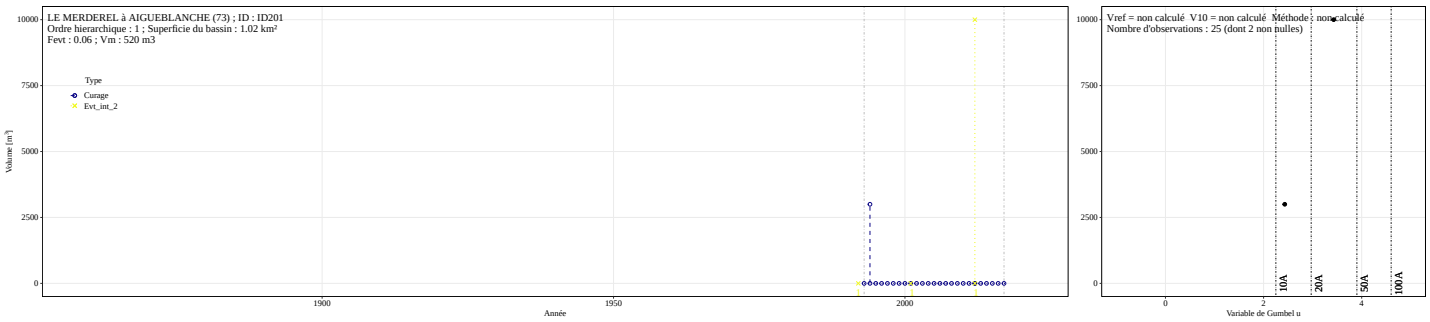

TORRENT DU BRESSON à ST−VINCENT−DE−MERCUZE (38) ; ID : ID180
Ordre hierarchique : 2 ; Superficie du bassin : 6.64 km²
Fevt : 0.06 ; Vm : 875 m3
Type
Curage
Evt_int_1
Evt_int_2
Evt_int_3
Evt_int_inc
Volume [m³]
Année
Vref = 8414 m3 ; V10 = 3349 m3 ; Méthode : Exponentielle
Nombre d'observations : 24 (dont 8 non nulles)
10A
20A
50A
100A
Variable de Gumbel u

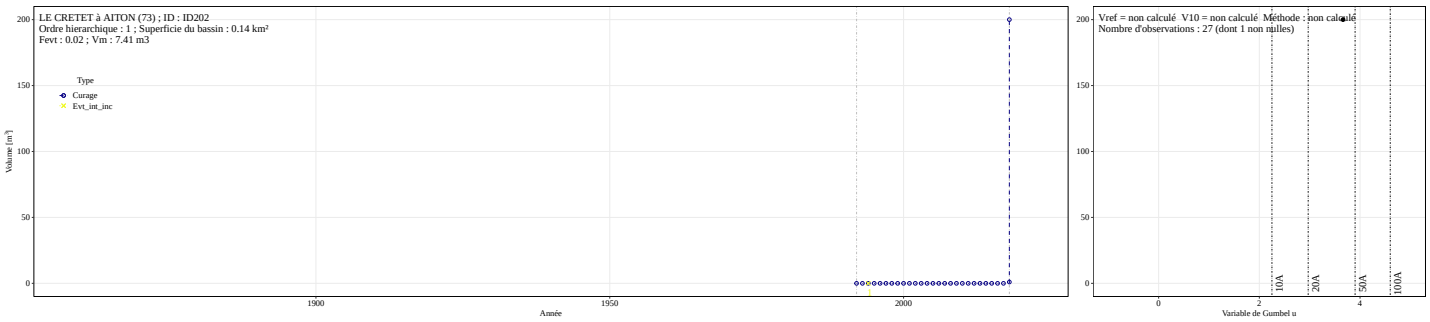

L'EBRON à TREMINIS (38) ; ID : ID185
Ordre hierarchique : 1 ; Superficie du bassin : 3.93 km²
Fevt : 0.2 ; Vm : 7320.86 m3
Type
Curage
Evt_int_1
Evt_int_2
Evt_int_inc
Volume [m³]
Année
Vref = 62823 m3 ; V10 = 26169 m3 ; Méthode : GPD
Nombre d'observations : 35 (dont 18 non nulles)
10A
20A
50A
100A
Variable de Gumbel u

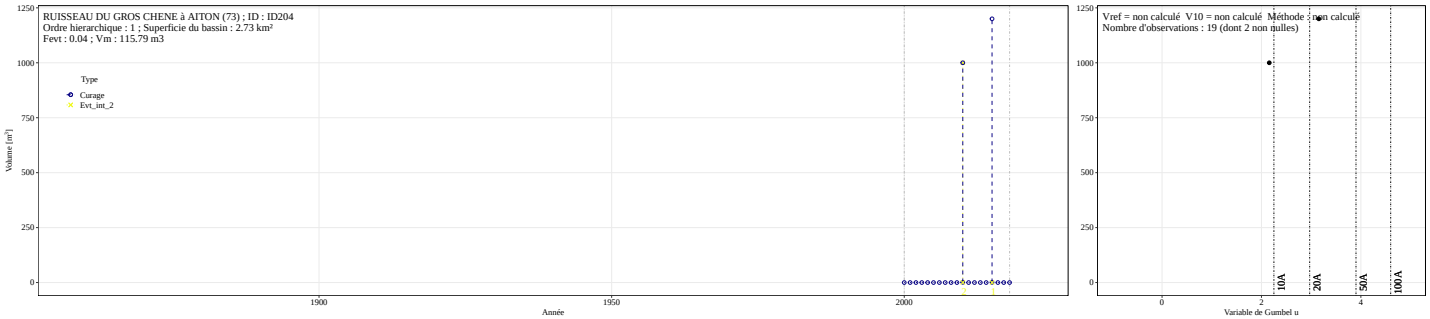

LES SAGNES à TREMINIS (38) ; ID : ID186
Ordre hierarchique : 1 ; Superficie du bassin : 0.34 km²
Fevt : 0.08 ; Vm : 345.2 m3
Type
Curage
Evt_int_2
Evt_int_inc
Volume [m³]
Année
Vref = 4360 m3 ; V10 = 1451 m3 ; Méthode : Exponentielle
Nombre d'observations : 25 (dont 7 non nulles)
10A
20A
50A
100A
Variable de Gumbel u

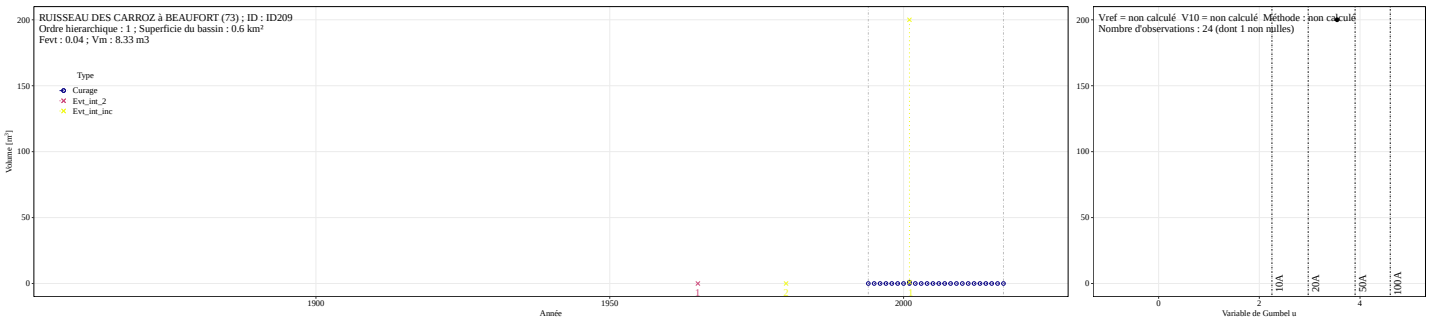

LA ROIZE à VOREPPE (38) ; ID : ID199
Ordre hierarchique : 1 ; Superficie du bassin : 12.1 km²
Fevt : 0.1 ; Vm : 599.25 m3
Type
Curage
Evt_int_1
Evt_int_2
Evt_int_3
Evt_int_4
Evt_int_inc
Volume [m³]
Année
Vref = 50000 m3 ; V10 = 2071 m3 ; Méthode : GPD
Nombre d'observations : 32 (dont 13 non nulles)
10A
20A
50A
100A
Variable de Gumbel u

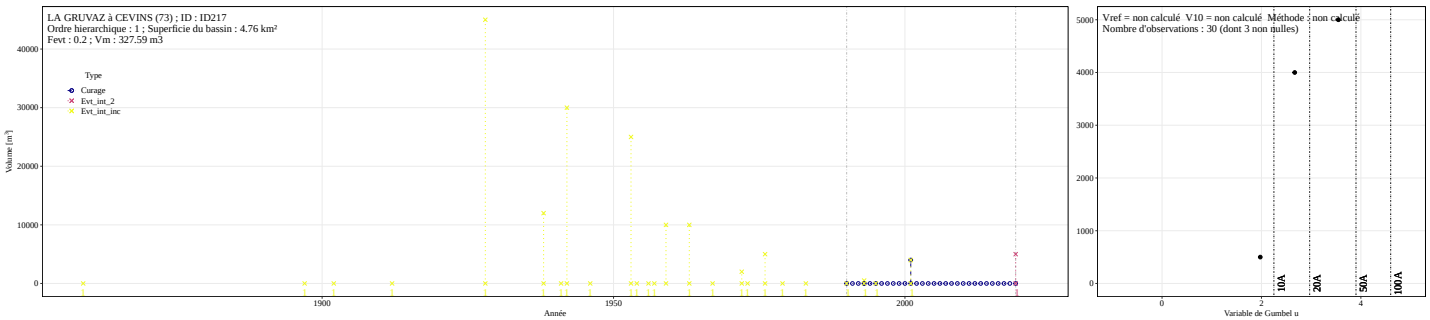

MALSOUCHE à VOREPPE (38) ; ID : ID200
Ordre hierarchique : 1 ; Superficie du bassin : 3.87 km²
Fevt : 0 ; Vm : 52.42 m3
Type
Curage
Evt_int_2
Volume [m³]
Année
Vref = 629 m3 ; V10 = 228 m3 ; Méthode : Exponentielle
Nombre d'observations : 19 (dont 5 non nulles)
10A
20A
50A
100A
Variable de Gumbel u

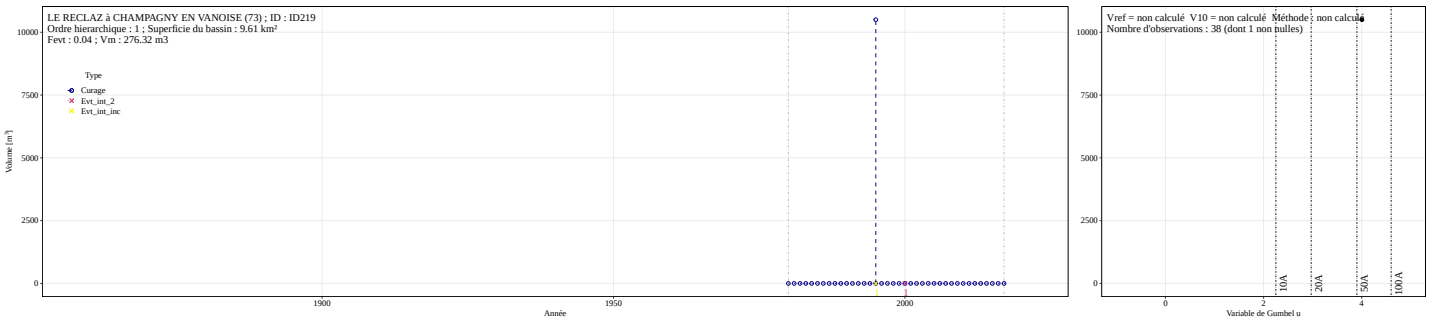

LE MERDEREL à AIGUEBLANCHE (73) ; ID : ID201
Ordre hierarchique : 1 ; Superficie du bassin : 1.02 km²
Fevt : 0.06 ; Vm : 520 m3
Type
Curage
Evt_int_2
Volume [m³]
Année
Vref = non calculé V10 = non calculé Méthode : non calculé
Nombre d'observations : 25 (dont 2 non nulles)
10A
20A
50A
100A
Variable de Gumbel u

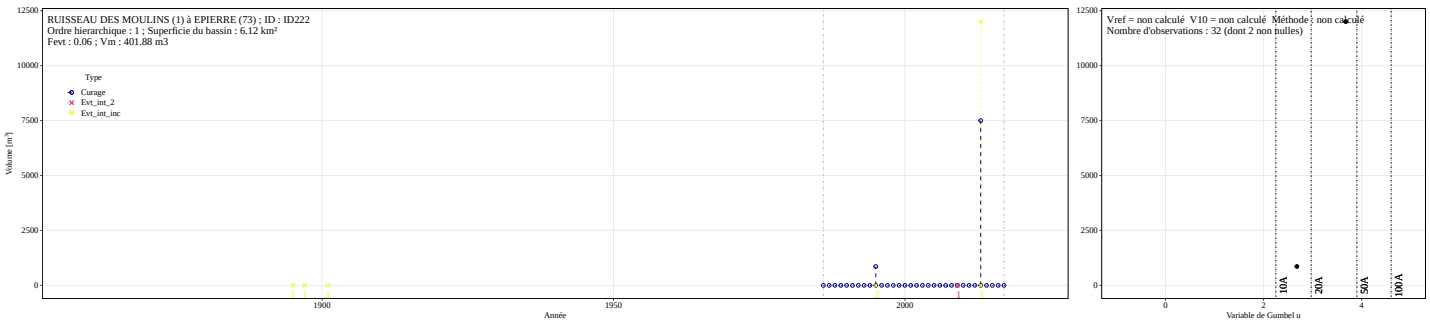

LE CRETET à AITON (73) ; ID : ID202
Ordre hierarchique : 1 ; Superficie du bassin : 0.14 km²
Fevt : 0.02 ; Vm : 7.41 m3
Type
Curage
Evt_int_inc
Volume [m³]
Année
Vref = non calculé V10 = non calculé Méthode : non calculé
Nombre d'observations : 27 (dont 1 non nulles)
10A
20A
50A
100A
Variable de Gumbel u

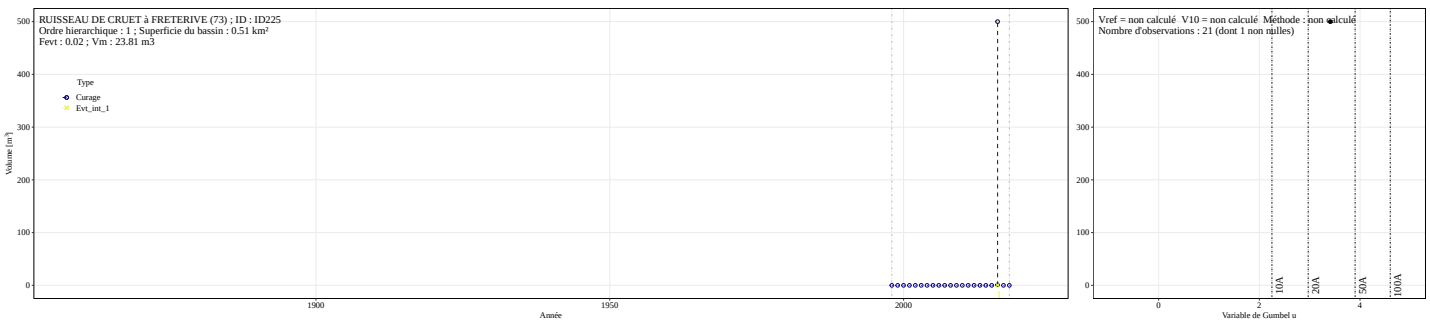

RUISSEAU DU GROS CHENE à AITON (73) ; ID : ID204
Ordre hierarchique : 1 ; Superficie du bassin : 2.73 km²
Fevt : 0.04 ; Vm : 115.79 m3
Type
Curage
Evt_int_2
Volume [m³]
Année
Vref = non calculé V10 = non calculé Méthode : non calculé
Nombre d'observations : 19 (dont 2 non nulles)
10A
20A
50A
100A
Variable de Gumbel u

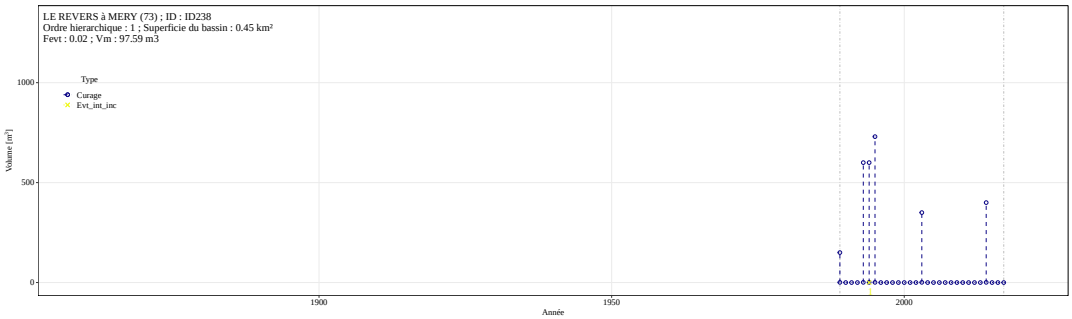

RUISSEAU DES CARROZ à BEAUFORT (73) ; ID : ID209
Ordre hierarchique : 1 ; Superficie du bassin : 0.6 km²
Fevt : 0.04 ; Vm : 8.33 m3
Type
Curage
Evt_int_2
Evt_int_inc
Volume [m³]
Année
Vref = non calculé V10 = non calculé Méthode : non calculé
Nombre d'observations : 24 (dont 1 non nulles)
10A
20A
50A
100A
Variable de Gumbel u

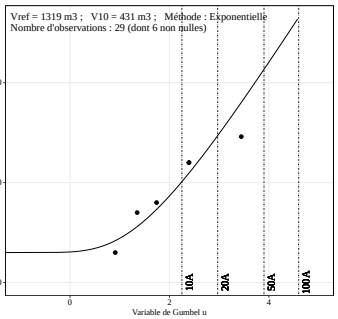

LA GRUVAZ à CEVINS (73) ; ID : ID217
Ordre hierarchique : 1 ; Superficie du bassin : 4.76 km²
Fevt : 0.2 ; Vm : 327.59 m3
Type
Curage
Evt_int_2
Evt_int_inc
Volume [m³]
Année
Vref = non calculé V10 = non calculé Méthode : non calculé
Nombre d'observations : 30 (dont 3 non nulles)
10A
20A
50A
100A
Variable de Gumbel u

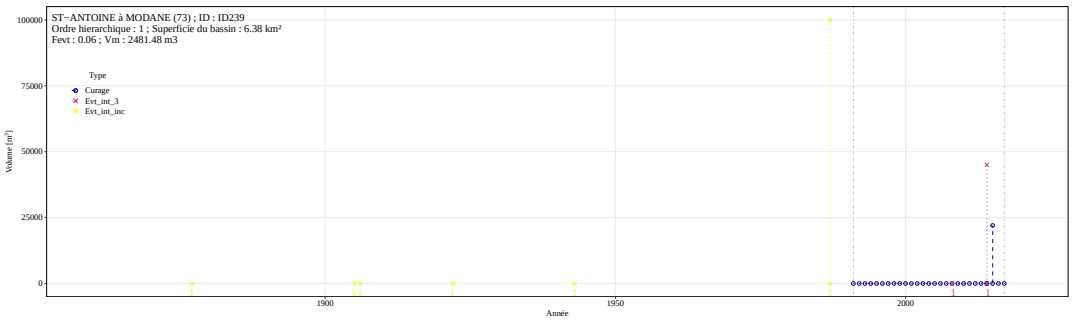

LE RECLAZ à CHAMPAGNY EN VANOISE (73) ; ID : ID219
Ordre hierarchique : 1 ; Superficie du bassin : 9.61 km²
Fevt : 0.04 ; Vm : 276.32 m3
Type
Curage
Evt_int_2
Evt_int_inc
Volume [m³]
Année
Vref = non calculé V10 = non calculé Méthode : non calculé
Nombre d'observations : 38 (dont 1 non nulles)
10A
20A
50A
100A
Variable de Gumbel u

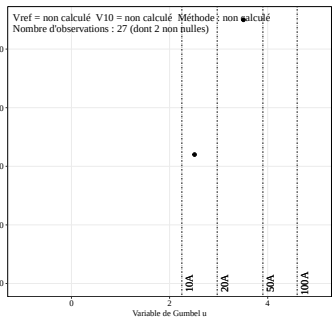

RUISSEAU DES MOULINS (1) à EPIERRE (73) ; ID : ID222
Ordre hierarchique : 1 ; Superficie du bassin : 6.12 km²
Fevt : 0.06 ; Vm : 401.88 m3
Type
Curage
Evt_int_2
Evt_int_inc
Volume [m³]
Année
Vref = non calculé V10 = non calculé Méthode : non calculé
Nombre d'observations : 32 (dont 2 non nulles)
10A
20A
50A
100A
Variable de Gumbel u

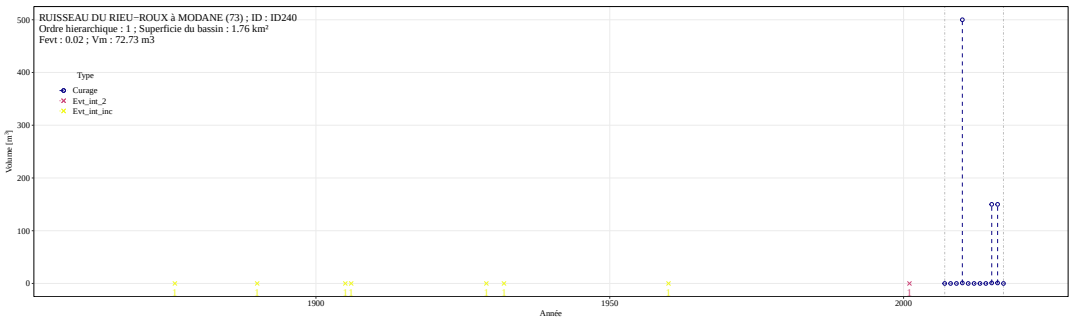

RUISSEAU DE CRUET à FRETERIVE (73) ; ID : ID225
Ordre hierarchique : 1 ; Superficie du bassin : 0.51 km²
Fevt : 0.02 ; Vm : 23.81 m3
Type
Curage
Evt_int_1
Volume [m³]
Année
Vref = non calculé V10 = non calculé Méthode : non calculé
Nombre d'observations : 21 (dont 1 non nulles)
10A
20A
50A
100A
Variable de Gumbel u

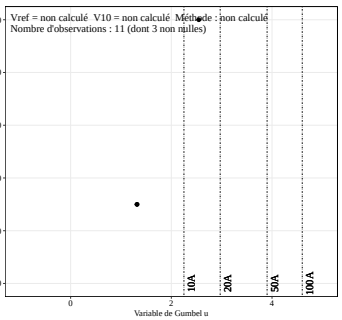

LE REVERS à MERY (73) ; ID : ID238
Ordre hierarchique : 1 ; Superficie du bassin : 0.45 km²
Fevt : 0.02 ; Vm : 97.59 m3
Type
Curage
Evt_int_inc
Volume [m³]
Année

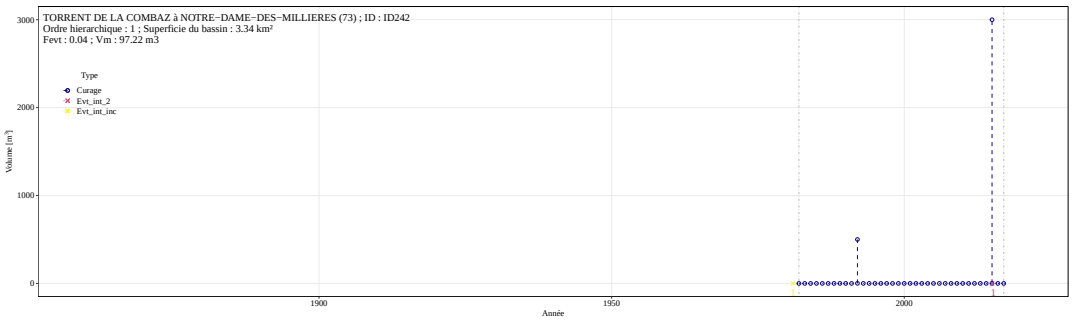

Vref = 1319 m3 ; V10 = 431 m3 ; Méthode : Exponentielle
Nombre d'observations : 29 (dont 6 non nulles)
10A
20A
50A
100A
Variable de Gumbel u

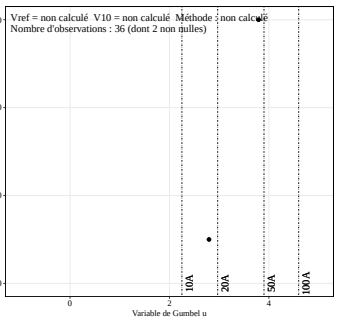

ST−ANTOINE à MODANE (73) ; ID : ID239
Ordre hierarchique : 1 ; Superficie du bassin : 6.38 km²
Fevt : 0.06 ; Vm : 2481.48 m3
Type
Curage
Evt_int_3
Evt_int_inc
Volume [m³]
Année

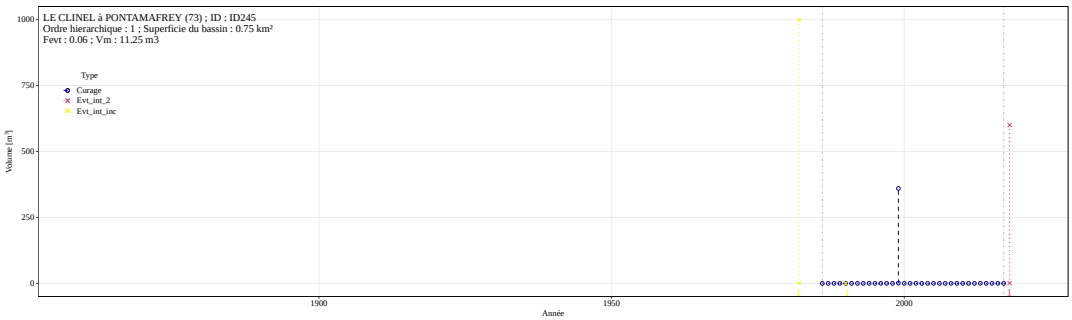

Vref = non calculé V10 = non calculé Méthode : non calculé
Nombre d'observations : 27 (dont 2 non nulles)
10A
20A
50A
100A
Variable de Gumbel u

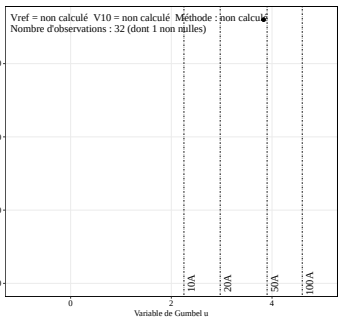

RUISSEAU DU RIEU−ROUX à MODANE (73) ; ID : ID240
Ordre hierarchique : 1 ; Superficie du bassin : 1.76 km²
Fevt : 0.02 ; Vm : 72.73 m3
Type
Curage
Evt_int_2
Evt_int_inc
Volume [m³]
Année

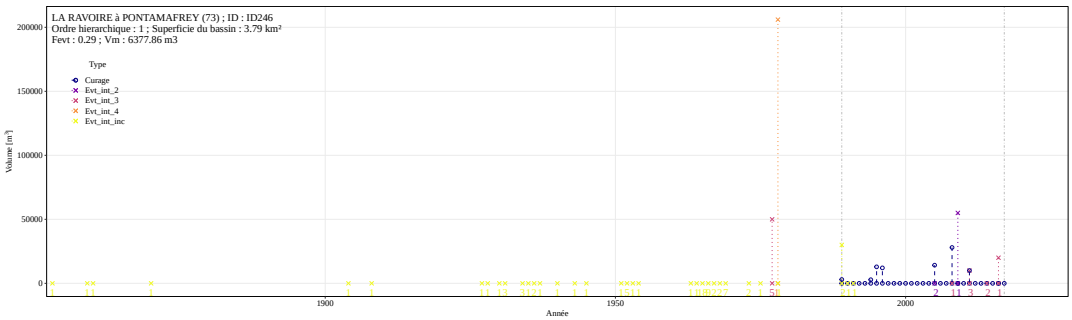

Vref = non calculé V10 = non calculé Méthode : non calculé
Nombre d'observations : 11 (dont 3 non nulles)
10A
20A
50A
100A
Variable de Gumbel u

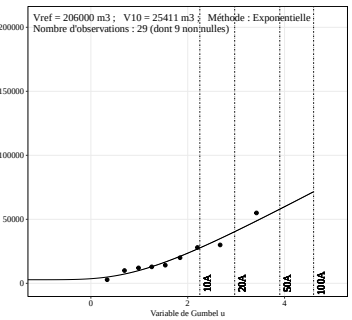

TORRENT DE LA COMBAZ à NOTRE−DAME−DES−MILLIERES (73) ; ID : ID242
Ordre hierarchique : 1 ; Superficie du bassin : 3.34 km²
Fevt : 0.04 ; Vm : 97.22 m3
Type
Curage
Evt_int_2
Evt_int_inc
Volume [m³]
Année

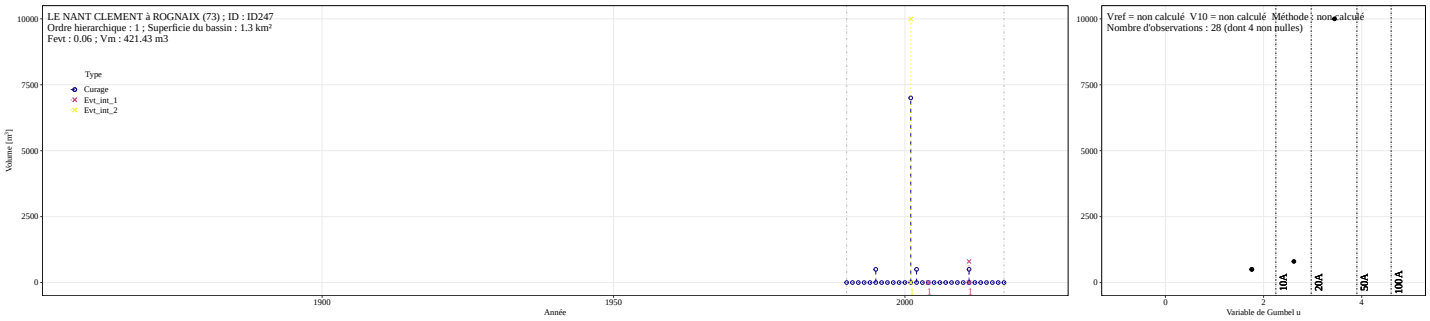

Vref = non calculé V10 = non calculé Méthode : non calculé
Nombre d'observations : 36 (dont 2 non nulles)
10A
20A
50A
100A
Variable de Gumbel u

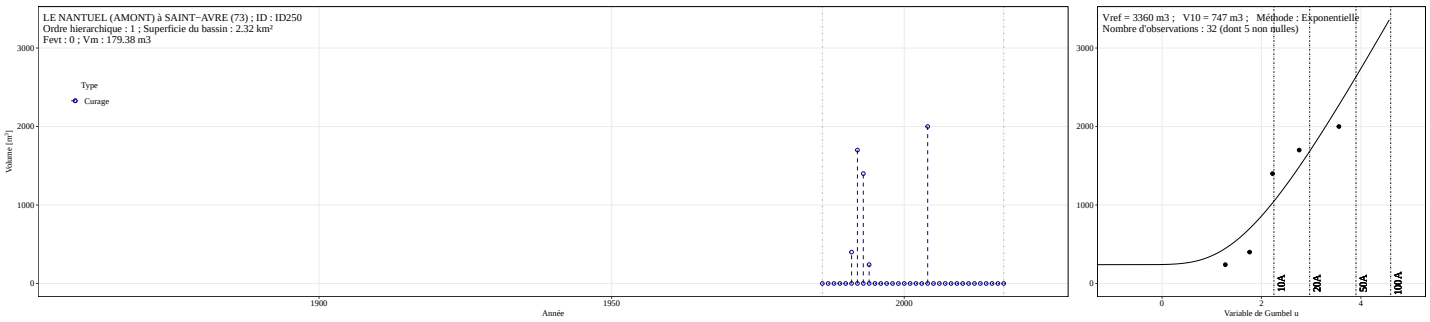

LE CLINEL à PONTAMAFREY (73) ; ID : ID245
Ordre hierarchique : 1 ; Superficie du bassin : 0.75 km²
Fevt : 0.06 ; Vm : 11.25 m3
Type
Curage
Evt_int_2
Evt_int_inc
Volume [m³]
Année

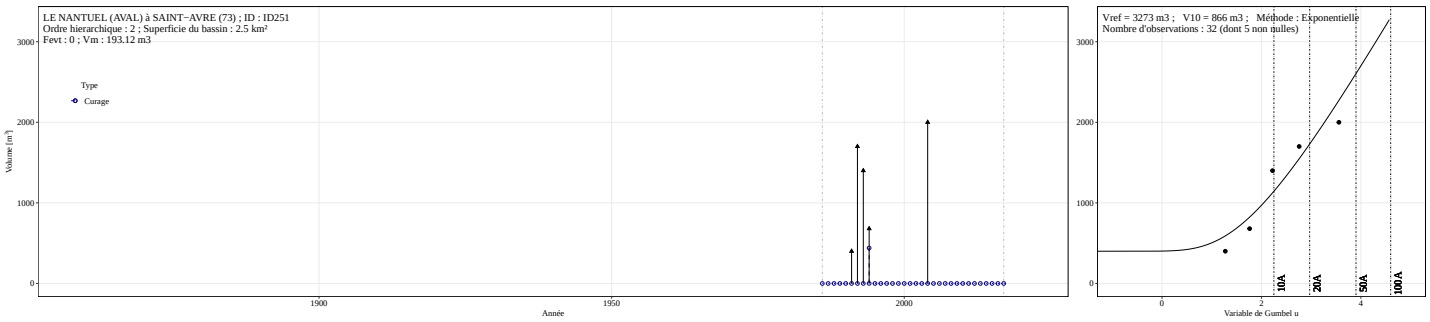

Vref = non calculé V10 = non calculé Méthode : non calculé
Nombre d'observations : 32 (dont 1 non nulles)
10A
20A
50A
100A
Variable de Gumbel u

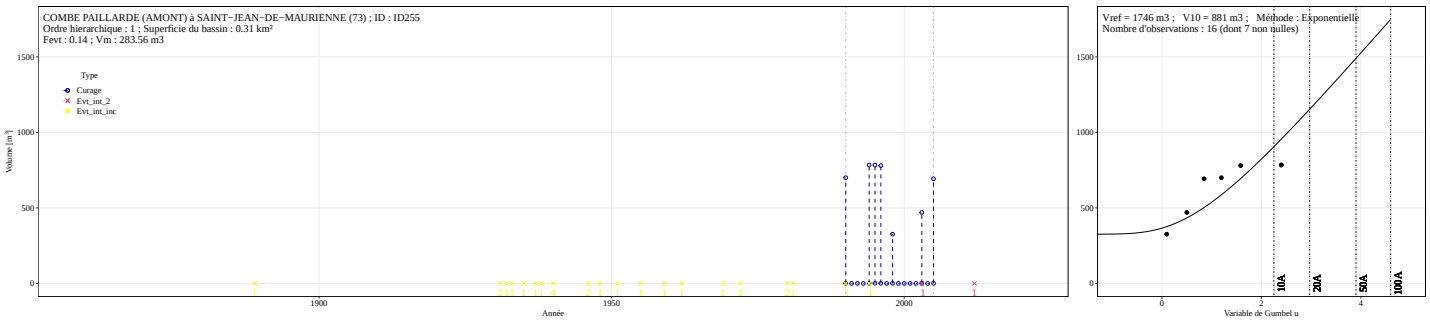

LA RAVOIRE à PONTAMAFREY (73) ; ID : ID246
Ordre hierarchique : 1 ; Superficie du bassin : 3.79 km²
Fevt : 0.29 ; Vm : 6377.86 m3
Type
Curage
Evt_int_2
Evt_int_3
Evt_int_4
Evt_int_inc
Volume [m³]
Année

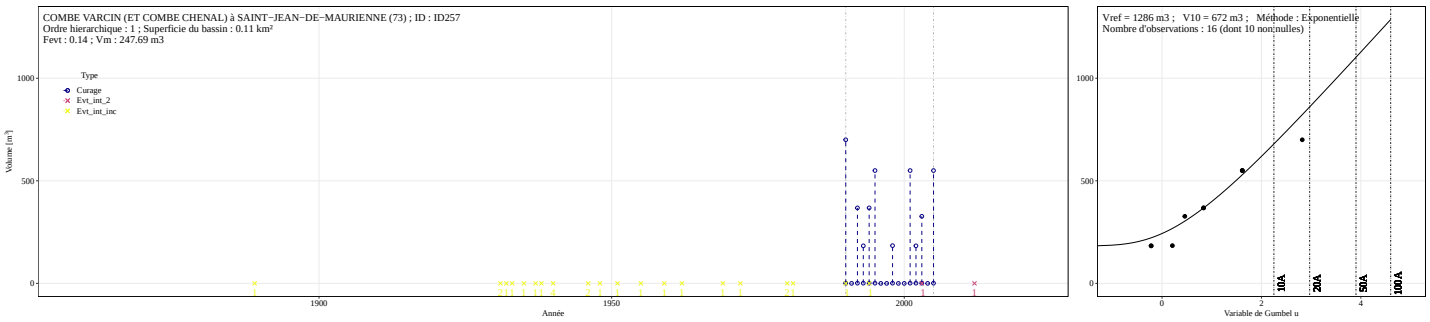

Vref = 206000 m3 ; V10 = 25411 m3 ; Méthode : Exponentielle
Nombre d'observations : 29 (dont 9 non nulles)
10A
20A
50A
100A
Variable de Gumbel u

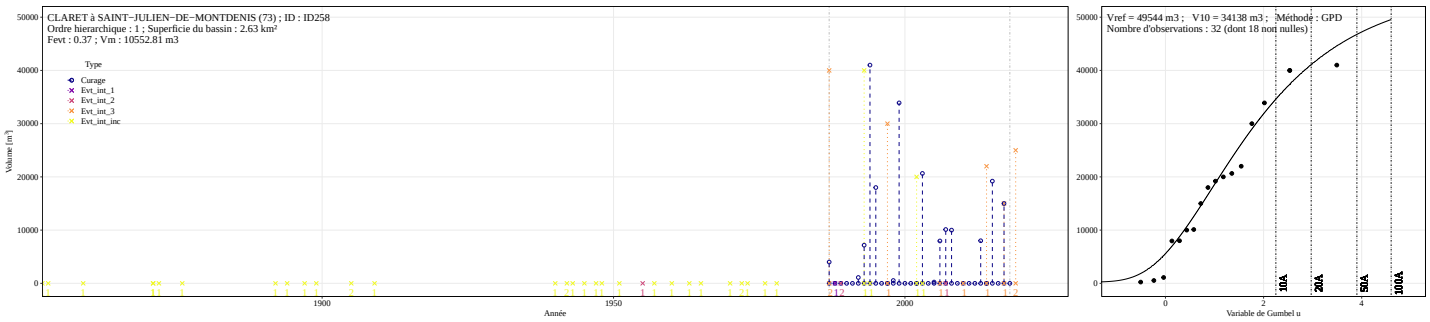

LE NANT CLEMENT à ROGNAIX (73) ; ID : ID247
Ordre hierarchique : 1 ; Superficie du bassin : 1.3 km²
Fevt : 0.06 ; Vm : 421.43 m3
Type
Curage
Evt_int_1
Evt_int_2
Volume [m³]
Année
Vref = non calculé V10 = non calculé Méthode : non calculé
Nombre d'observations : 28 (dont 4 non nulles)
10A
20A
50A
100A
Variable de Gumbel u

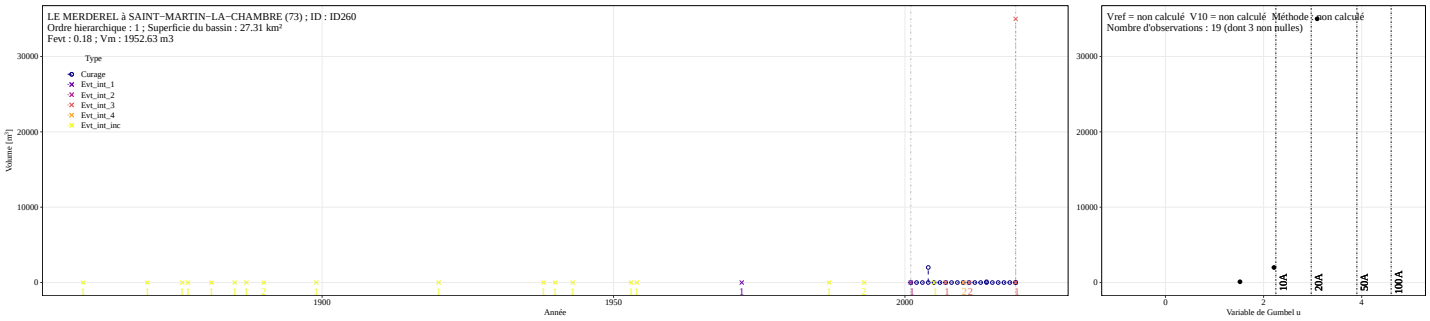

LE NANTUEL (AMONT) à SAINT−AVRE (73) ; ID : ID250
Ordre hierarchique : 1 ; Superficie du bassin : 2.32 km²
Fevt : 0 ; Vm : 179.38 m3
Type
Curage
Volume [m³]
Année
Vref = 3360 m3 ; V10 = 747 m3 ; Méthode : Exponentielle
Nombre d'observations : 32 (dont 5 non nulles)
10A
20A
50A
100A
Variable de Gumbel u

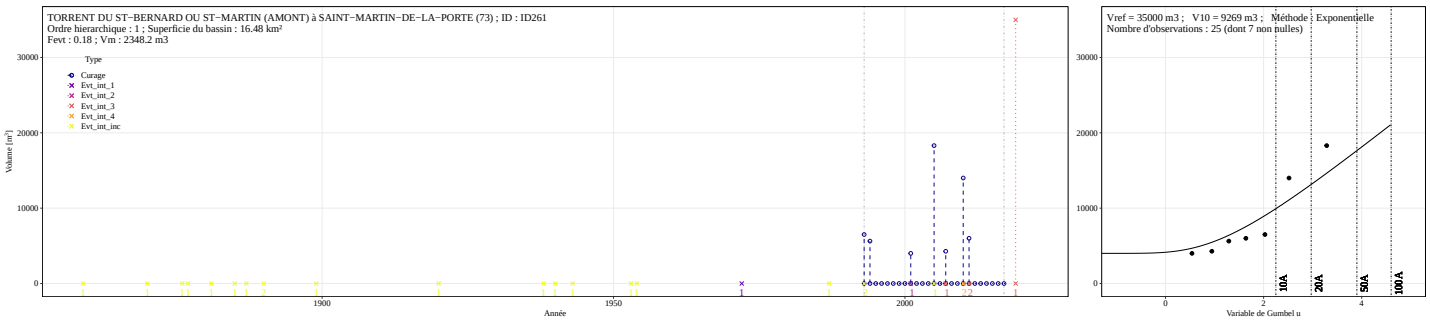

LE NANTUEL (AVAL) à SAINT−AVRE (73) ; ID : ID251
Ordre hierarchique : 2 ; Superficie du bassin : 2.5 km²
Fevt : 0 ; Vm : 193.12 m3
Type
Curage
Volume [m³]
Année
Vref = 3273 m3 ; V10 = 866 m3 ; Méthode : Exponentielle
Nombre d'observations : 32 (dont 5 non nulles)
10A
20A
50A
100A
Variable de Gumbel u

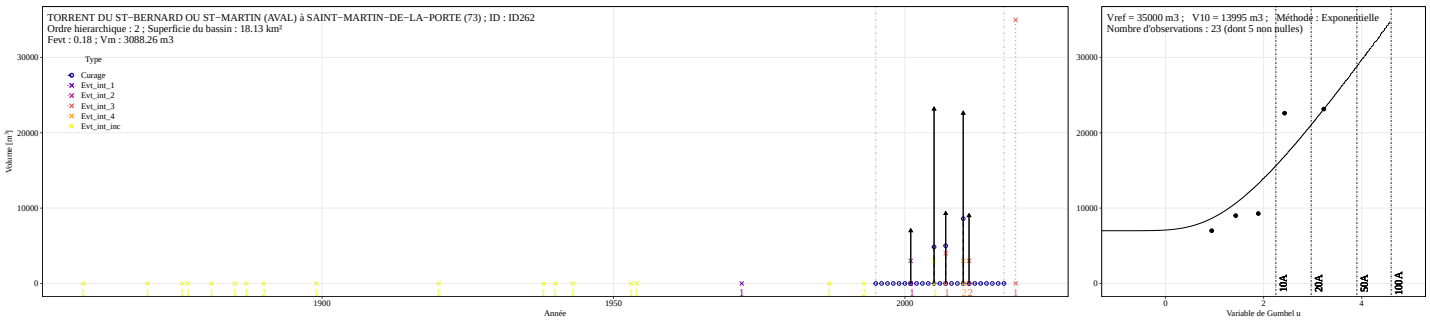

COMBE PAILLARDE (AMONT) à SAINT−JEAN−DE−MAURIENNE (73) ; ID : ID255
Ordre hierarchique : 1 ; Superficie du bassin : 0.31 km²
Fevt : 0.14 ; Vm : 283.56 m3
Type
Curage
Evt_int_2
Evt_int_inc
Volume [m³]
Année
Vref = 1746 m3 ; V10 = 881 m3 ; Méthode : Exponentielle
Nombre d'observations : 16 (dont 7 non nulles)
10A
20A
50A
100A
Variable de Gumbel u

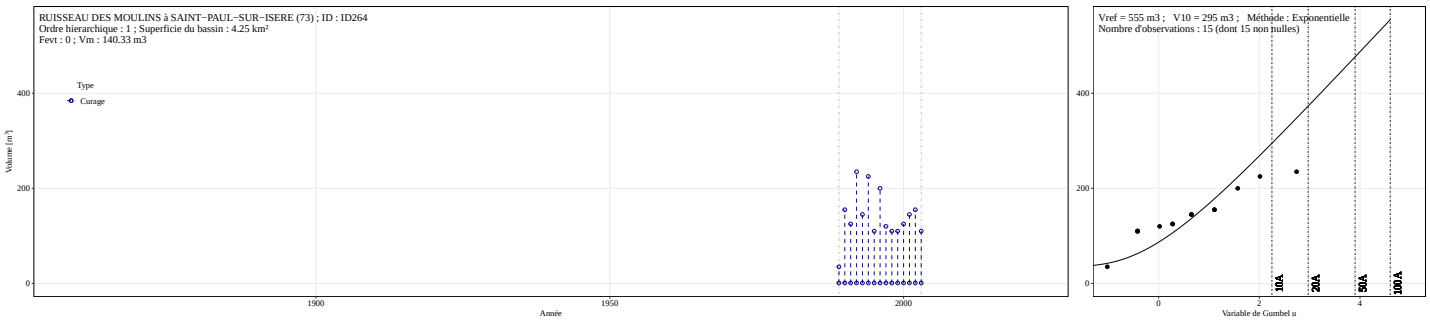

COMBE VARCIN (ET COMBE CHENAL) à SAINT−JEAN−DE−MAURIENNE (73) ; ID : ID257
Ordre hierarchique : 1 ; Superficie du bassin : 0.11 km²
Fevt : 0.14 ; Vm : 247.69 m3
Type
Curage
Evt_int_2
Evt_int_inc
Volume [m³]
Année
Vref = 1286 m3 ; V10 = 672 m3 ; Méthode : Exponentielle
Nombre d'observations : 16 (dont 10 non nulles)
10A
20A
50A
100A
Variable de Gumbel u

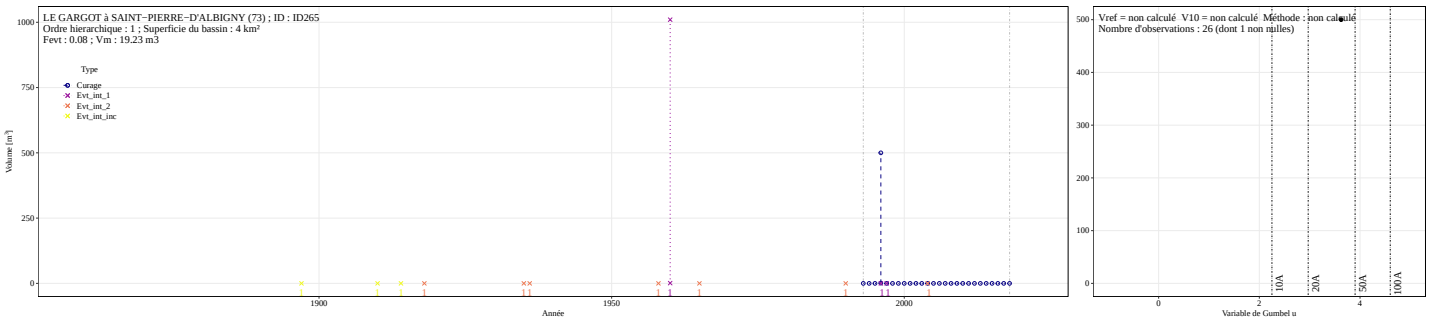

CLARET à SAINT−JULIEN−DE−MONTDENIS (73) ; ID : ID258
Ordre hierarchique : 1 ; Superficie du bassin : 2.63 km²
Fevt : 0.37 ; Vm : 10552.81 m3
Type
Curage
Evt_int_1
Evt_int_2
Evt_int_3
Evt_int_inc
Volume [m³]
Année
Vref = 49544 m3 ; V10 = 34138 m3 ; Méthode : GPD
Nombre d'observations : 32 (dont 18 non nulles)
10A
20A
50A
100A
Variable de Gumbel u

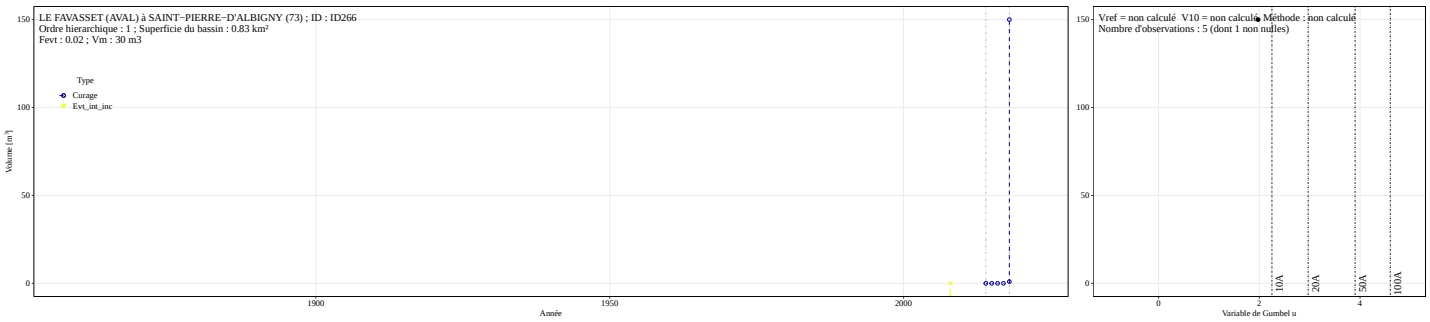

LE MERDEREL à SAINT−MARTIN−LA−CHAMBRE (73) ; ID : ID260
Ordre hierarchique : 1 ; Superficie du bassin : 27.31 km²
Fevt : 0.18 ; Vm : 1952.63 m3
Type
Curage
Evt_int_1
Evt_int_2
Evt_int_3
Evt_int_4
Evt_int_inc
Volume [m³]
Année
Vref = non calculé V10 = non calculé Méthode : non calculé
Nombre d'observations : 19 (dont 3 non nulles)
10A
20A
50A
100A
Variable de Gumbel u

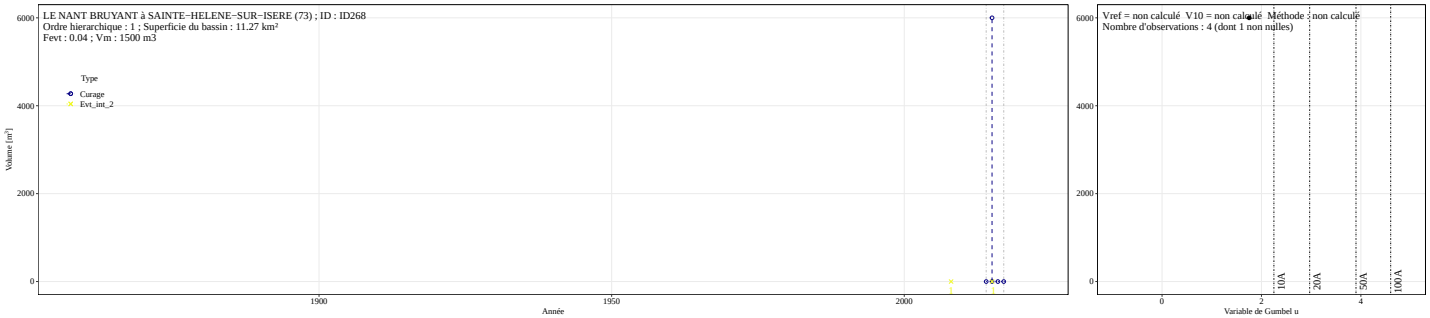

TORRENT DU ST−BERNARD OU ST−MARTIN (AMONT) à SAINT−MARTIN−DE−LA−PORTE (73) ; ID : ID261
Ordre hierarchique : 1 ; Superficie du bassin : 16.48 km²
Fevt : 0.18 ; Vm : 2348.2 m3
Type
Curage
Evt_int_1
Evt_int_2
Evt_int_3
Evt_int_4
Evt_int_inc
Volume [m³]
Année
Vref = 35000 m3 ; V10 = 9269 m3 ; Méthode : Exponentielle
Nombre d'observations : 25 (dont 7 non nulles)
10A
20A
50A
100A
Variable de Gumbel u

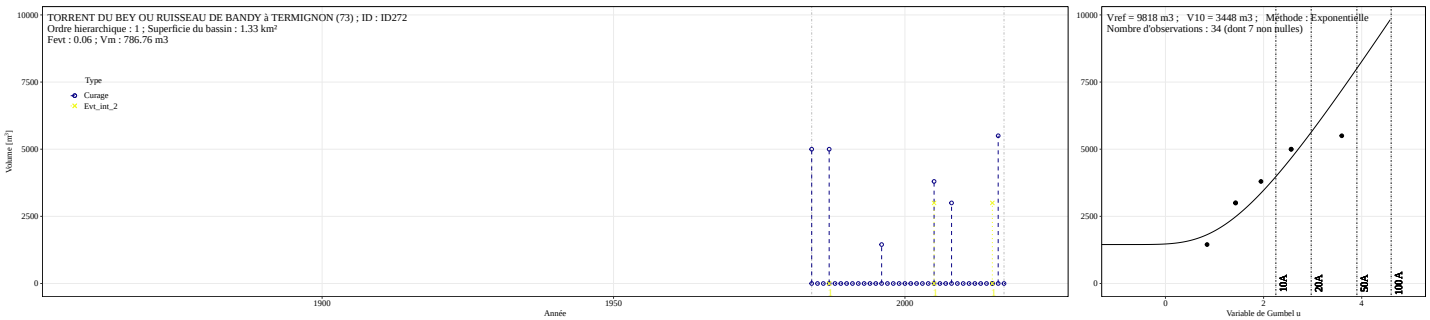

TORRENT DU ST−BERNARD OU ST−MARTIN (AVAL) à SAINT−MARTIN−DE−LA−PORTE (73) ; ID : ID262
Ordre hierarchique : 2 ; Superficie du bassin : 18.13 km²
Fevt : 0.18 ; Vm : 3088.26 m3
Type
Curage
Evt_int_1
Evt_int_2
Evt_int_3
Evt_int_4
Evt_int_inc
Volume [m³]
Année
Vref = 35000 m3 ; V10 = 13995 m3 ; Méthode : Exponentielle
Nombre d'observations : 23 (dont 5 non nulles)
10A
20A
50A
100A
Variable de Gumbel u

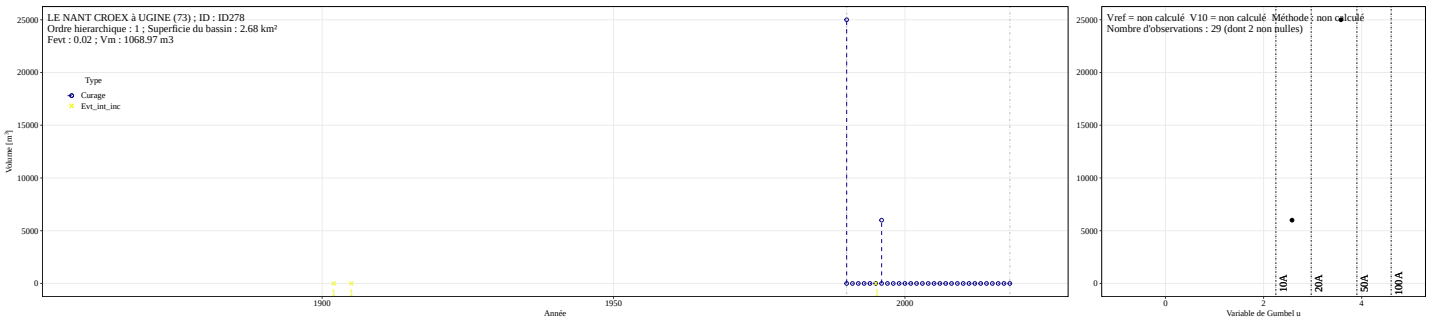

RUISSEAU DES MOULINS à SAINT−PAUL−SUR−ISERE (73) ; ID : ID264
Ordre hierarchique : 1 ; Superficie du bassin : 4.25 km²
Fevt : 0 ; Vm : 140.33 m3
Type
Curage
Volume [m³]
Année
Vref = 555 m3 ; V10 = 295 m3 ; Méthode : Exponentielle
Nombre d'observations : 15 (dont 15 non nulles)
10A
20A
50A
100A
Variable de Gumbel u

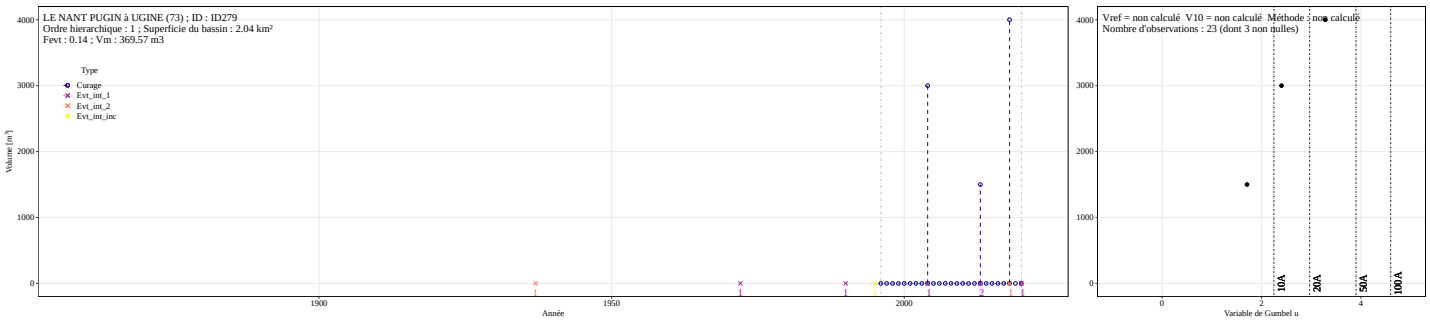

LE GARGOT à SAINT−PIERRE−D'ALBIGNY (73) ; ID : ID265
Ordre hierarchique : 1 ; Superficie du bassin : 4 km²
Fevt : 0.08 ; Vm : 19.23 m3
Type
Curage
Evt_int_1
Evt_int_2
Evt_int_inc
Volume [m³]
Année
Vref = non calculé V10 = non calculé Méthode : non calculé
Nombre d'observations : 26 (dont 1 non nulles)
10A
20A
50A
100A
Variable de Gumbel u

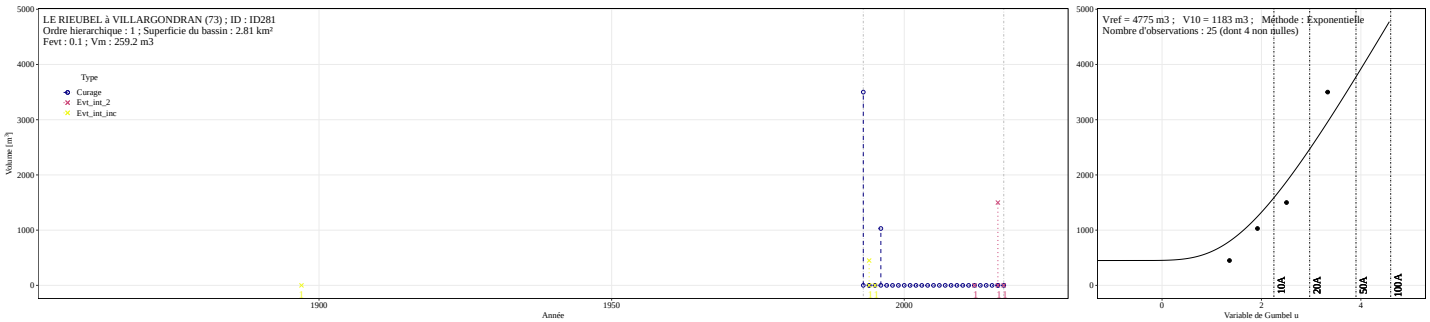

LE FAVASSET (AVAL) à SAINT−PIERRE−D'ALBIGNY (73) ; ID : ID266
Ordre hierarchique : 1 ; Superficie du bassin : 0.83 km²
Fevt : 0.02 ; Vm : 30 m3
Type
Curage
Evt_int_inc
Volume [m³]
Année
Vref = non calculé V10 = non calculé Méthode : non calculé
Nombre d'observations : 5 (dont 1 non nulles)
10A
20A
50A
100A
Variable de Gumbel u

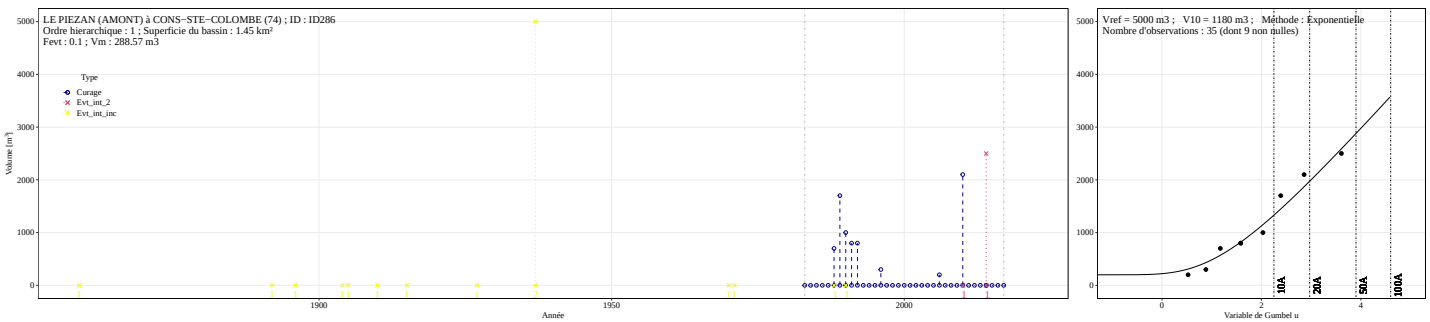

LE NANT BRUYANT à SAINTE−HELENE−SUR−ISERE (73) ; ID : ID268
Ordre hierarchique : 1 ; Superficie du bassin : 11.27 km²
Fevt : 0.04 ; Vm : 1500 m3
Type
Curage
Evt_int_2
Volume [m³]
Année
Vref = non calculé V10 = non calculé Méthode : non calculé
Nombre d'observations : 4 (dont 1 non nulles)
10A
20A
50A
100A
Variable de Gumbel u

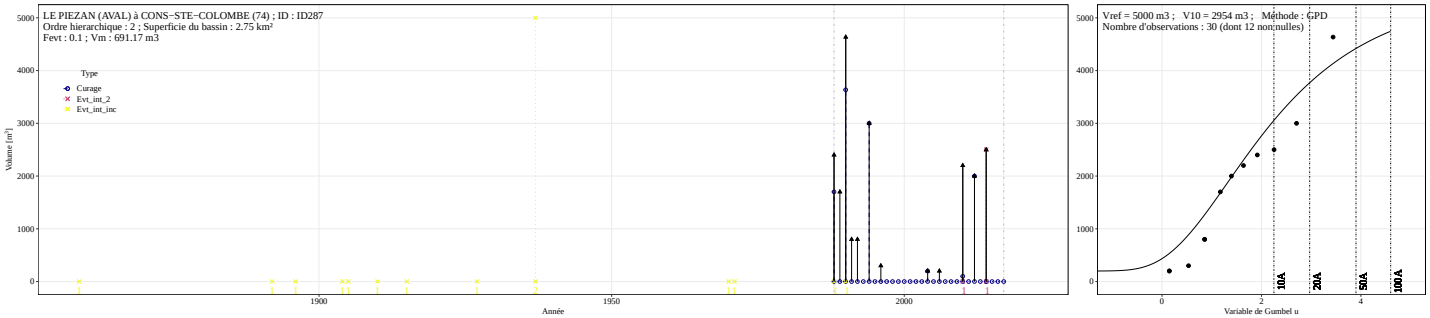

TORRENT DU BEY OU RUISSEAU DE BANDY à TERMIGNON (73) ; ID : ID272
Ordre hierarchique : 1 ; Superficie du bassin : 1.33 km²
Fevt : 0.06 ; Vm : 786.76 m3
Type
Curage
Evt_int_2
Volume [m³]
Année
Vref = 9818 m3 ; V10 = 3448 m3 ; Méthode : Exponentielle
Nombre d'observations : 34 (dont 7 non nulles)
10A
20A
50A
100A
Variable de Gumbel u

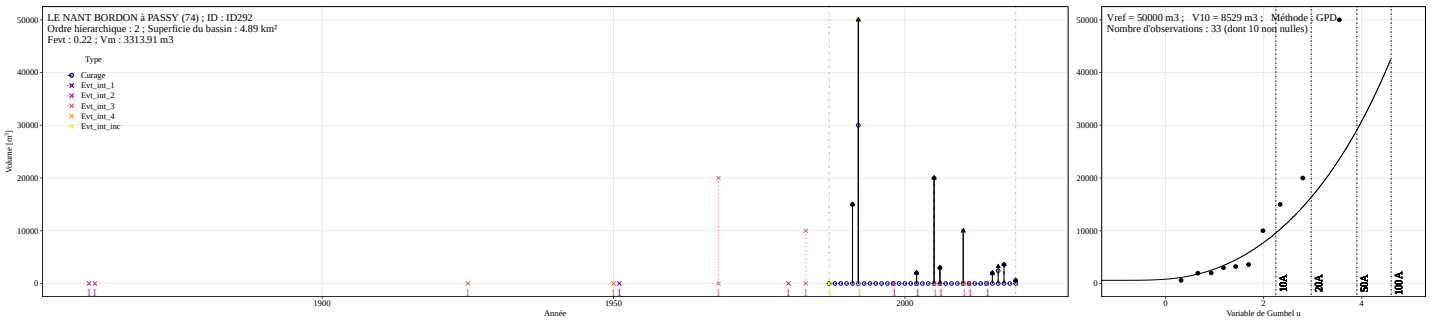

LE NANT CROEX à UGINE (73) ; ID : ID278
Ordre hierarchique : 1 ; Superficie du bassin : 2.68 km²
Fevt : 0.02 ; Vm : 1068.97 m3
Type
Curage
Evt_int_inc
Volume [m³]
Année
Vref = non calculé V10 = non calculé Méthode : non calculé
Nombre d'observations : 29 (dont 2 non nulles)
10A
20A
50A
100A
Variable de Gumbel u

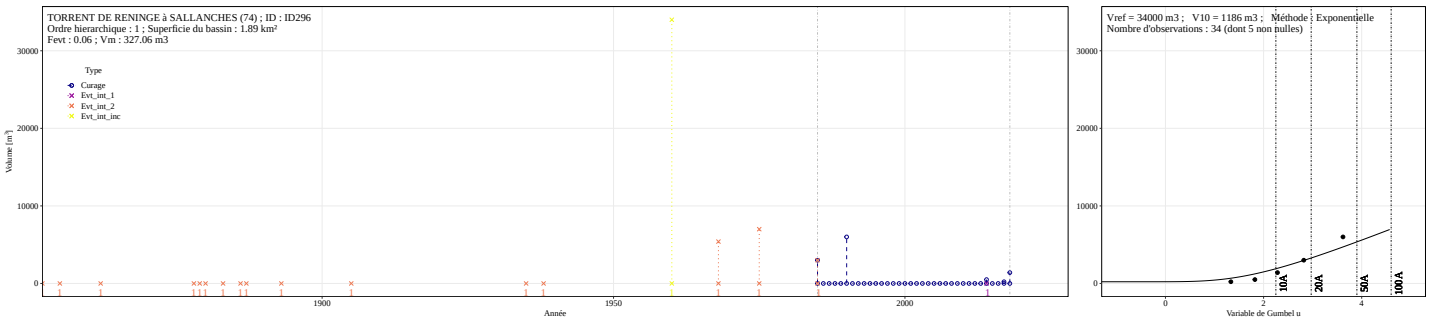

LE NANT PUGIN à UGINE (73) ; ID : ID279
Ordre hierarchique : 1 ; Superficie du bassin : 2.04 km²
Fevt : 0.14 ; Vm : 369.57 m3
Type
Curage
Evt_int_1
Evt_int_2
Evt_int_inc
Volume [m³]
Année
Vref = non calculé V10 = non calculé Méthode : non calculé
Nombre d'observations : 23 (dont 3 non nulles)
10A
20A
50A
100A
Variable de Gumbel u

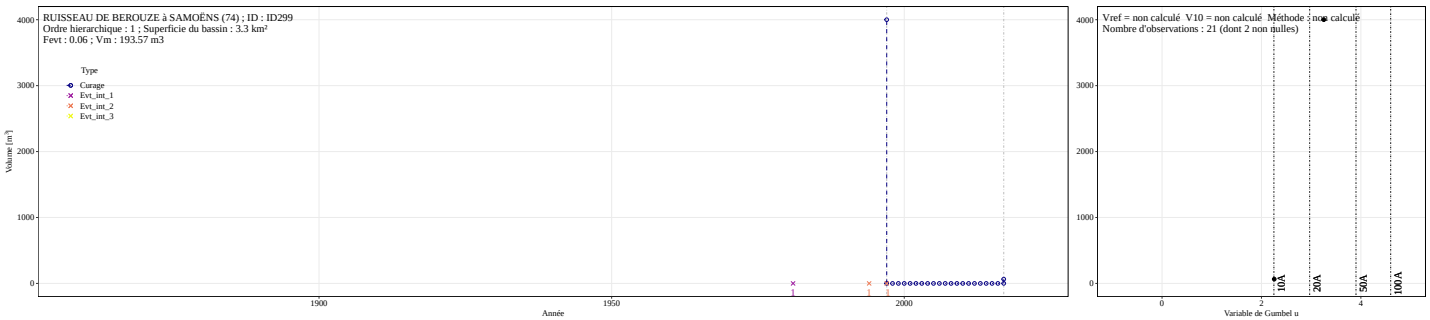

LE RIEUBEL à VILLARGONDRAN (73) ; ID : ID281
Ordre hierarchique : 1 ; Superficie du bassin : 2.81 km²
Fevt : 0.1 ; Vm : 259.2 m3
Type
Curage
Evt_int_2
Evt_int_inc
Volume [m³]
Année
Vref = 4775 m3 ; V10 = 1183 m3 ; Méthode : Exponentielle
Nombre d'observations : 25 (dont 4 non nulles)
10A
20A
50A
100A
Variable de Gumbel u

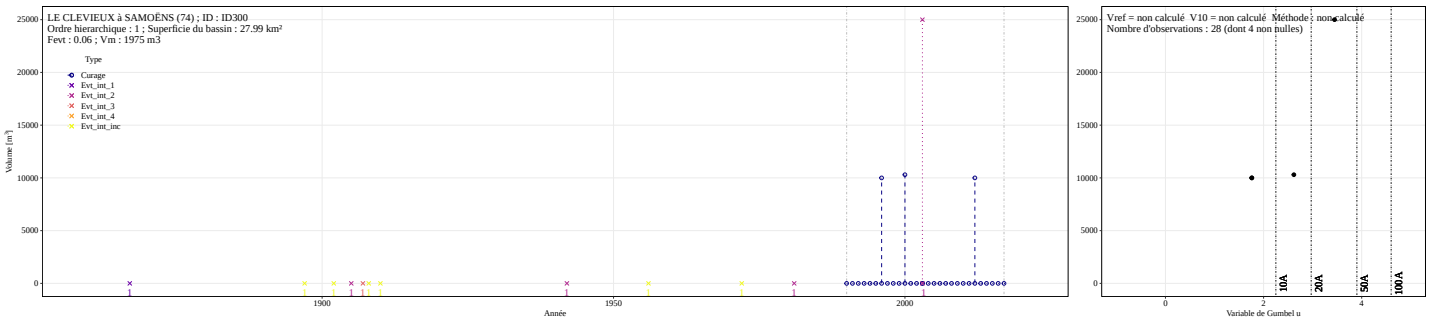

LE PIEZAN (AMONT) à CONS−STE−COLOMBE (74) ; ID : ID286
Ordre hierarchique : 1 ; Superficie du bassin : 1.45 km²
Fevt : 0.1 ; Vm : 288.57 m3
Type
Curage
Evt_int_2
Evt_int_inc
Volume [m³]
Année
Vref = 5000 m3 ; V10 = 1180 m3 ; Méthode : Exponentielle
Nombre d'observations : 35 (dont 9 non nulles)
10A
20A
50A
100A
Variable de Gumbel u

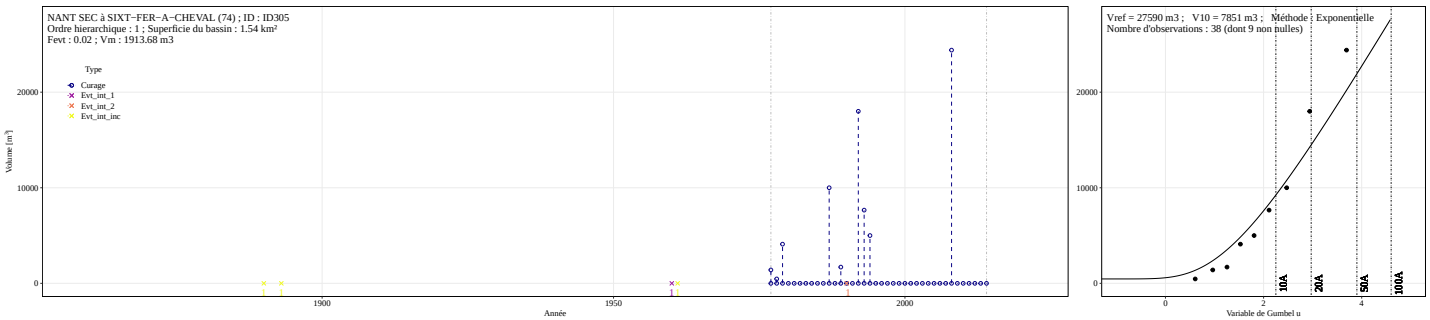

LE PIEZAN (AVAL) à CONS−STE−COLOMBE (74) ; ID : ID287
Ordre hierarchique : 2 ; Superficie du bassin : 2.75 km²
Fevt : 0.1 ; Vm : 691.17 m3
Type
Curage
Evt_int_2
Evt_int_inc
Volume [m³]
Année
Vref = 5000 m3 ; V10 = 2954 m3 ; Méthode : GPD
Nombre d'observations : 30 (dont 12 non nulles)
10A
20A
50A
100A
Variable de Gumbel u

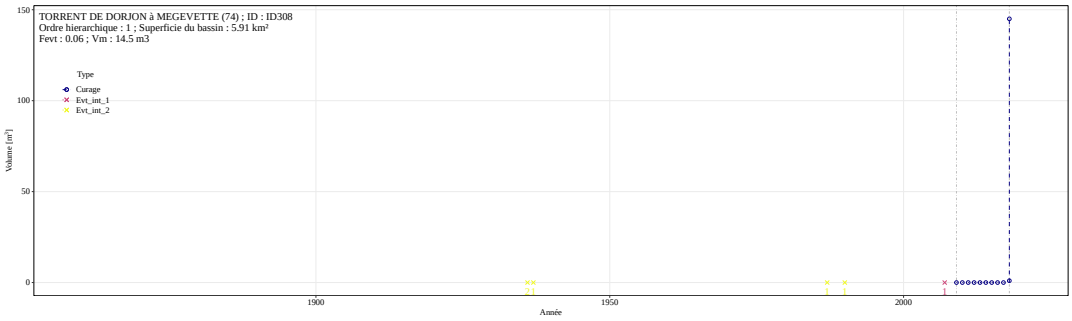

LE NANT BORDON à PASSY (74) ; ID : ID292
Ordre hierarchique : 2 ; Superficie du bassin : 4.89 km²
Fevt : 0.22 ; Vm : 3313.91 m3
Type
Curage
Evt_int_1
Evt_int_2
Evt_int_3
Evt_int_4
Evt_int_inc
Volume [m³]
Année
Vref = 50000 m3 ; V10 = 8529 m3 ; Méthode : GPD
Nombre d'observations : 33 (dont 10 non nulles)
10A
20A
50A
100A
Variable de Gumbel u

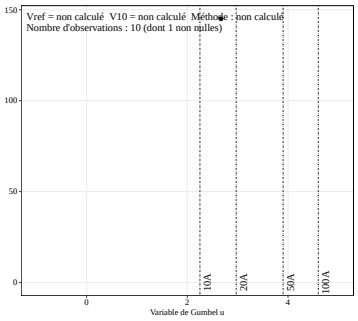

TORRENT DE RENINGE à SALLANCHES (74) ; ID : ID296
Ordre hierarchique : 1 ; Superficie du bassin : 1.89 km²
Fevt : 0.06 ; Vm : 327.06 m3
Type
Curage
Evt_int_1
Evt_int_2
Evt_int_inc
Volume [m³]
Année
Vref = 34000 m3 ; V10 = 1186 m3 ; Méthode : Exponentielle
Nombre d'observations : 34 (dont 5 non nulles)
10A
20A
50A
100A
Variable de Gumbel u

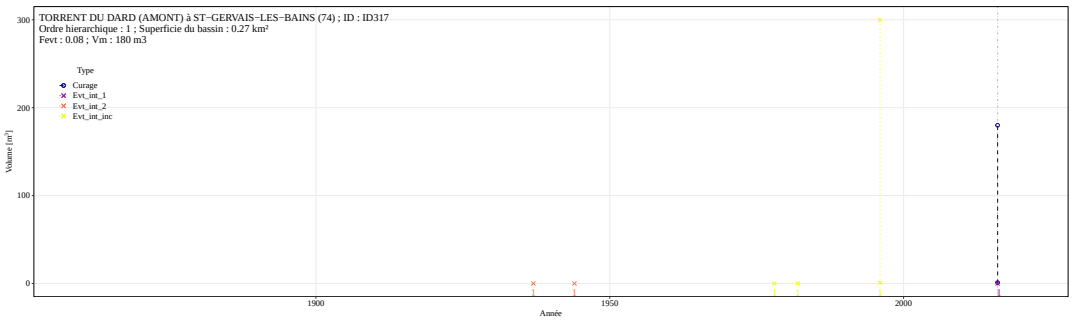

RUISSEAU DE BEROUZE à SAMOËNS (74) ; ID : ID299
Ordre hierarchique : 1 ; Superficie du bassin : 3.3 km²
Fevt : 0.06 ; Vm : 193.57 m3
Type
Curage
Evt_int_1
Evt_int_2
Evt_int_3
Volume [m³]
Année
Vref = non calculé V10 = non calculé Méthode : non calculé
Nombre d'observations : 21 (dont 2 non nulles)
10A
20A
50A
100A
Variable de Gumbel u

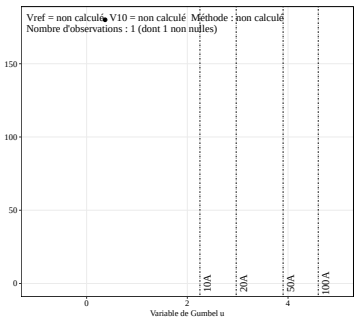

LE CLEVIEUX à SAMOËNS (74) ; ID : ID300
Ordre hierarchique : 1 ; Superficie du bassin : 27.99 km²
Fevt : 0.06 ; Vm : 1975 m3
Type
Curage
Evt_int_1
Evt_int_2
Evt_int_3
Evt_int_4
Evt_int_inc
Volume [m³]
Année
Vref = non calculé V10 = non calculé Méthode : non calculé
Nombre d'observations : 28 (dont 4 non nulles)
10A
20A
50A
100A
Variable de Gumbel u

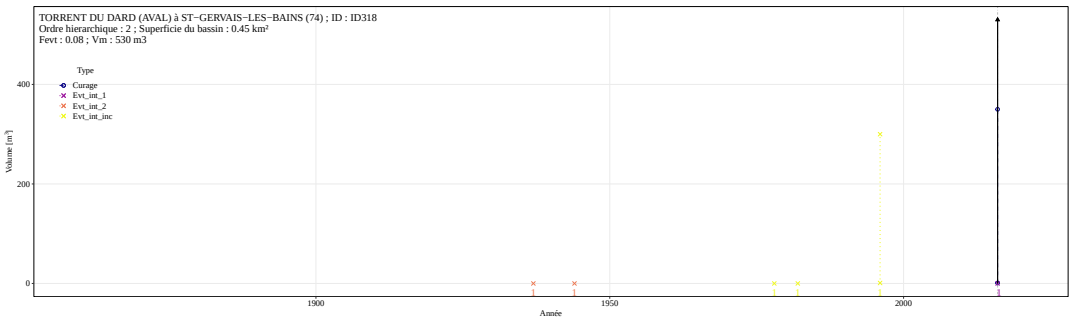

NANT SEC à SIXT−FER−A−CHEVAL (74) ; ID : ID305
Ordre hierarchique : 1 ; Superficie du bassin : 1.54 km²
Fevt : 0.02 ; Vm : 1913.68 m3
Type
Curage
Evt_int_1
Evt_int_2
Evt_int_inc
Volume [m³]
Année
Vref = 27590 m3 ; V10 = 7851 m3 ; Méthode : Exponentielle
Nombre d'observations : 38 (dont 9 non nulles)
10A
20A
50A
100A
Variable de Gumbel u

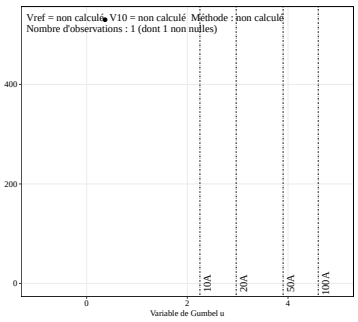

TORRENT DE DORJON à MEGEVETTE (74) ; ID : ID308
Ordre hierarchique : 1 ; Superficie du bassin : 5.91 km²
Fevt : 0.06 ; Vm : 14.5 m3
Type
Curage
Evt_int_1
Evt_int_2
Volume [m³]
Année

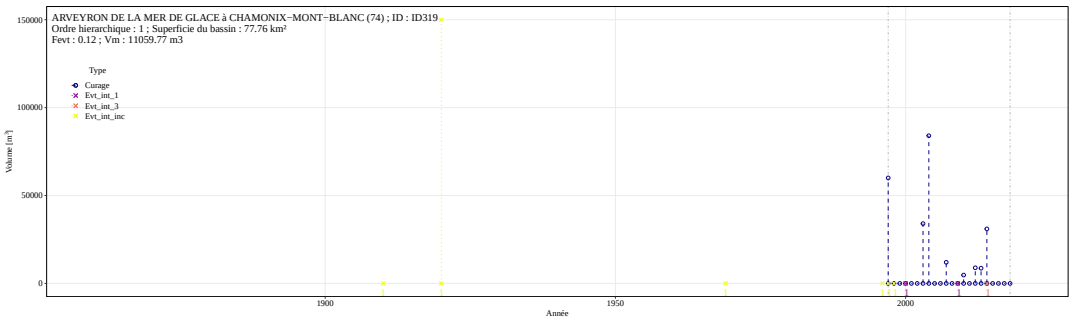

Vref = non calculé V10 = non calculé Méthode : non calculé
Nombre d'observations : 10 (dont 1 non nulles)
10A
20A
50A
100A
Variable de Gumbel u

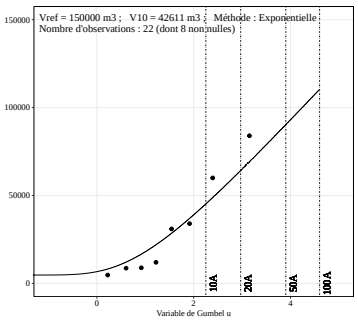

TORRENT DU DARD (AMONT) à ST−GERVAIS−LES−BAINS (74) ; ID : ID317
Ordre hierarchique : 1 ; Superficie du bassin : 0.27 km²
Fevt : 0.08 ; Vm : 180 m3
Type
Curage
Evt_int_1
Evt_int_2
Evt_int_inc
Volume [m³]
Année

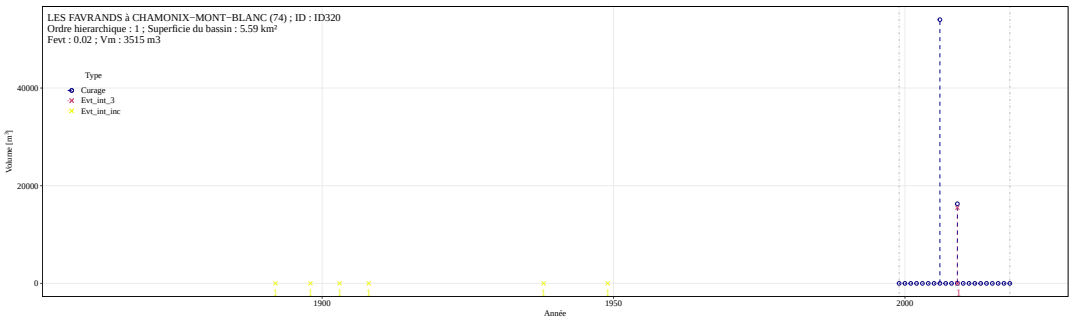

Vref = non calculé V10 = non calculé Méthode : non calculé
Nombre d'observations : 1 (dont 1 non nulles)
10A
20A
50A
100A
Variable de Gumbel u

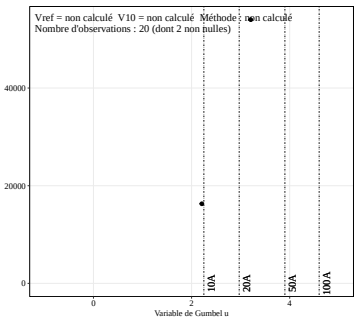

TORRENT DU DARD (AVAL) à ST−GERVAIS−LES−BAINS (74) ; ID : ID318
Ordre hierarchique : 2 ; Superficie du bassin : 0.45 km²
Fevt : 0.08 ; Vm : 530 m3
Type
Curage
Evt_int_1
Evt_int_2
Evt_int_inc
Volume [m³]
Année

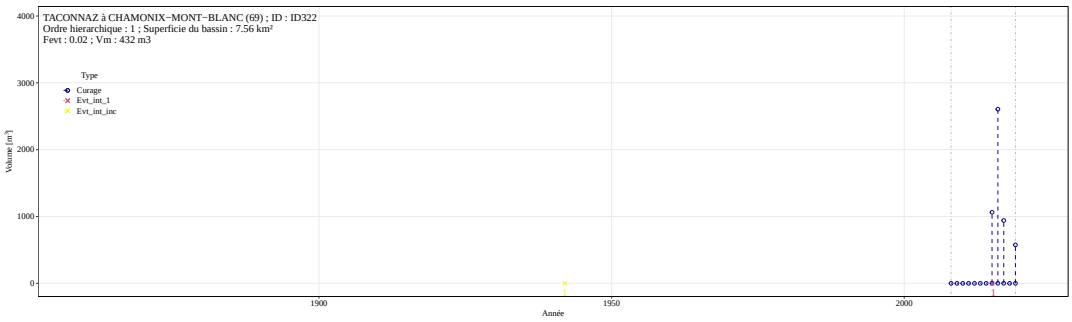

Vref = non calculé V10 = non calculé Méthode : non calculé
Nombre d'observations : 1 (dont 1 non nulles)
10A
20A
50A
100A
Variable de Gumbel u

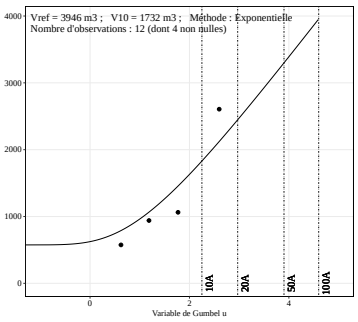

ARVEYRON DE LA MER DE GLACE à CHAMONIX−MONT−BLANC (74) ; ID : ID319
Ordre hierarchique : 1 ; Superficie du bassin : 77.76 km²
Fevt : 0.12 ; Vm : 11059.77 m3
Type
Curage
Evt_int_1
Evt_int_3
Evt_int_inc
Volume [m³]
Année

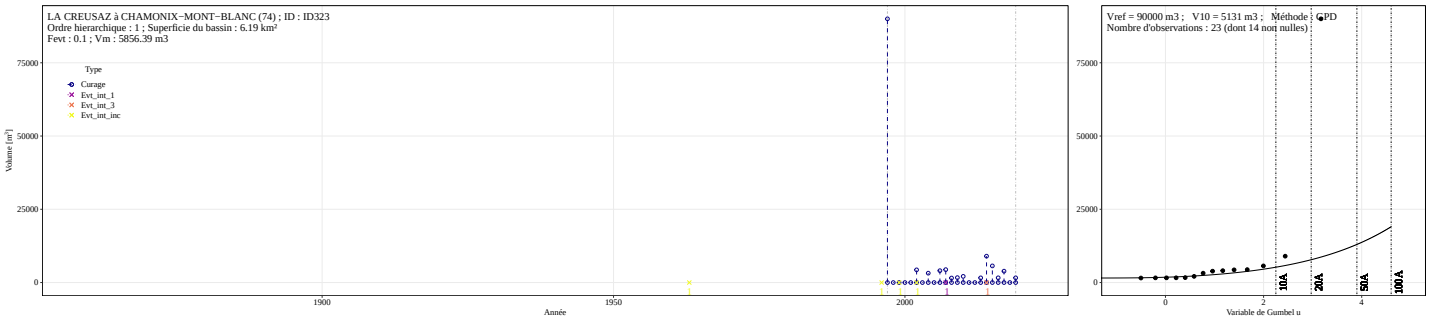

Vref = 150000 m3 ; V10 = 42611 m3 ; Méthode : Exponentielle
Nombre d'observations : 22 (dont 8 non nulles)
10A
20A
50A
100A
Variable de Gumbel u

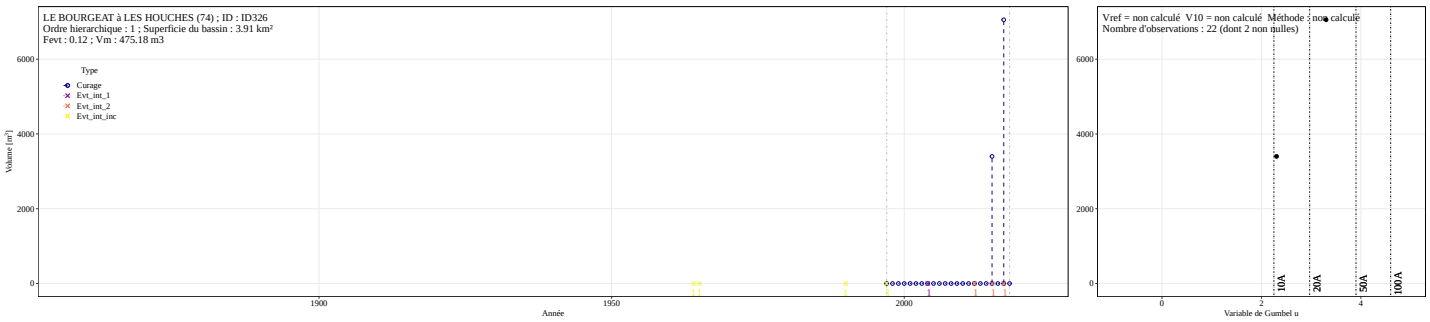

LES FAVRANDS à CHAMONIX−MONT−BLANC (74) ; ID : ID320
Ordre hierarchique : 1 ; Superficie du bassin : 5.59 km²
Fevt : 0.02 ; Vm : 3515 m3
Type
Curage
Evt_int_3
Evt_int_inc
Volume [m³]
Année

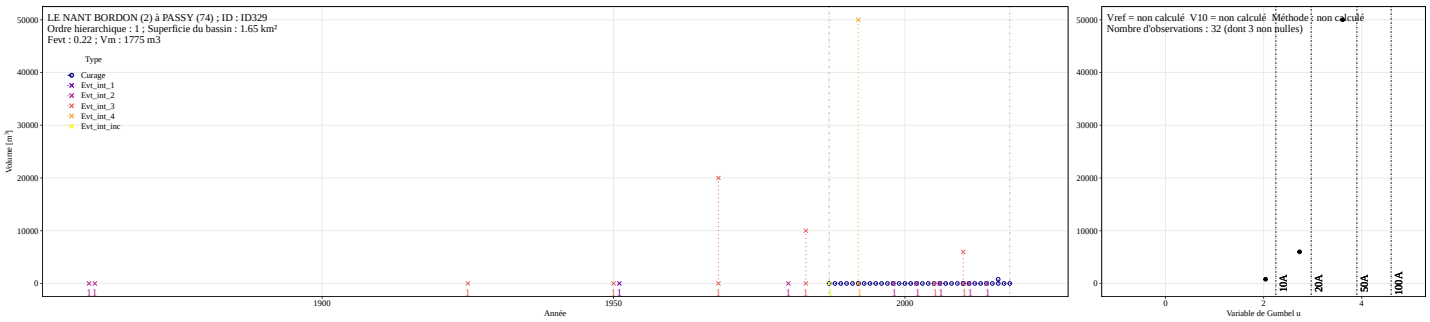

Vref = non calculé V10 = non calculé Méthode : non calculé
Nombre d'observations : 20 (dont 2 non nulles)
10A
20A
50A
100A
Variable de Gumbel u

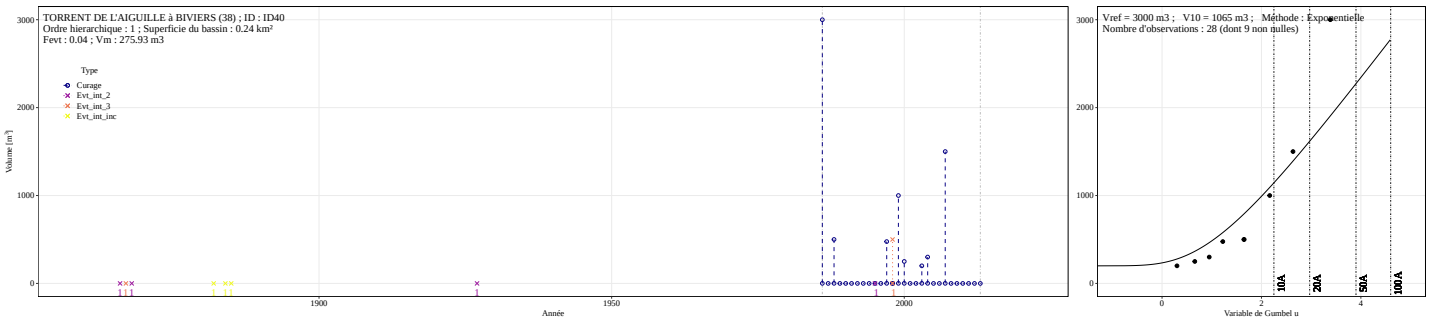

TACONNAZ à CHAMONIX−MONT−BLANC (69) ; ID : ID322
Ordre hierarchique : 1 ; Superficie du bassin : 7.56 km²
Fevt : 0.02 ; Vm : 432 m3
Type
Curage
Evt_int_1
Evt_int_inc
Volume [m³]
Année

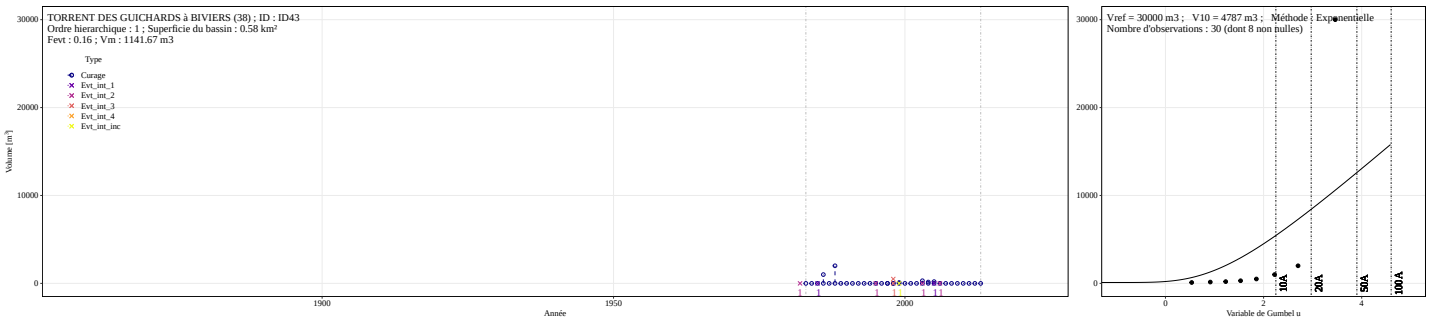

Vref = 3946 m3 ; V10 = 1732 m3 ; Méthode : Exponentielle
Nombre d'observations : 12 (dont 4 non nulles)
10A
20A
50A
100A
Variable de Gumbel u

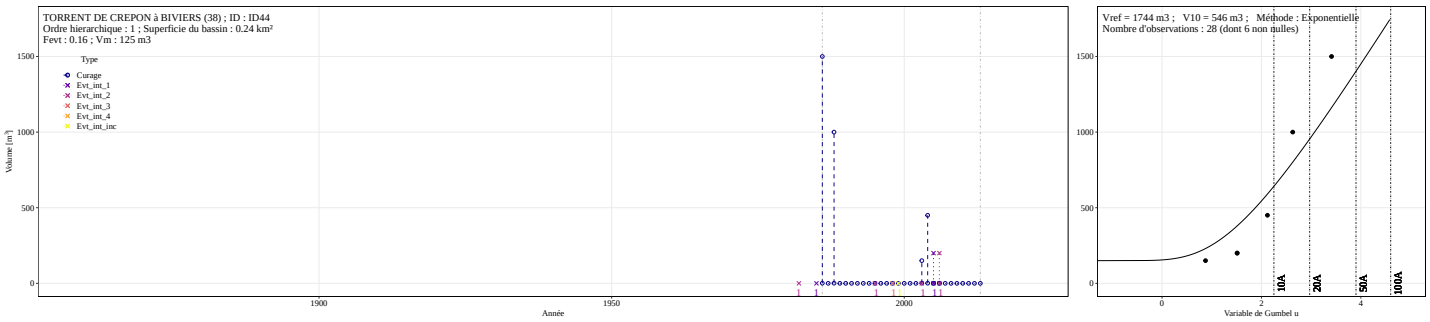

LA CREUSAZ à CHAMONIX−MONT−BLANC (74) ; ID : ID323
Ordre hierarchique : 1 ; Superficie du bassin : 6.19 km²
Fevt : 0.1 ; Vm : 5856.39 m3
Type
Curage
Evt_int_1
Evt_int_3
Evt_int_inc
Volume [m³]
Année
Vref = 90000 m3 ; V10 = 5131 m3 ; Méthode : GPD
Nombre d'observations : 23 (dont 14 non nulles)
10A
20A
50A
100A
Variable de Gumbel u

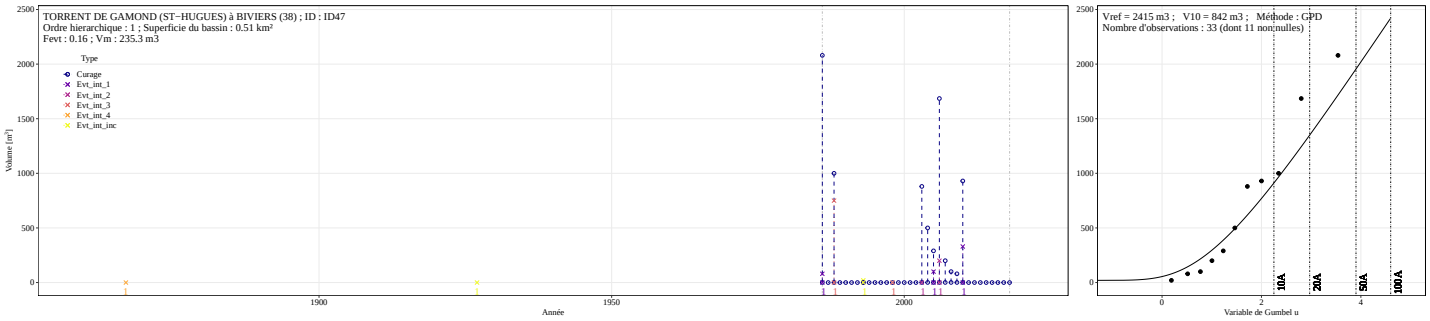

LE BOURGEAT à LES HOUCHES (74) ; ID : ID326
Ordre hierarchique : 1 ; Superficie du bassin : 3.91 km²
Fevt : 0.12 ; Vm : 475.18 m3
Type
Curage
Evt_int_1
Evt_int_2
Evt_int_inc
Volume [m³]
Année
Vref = non calculé V10 = non calculé Méthode : non calculé
Nombre d'observations : 22 (dont 2 non nulles)
10A
20A
50A
100A
Variable de Gumbel u

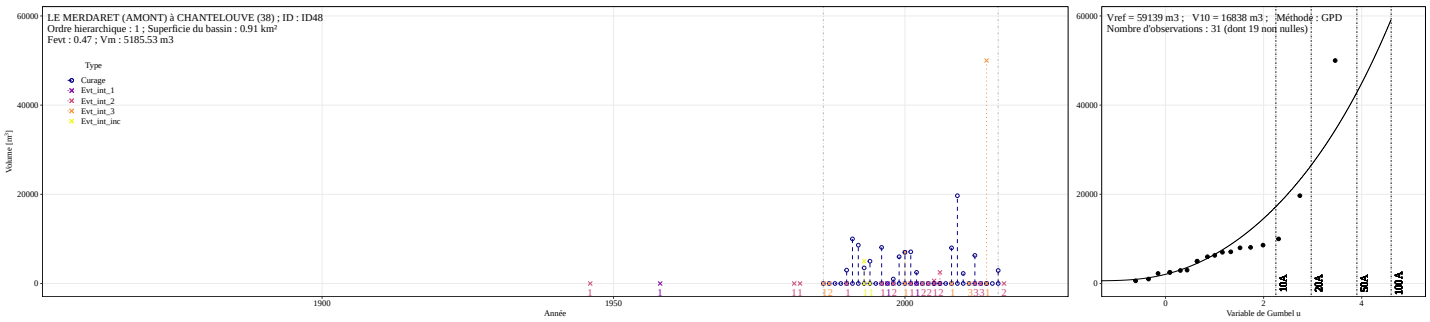

LE NANT BORDON (2) à PASSY (74) ; ID : ID329
Ordre hierarchique : 1 ; Superficie du bassin : 1.65 km²
Fevt : 0.22 ; Vm : 1775 m3
Type
Curage
Evt_int_1
Evt_int_2
Evt_int_3
Evt_int_4
Evt_int_inc
Volume [m³]
Année
Vref = non calculé V10 = non calculé Méthode : non calculé
Nombre d'observations : 32 (dont 3 non nulles)
10A
20A
50A
100A
Variable de Gumbel u

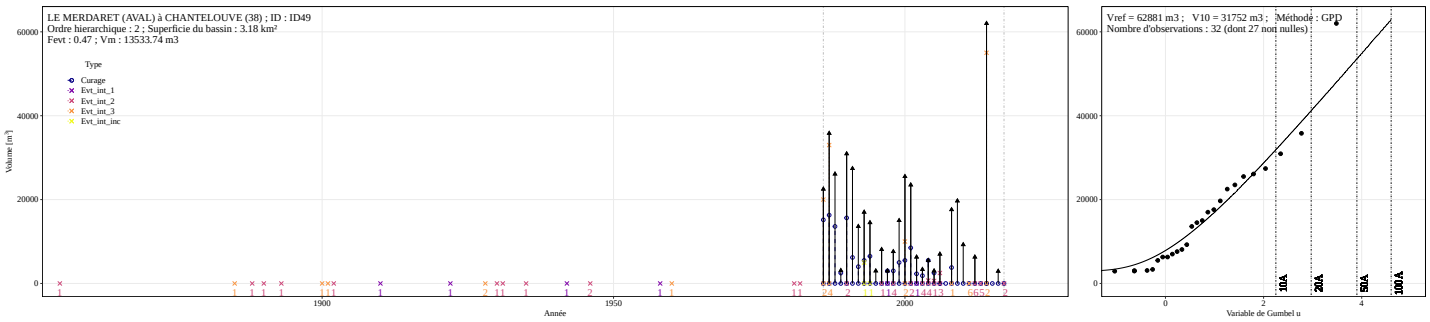

TORRENT DE L'AIGUILLE à BIVIERS (38) ; ID : ID40
Ordre hierarchique : 1 ; Superficie du bassin : 0.24 km²
Fevt : 0.04 ; Vm : 275.93 m3
Type
Curage
Evt_int_2
Evt_int_3
Evt_int_inc
Volume [m³]
Année
Vref = 3000 m3 ; V10 = 1065 m3 ; Méthode : Exponentielle
Nombre d'observations : 28 (dont 9 non nulles)
10A
20A
50A
100A
Variable de Gumbel u

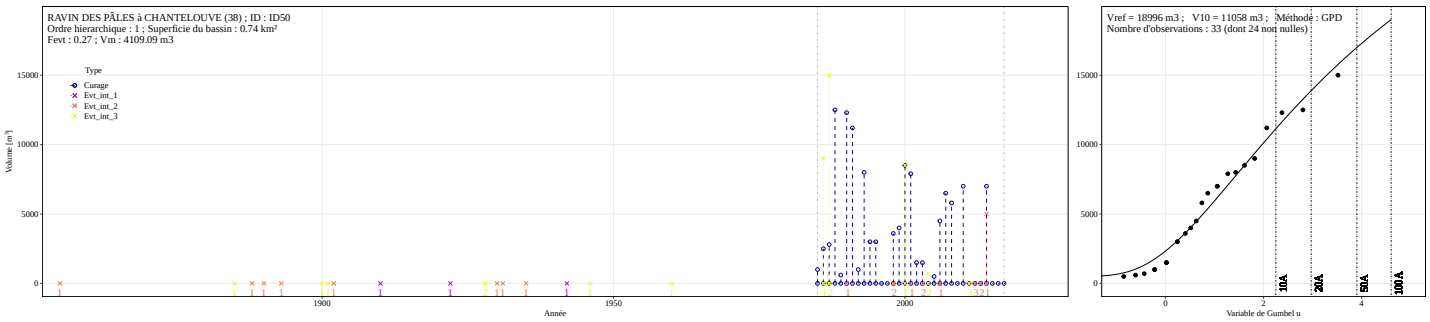

TORRENT DES GUICHARDS à BIVIERS (38) ; ID : ID43
Ordre hierarchique : 1 ; Superficie du bassin : 0.58 km²
Fevt : 0.16 ; Vm : 1141.67 m3
Type
Curage
Evt_int_1
Evt_int_2
Evt_int_3
Evt_int_4
Evt_int_inc
Volume [m³]
Année
Vref = 30000 m3 ; V10 = 4787 m3 ; Méthode : Exponentielle
Nombre d'observations : 30 (dont 8 non nulles)
10A
20A
50A
100A
Variable de Gumbel u

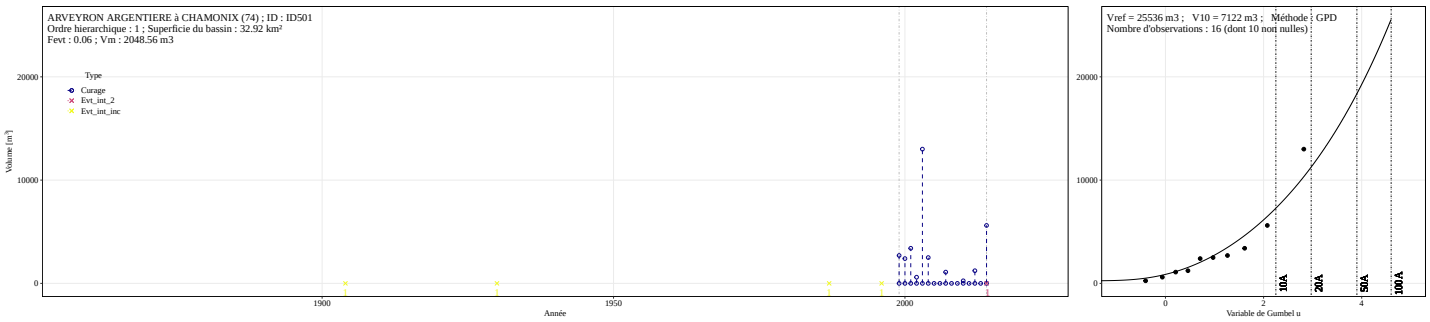

TORRENT DE CREPON à BIVIERS (38) ; ID : ID44
Ordre hierarchique : 1 ; Superficie du bassin : 0.24 km²
Fevt : 0.16 ; Vm : 125 m3
Type
Curage
Evt_int_1
Evt_int_2
Evt_int_3
Evt_int_4
Evt_int_inc
Volume [m³]
Année
Vref = 1744 m3 ; V10 = 546 m3 ; Méthode : Exponentielle
Nombre d'observations : 28 (dont 6 non nulles)
10A
20A
50A
100A
Variable de Gumbel u

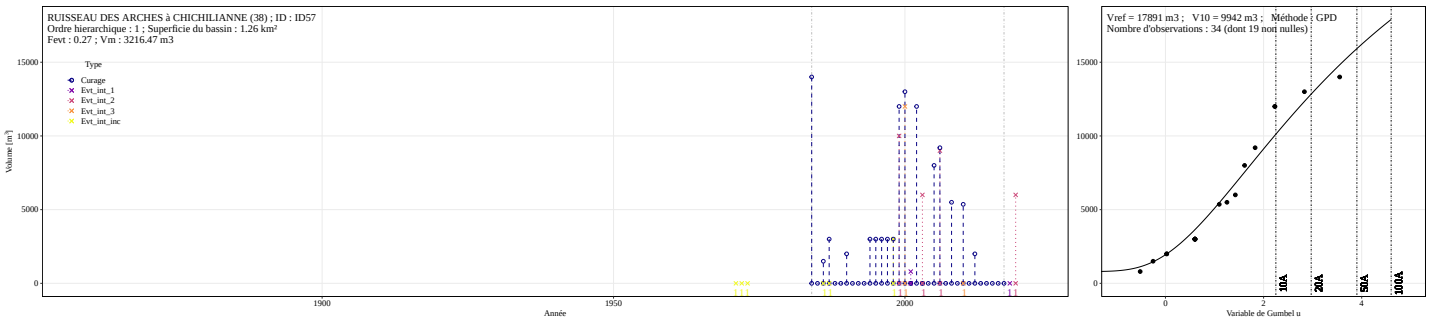

TORRENT DE GAMOND (ST−HUGUES) à BIVIERS (38) ; ID : ID47
Ordre hierarchique : 1 ; Superficie du bassin : 0.51 km²
Fevt : 0.16 ; Vm : 235.3 m3
Type
Curage
Evt_int_1
Evt_int_2
Evt_int_3
Evt_int_4
Evt_int_inc
Volume [m³]
Année
Vref = 2415 m3 ; V10 = 842 m3 ; Méthode : GPD
Nombre d'observations : 33 (dont 11 non nulles)
10A
20A
50A
100A
Variable de Gumbel u

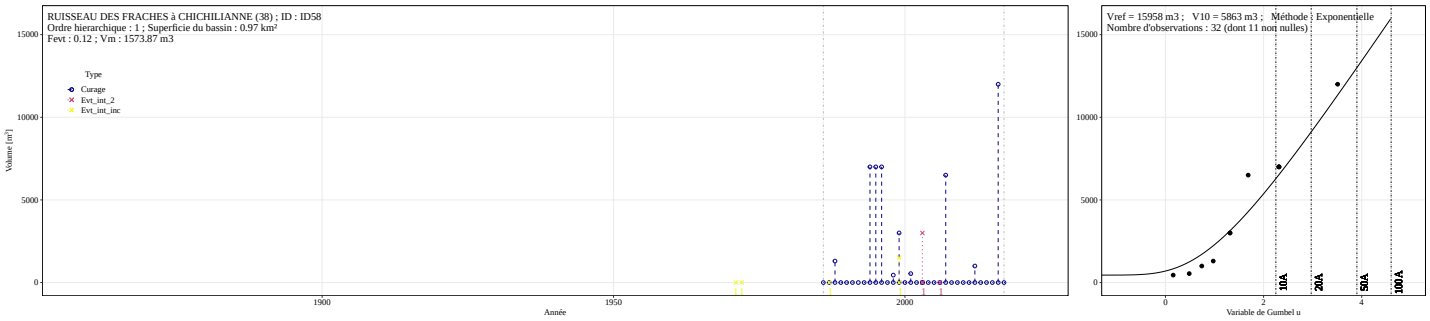

LE MERDARET (AMONT) à CHANTELOUVE (38) ; ID : ID48
Ordre hierarchique : 1 ; Superficie du bassin : 0.91 km²
Fevt : 0.47 ; Vm : 5185.53 m3
Type
Curage
Evt_int_1
Evt_int_2
Evt_int_3
Evt_int_inc
Volume [m³]
Année
Vref = 59139 m3 ; V10 = 16838 m3 ; Méthode : GPD
Nombre d'observations : 31 (dont 19 non nulles)
10A
20A
50A
100A
Variable de Gumbel u

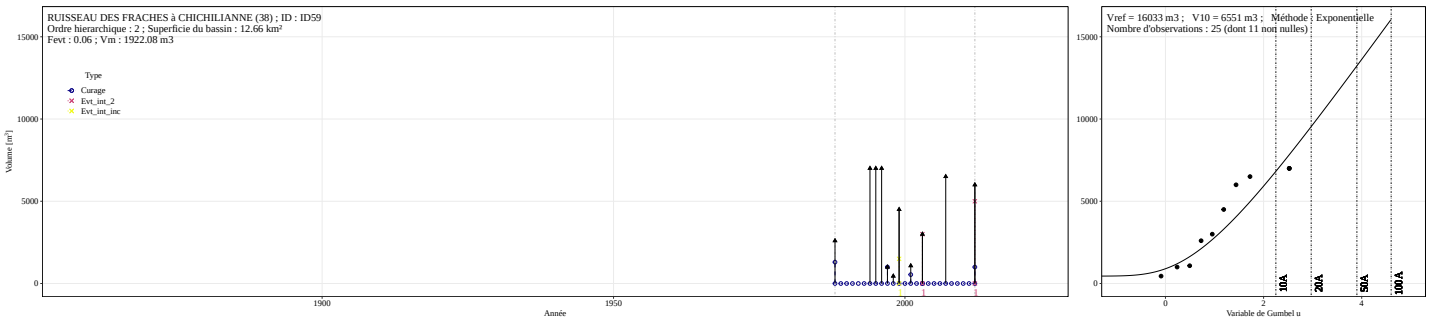

LE MERDARET (AVAL) à CHANTELOUVE (38) ; ID : ID49
Ordre hierarchique : 2 ; Superficie du bassin : 3.18 km²
Fevt : 0.47 ; Vm : 13533.74 m3
Type
Curage
Evt_int_1
Evt_int_2
Evt_int_3
Evt_int_inc
Volume [m³]
Année
Vref = 62881 m3 ; V10 = 31752 m3 ; Méthode : GPD
Nombre d'observations : 32 (dont 27 non nulles)
10A
20A
50A
100A
Variable de Gumbel u

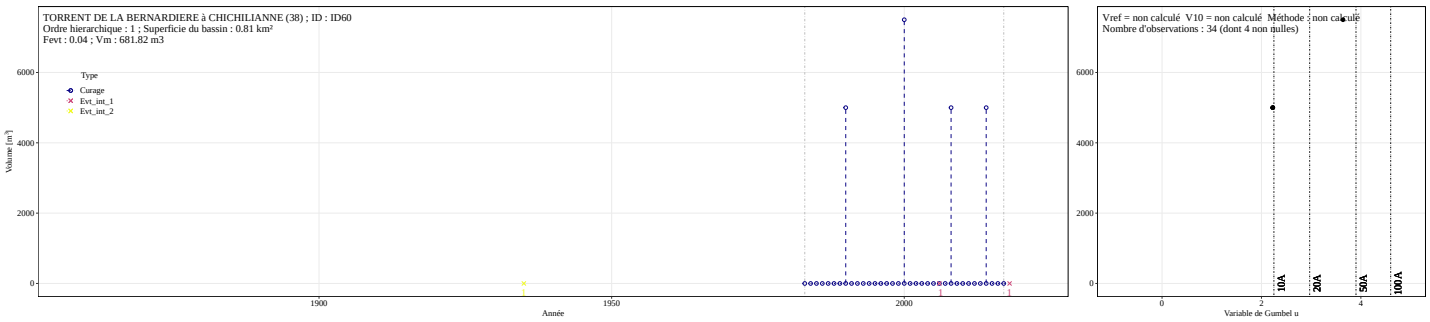

RAVIN DES PÂLES à CHANTELOUVE (38) ; ID : ID50
Ordre hierarchique : 1 ; Superficie du bassin : 0.74 km²
Fevt : 0.27 ; Vm : 4109.09 m3
Type
Curage
Evt_int_1
Evt_int_2
Evt_int_3
Volume [m³]
Année
Vref = 18996 m3 ; V10 = 11058 m3 ; Méthode : GPD
Nombre d'observations : 33 (dont 24 non nulles)
10A
20A
50A
100A
Variable de Gumbel u

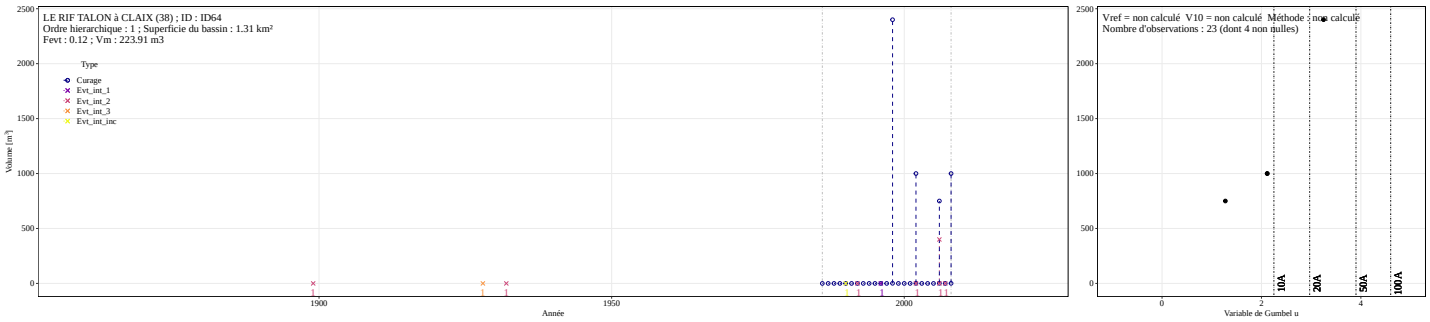

ARVEYRON ARGENTIERE à CHAMONIX (74) ; ID : ID501
Ordre hierarchique : 1 ; Superficie du bassin : 32.92 km²
Fevt : 0.06 ; Vm : 2048.56 m3
Type
Curage
Evt_int_2
Evt_int_inc
Volume [m³]
Année
Vref = 25536 m3 ; V10 = 7122 m3 ; Méthode : GPD
Nombre d'observations : 16 (dont 10 non nulles)
10A
20A
50A
100A
Variable de Gumbel u

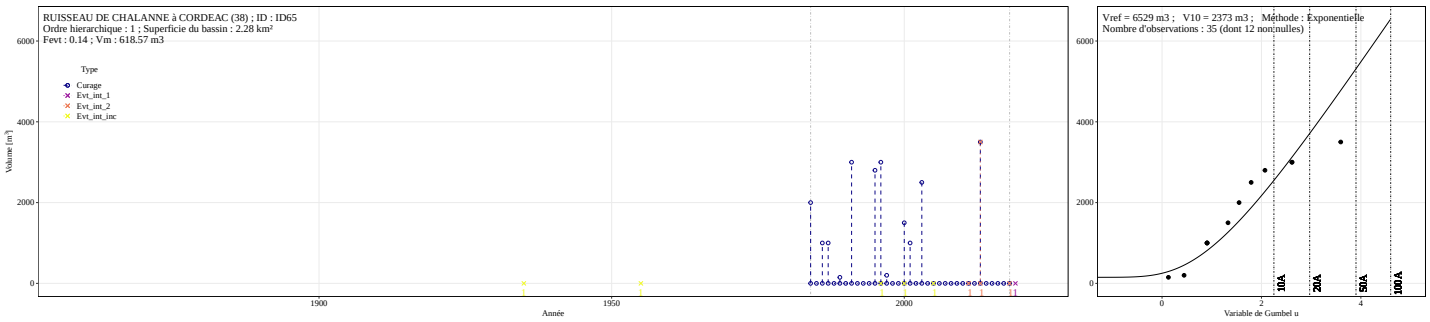

RUISSEAU DES ARCHES à CHICHILIANNE (38) ; ID : ID57
Ordre hierarchique : 1 ; Superficie du bassin : 1.26 km²
Fevt : 0.27 ; Vm : 3216.47 m3
Type
Curage
Evt_int_1
Evt_int_2
Evt_int_3
Evt_int_inc
Volume [m³]
Année
Vref = 17891 m3 ; V10 = 9942 m3 ; Méthode : GPD
Nombre d'observations : 34 (dont 19 non nulles)
10A
20A
50A
100A
Variable de Gumbel u

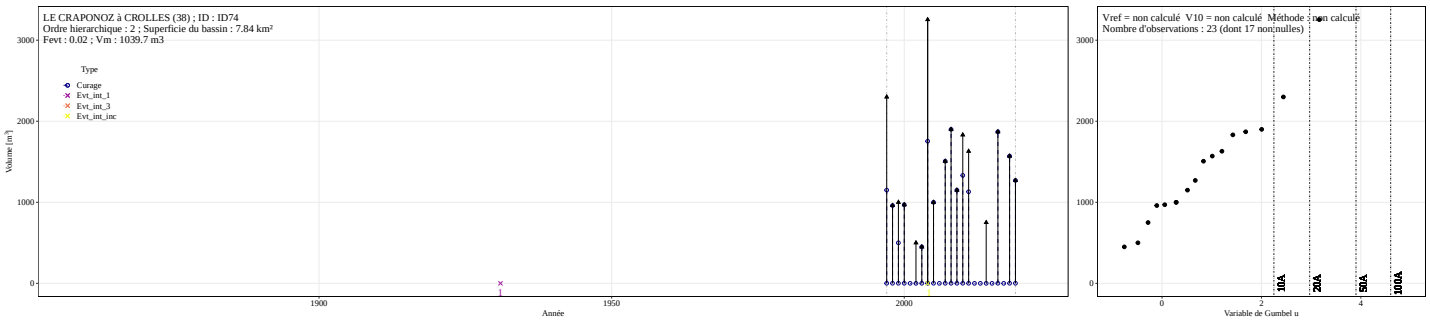

RUISSEAU DES FRACHES à CHICHILIANNE (38) ; ID : ID58
Ordre hierarchique : 1 ; Superficie du bassin : 0.97 km²
Fevt : 0.12 ; Vm : 1573.87 m3
Type
Curage
Evt_int_2
Evt_int_inc
Volume [m³]
Année
Vref = 15958 m3 ; V10 = 5863 m3 ; Méthode : Exponentielle
Nombre d'observations : 32 (dont 11 non nulles)
10A
20A
50A
100A
Variable de Gumbel u

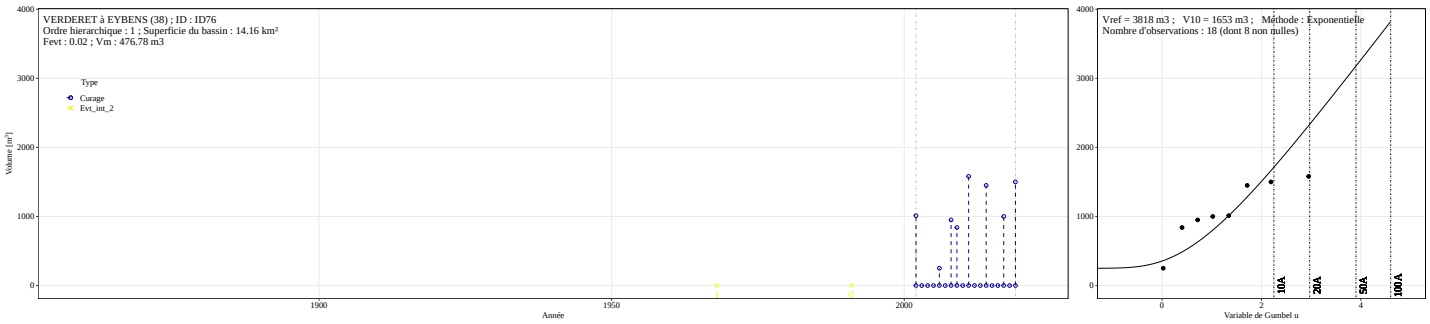

RUISSEAU DES FRACHES à CHICHILIANNE (38) ; ID : ID59
Ordre hierarchique : 2 ; Superficie du bassin : 12.66 km²
Fevt : 0.06 ; Vm : 1922.08 m3
Type
Curage
Evt_int_2
Evt_int_inc
Volume [m³]
Année
Vref = 16033 m3 ; V10 = 6551 m3 ; Méthode : Exponentielle
Nombre d'observations : 25 (dont 11 non nulles)
10A
20A
50A
100A
Variable de Gumbel u

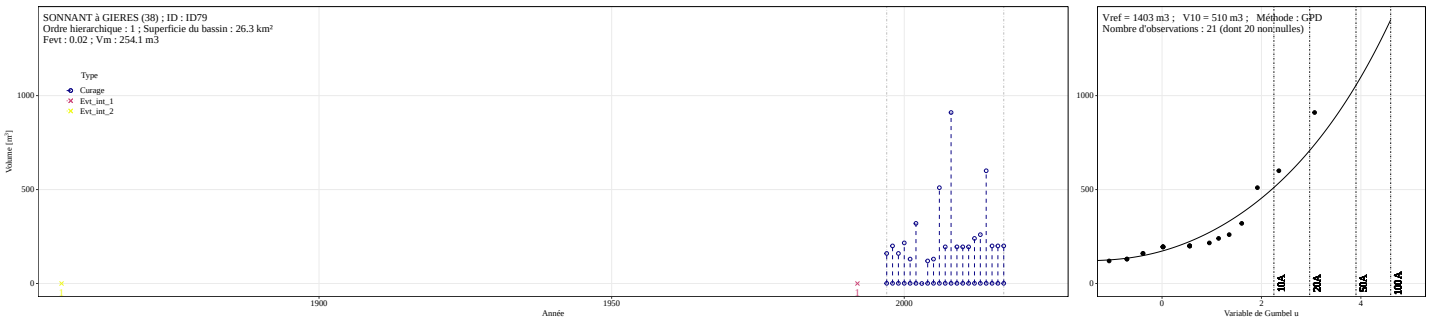

TORRENT DE LA BERNARDIERE à CHICHILIANNE (38) ; ID : ID60
Ordre hierarchique : 1 ; Superficie du bassin : 0.81 km²
Fevt : 0.04 ; Vm : 681.82 m3
Type
Curage
Evt_int_1
Evt_int_2
Volume [m³]
Année
Vref = non calculé V10 = non calculé Méthode : non calculé
Nombre d'observations : 34 (dont 4 non nulles)
10A
20A
50A
100A
Variable de Gumbel u

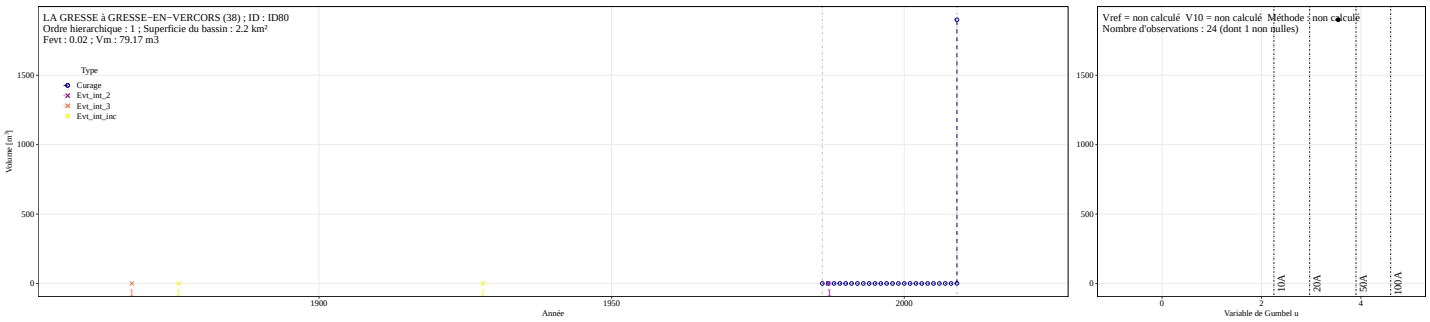

LE RIF TALON à CLAIX (38) ; ID : ID64
Ordre hierarchique : 1 ; Superficie du bassin : 1.31 km²
Fevt : 0.12 ; Vm : 223.91 m3
Type
Curage
Evt_int_1
Evt_int_2
Evt_int_3
Evt_int_inc
Volume [m³]
Année
Vref = non calculé V10 = non calculé Méthode : non calculé
Nombre d'observations : 23 (dont 4 non nulles)
10A
20A
50A
100A
Variable de Gumbel u

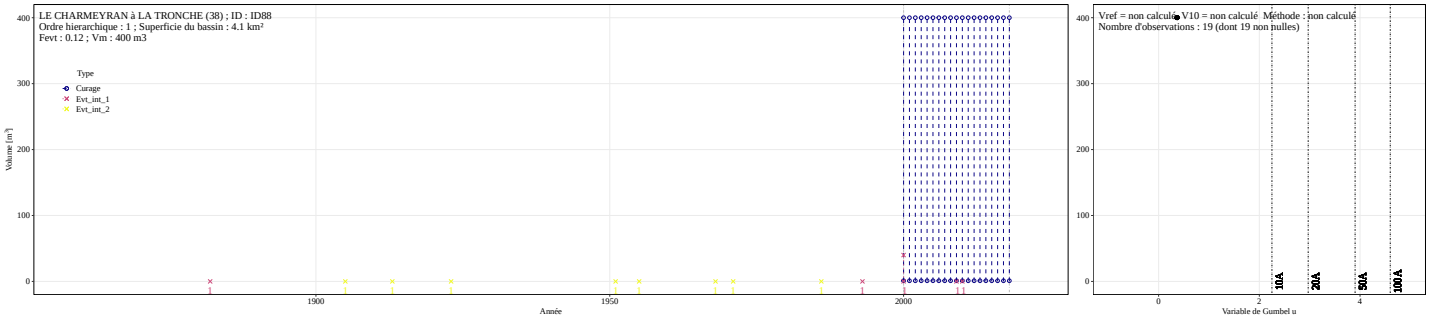

RUISSEAU DE CHALANNE à CORDEAC (38) ; ID : ID65
Ordre hierarchique : 1 ; Superficie du bassin : 2.28 km²
Fevt : 0.14 ; Vm : 618.57 m3
Type
Curage
Evt_int_1
Evt_int_2
Evt_int_inc
Volume [m³]
Année
Vref = 6529 m3 ; V10 = 2373 m3 ; Méthode : Exponentielle
Nombre d'observations : 35 (dont 12 non nulles)
10A
20A
50A
100A
Variable de Gumbel u

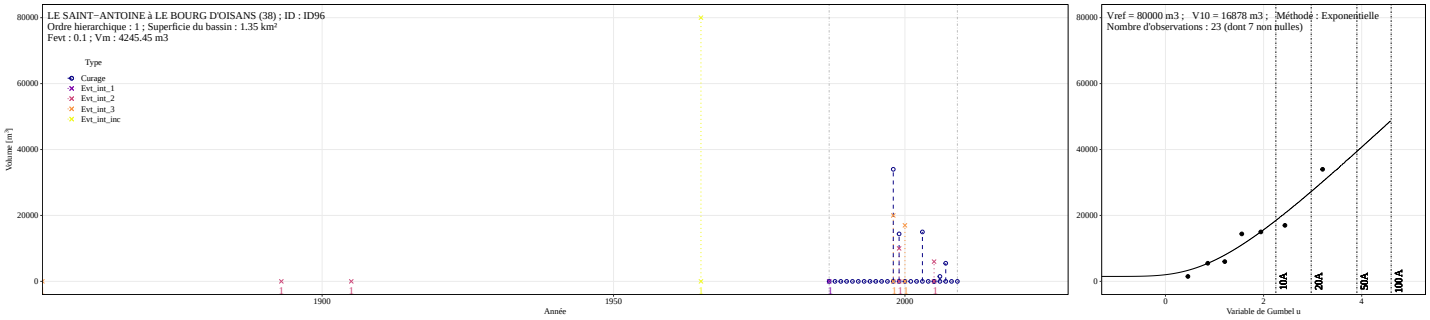

LE CRAPONOZ à CROLLES (38) ; ID : ID74
Ordre hierarchique : 2 ; Superficie du bassin : 7.84 km²
Fevt : 0.02 ; Vm : 1039.7 m3
Type
Curage
Evt_int_1
Evt_int_3
Evt_int_inc
Volume [m³]
Année
Vref = non calculé V10 = non calculé Méthode : non calculé
Nombre d'observations : 23 (dont 17 non nulles)
10A
20A
50A
100A
Variable de Gumbel u

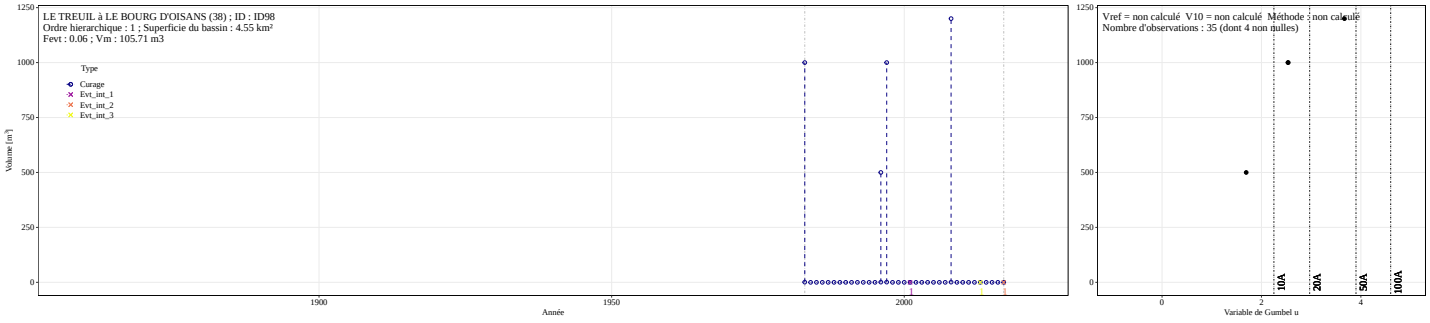

VERDERET à EYBENS (38) ; ID : ID76
Ordre hierarchique : 1 ; Superficie du bassin : 14.16 km²
Fevt : 0.02 ; Vm : 476.78 m3
Type
Curage
Evt_int_2
Volume [m³]
Année
Vref = 3818 m3 ; V10 = 1653 m3 ; Méthode : Exponentielle
Nombre d'observations : 18 (dont 8 non nulles)
10A
20A
50A
100A
Variable de Gumbel u


SONNANT à GIERES (38) ; ID : ID79
Ordre hierarchique : 1 ; Superficie du bassin : 26.3 km²
Fevt : 0.02 ; Vm : 254.1 m3
Type
Curage
Evt_int_1
Evt_int_2
Volume [m³]
Année
Vref = 1403 m3 ; V10 = 510 m3 ; Méthode : GPD
Nombre d'observations : 21 (dont 20 non nulles)
10A
20A
50A
100A
Variable de Gumbel u


LA GRESSE à GRESSE−EN−VERCORS (38) ; ID : ID80
Ordre hierarchique : 1 ; Superficie du bassin : 2.2 km²
Fevt : 0.02 ; Vm : 79.17 m3
Type
Curage
Evt_int_2
Evt_int_3
Evt_int_inc
Volume [m³]
Année
Vref = non calculé V10 = non calculé Méthode : non calculé
Nombre d'observations : 24 (dont 1 non nulles)
10A
20A
50A
100A
Variable de Gumbel u


LE CHARMEYRAN à LA TRONCHE (38) ; ID : ID88
Ordre hierarchique : 1 ; Superficie du bassin : 4.1 km²
Fevt : 0.12 ; Vm : 400 m3
Type
Curage
Evt_int_1
Evt_int_2
Volume [m³]
Année
Vref = non calculé V10 = non calculé Méthode : non calculé
Nombre d'observations : 19 (dont 19 non nulles)
10A
20A
50A
100A
Variable de Gumbel u


LE SAINT−ANTOINE à LE BOURG D'OISANS (38) ; ID : ID96
Ordre hierarchique : 1 ; Superficie du bassin : 1.35 km²
Fevt : 0.1 ; Vm : 4245.45 m3
Type
Curage
Evt_int_1
Evt_int_2
Evt_int_3
Evt_int_inc
Volume [m³]
Année
Vref = 80000 m3 ; V10 = 16878 m3 ; Méthode : Exponentielle
Nombre d'observations : 23 (dont 7 non nulles)
10A
20A
50A
100A
Variable de Gumbel u


LE TREUIL à LE BOURG D'OISANS (38) ; ID : ID98
Ordre hierarchique : 1 ; Superficie du bassin : 4.55 km²
Fevt : 0.06 ; Vm : 105.71 m3
Type
Curage
Evt_int_1
Evt_int_2
Evt_int_3
Volume [m³]
Année
Vref = non calculé V10 = non calculé Méthode : non calculé
Nombre d'observations : 35 (dont 4 non nulles)
10A
20A
50A
100A
Variable de Gumbel u

G Données : Paramètres géomorphologiques et productions sédimentaires

CODE	Torrent	Commune	Dep.	A [km²]	IC50 [-]	IC95 [-]	Icm [-]	IC50zp [-]	IC95zp [-]	Icmzp [-]	M [-]	Lce [m]	Rzp [%]	Igzp [-]	Sce [m/m]	Sc [m/m]	P1h10 [mm]	P6h10 [mm]	P24h10 [mm]	Typ.	Vm [m3]	V10 [m3]	Vref [m3]	Fevt [/an]
AS1	MONFORT	CROLLES	38	2.64	-3.49	-2.86	-3.48	-3.01	-2.94	-3.03	1.07	2307	0.7	4	0.04	0.25	23	54	84	DFW	269			0.02
AS10	HURTIERES	LA PIERRE	38	3.21	-3.87	-3.5	-3.85	-5.01	-4.24	-5.01	0.45	2342	0.5	0.5	0.02	0.09	30	59	80	DFD	134	575	961	0.04
AS11	MURIANETTE	MURIANETTE	38	2.06	-3.65	-3.15	-3.61	-4.69	-3.97	-4.69	0.53	2053	0.6	0.5	0.04	0.08	24	50	73	DFD	65	188	353	
AS12	VERSOUD	LE VERSOUD	38	3.45	-3.43	-2.77	-3.35	-4.36	-3.69	-4.36	0.55	1806	0.4	0.5	0.04	0.04	27	54	76	DFD	304	1111	2710	0.02
AS14	LANFREY	FONTANIL-CORNILLON	38	6.98	-4.21	-3.61	-4.17	-4.28	-4.13	-4.29	0.62	4411	2.6	3.34	0.01	0.14	24	63	98	DFD	133			0.04
AS15	JAILLIERES	MEYLAN	38	1.79	-3.64	-3.3	-3.67	-3.88	-3.73	-3.88	0.81	3007	5.9	2.46	0.03	0.2	23	52	75	DFD	216			
AS16	VILLARD NOIR	PONTCHARRA	38	3.67	-3.92	-3.12	-3.87	-5.03	-4.26	-5.03	0.51	2947	0.6	0.5	0.04	0.08	24	51	77	DFD	153	570	1095	0.02
AS18	GRANDE RIGOLE	POLIENAS	38	6.2	-4.76	-4.07	-4.73	-6.14	-5.2	-6.14	0.23	1717	0.2	0.5	0.08	0.06	26	64	97	BL	493			0.02
AS2	CROLLES	CROLLES	38	4.09	-4.03	-3.44	-4.01	-4.07	-3.8	-4.06	0.9	2498	5.1	1.42	0.03	0.12	22	52	80	DFW	122	443	1014	
AS20	LA MORGE	MOIRANS	38	68.27	-5.53	-4.84	-5.54	-7.2	-6.09	-7.2	0.09	11524	0.3	0.5	0.01	0.01	27	71	106	BL	786	1633	2466	0.08
AS21	ROIZE	VOREPPE	38	16.44	-4.24	-3.65	-4.23	-4.28	-3.95	-4.25	0.4	6277	2.9	1.79	0.03	0.05	26	65	101	DFD	2618	6357	50000	0.08
AS22	FURON	SASSENAGE	38	48.66	-5.08	-4.12	-5	-4.99	-4.85	-5	0.24	9008	0.3	1	0.01	0.01	20	52	86	BL	124	482	1263	0.02
AS23	VOROIZE	VEUREY	38	7.43	-3.87	-3.12	-3.81	-4.96	-4.19	-4.96	0.48	3180	0.4	0.5	0.06	0.07	31	73	114	DFD	325	1231	3161	0.06
AS24	MARTINET	SAINT-QUENTIN-SUR-ISERE	38	3.42	-4.54	-3.74	-4.54	-5.9	-4.99	-5.9	0.39	1712	0.4	0.5	0.02	0.07	32	75	120	DFD				0.02
AS25	VERSOUD	LA RIVIERE	38	6.47	-3.82	-3.24	-3.81	-4.95	-4.19	-4.95	0.56	3637	0.5	0.5	0.02	0.02	28	68	106	DFD	166	728	2042	0.04
AS26	SARENNE	BOURG-D'OISANS	38	37.3	-4.46	-3.79	-4.42	-4.66	-4.19	-4.64	0.42	4401	23.7	3.93	0.26	0.05	15	44	77	DFD	194	581	1090	
AS27	MOULINS	ALLEMOND	38	0.89	-2.93	-1.81	-2.77	-3.6	-3.04	-3.6	1.31	2161	1.2	0.5	0.27	0.29	17	53	103	DFW	16			
AS3	TORRENT DU MANIVAL	ST-NAZAIRE-LES-EYMES	38	6.63	-3.73	-2.85	-3.64	-3.89	-3.3	-3.82	0.58	5742	8.3	2.31	0.04	0.18	21	53	77	DFD	2019			
AS31	OLON	VOUREY	38	18.14	-5.48	-4.48	-5.44	-7.08	-5.99	-7.08	0.14	6548	0.4	0.5	0.03	0.03	23	64	97	BL	60	282	924	0.06
AS32	ROMANETIERE	SAINT-QUENTIN-SUR-ISERE	38	3.6	-4.37	-3.53	-4.31	-5.6	-4.74	-5.6	0.69	3111	0.6	0.5	0.03	0.19	31	74	119	DFD	128	658	2271	
AS33	RENAUDIERE	ST-QUENTIN-SUR-ISERE	38	4.24	-4.37	-3.04	-4.18	-5.44	-4.6	-5.44	0.63	2629	0.5	0.5	0.05	0.24	32	74	115	DFW	47			
AS34	RIVAL	TULLINS	38	2.84	-4.25	-3.74	-4.23	-5.5	-4.65	-5.5	0.34	2353	0.6	0.5	0.05	0.1	28	67	97	DFD	225	783	1672	
AS35	GORGEAT	POLLIENAS	38	1.51	-4.36	-3.52	-4.33	-5.63	-4.76	-5.63	0.15	1397	0.5	0.5	0.04	0.04	27	65	99	BL	92			
AS4	MALADIERE	LA BUISSIERE	38	6.08	-4.06	-3	-3.98	-3.68	-3.4	-3.7	0.64	3908	0.6	2.33	0.08	0.05	23	54	78	DFD	104	430	680	0.04
AS5	ROTI	LE CHEYLAS	38	1.22	-3.41	-2.43	-3.34	-4.34	-3.67	-4.34	0.76	503	0.2	0.5	0.33	0.25	24	52	76	DFW	21	83	149	0.06
AS6	CHAVANNES	GONCELIN	38	0.6	-2.76	-1.84	-2.7	-3.52	-2.97	-3.52	1.12	1335	1.0	0.5	0.2	0.24	23	53	75	DFW	11			0.06
AS7	RUISSEAU DE LA PERRIERE	PONTCHARRA	38	4.81	-4.23	-3.41	-4.16	-5.4	-4.57	-5.4	0.43	3910	0.6	0.5	0.03	0.04	24	51	75	DFD	110			0.02
AS9	CORBONNE	SAINT ISMIER	38	2.73	-3.69	-2.94	-3.62	-3.8	-3.65	-3.79	0.69	3671	3.6	2.22	0.05	0.18	20	51	73	DFD	662			

CODE	Torrent	Commune	Dep.	A [km²]	IC50 [-]	IC95 [-]	Icm [-]	IC50zp [-]	IC95zp [-]	Icmzp [-]	M [-]	Lce [m]	Rzp [%]	Igzp [-]	Sce [m/m]	Sc [m/m]	P1h10 [mm]	P6h10 [mm]	P24h10 [mm]	Typ.	Vm [m3]	V10 [m3]	Vref [m3]	Fevt [/an]
COM3	LE CHARMEYRAN	LA TRONCHE	38	4.5	-3.94	-3.08	-3.86	-3.81	-3.5	-3.78	0.54	1617	2.1	2.27	0.02	0.06	23	53	83	DFD	138			0.12
ID105	TORRENT DE GAMOND (BIZENON I)	MEYLAN	38	0.06	-1.92	-1.03	-1.78	-2	-1.78	-2.01	2.79	363	28.4	2.26	0.48	0.26	22	53	78	DFW	150	551	1942	0.16
ID106	TORRENT DE GAMOND (BIZENON II)	MEYLAN	38	0.11	-2.06	-1.12	-1.92	-2.09	-1.76	-2.07	2.04	380	36.7	2.11	0.49	0.19	22	53	79	DFW	120	396	1115	0.16
ID107	TORRENT DE GAMOND (BIZENON III)	MEYLAN	38	0.1	-2.15	-1.3	-1.98	-2.05	-1.76	-2.02	2.16	380	37.6	3.35	0.5	0.2	22	53	79	DFW	99	351	1259	0.16
ID109	TORRENT DE LA RUINE	MEYLAN	38	0.28	-2.62	-1.64	-2.45	-2.67	-2.44	-2.64	1.54	705	26.8	2.32	0.17	0.2	22	53	78	DFW	466			0.14
ID122	EYRARD	NOYAREY	37	5.03	-3.68	-2.77	-3.61	-3.71	-3.65	-3.73	0.55	1355	0.5	1.95	0.09	0.08	26	64	103	DFD	203	1054	1995	0.02
ID123	TORRENT DE LA LIGNARRE	OULLES	38	46.12	-4.76	-3.8	-4.63	-4.81	-4.06	-4.75	0.31	4753	7.8	2.94	0.02	0.04	18	51	86	DFD	2083	6360	20248	0.04
ID131	LE RIFFOL	ROISSARD	38	1.03	-3.21	-2.58	-3.12	-3.22	-2.88	-3.19	0.92	1022	27.7	2.55	0.09	0.1	24	59	85	DFW	321	1493	10000	0.2
ID140	TORRENT DU BRESSON	STE-MARIE-DU-MONT	38	0.52	-2.46	-1.76	-2.39	-2.7	-2.3	-2.66	1.27	546	28.4	1.93	0.32	0.24	21	51	80	DFW	854	2624	6513	0.16
ID147	RUISSEAU DE DARGUIL	ST-ISMIER	38	0.89	-2.58	-1.84	-2.51	-2.68	-2.47	-2.67	0.94	288	18.9	2.13	0.18	0.17	22	54	79	DFW	839	2556	4180	0.18
ID148	RUISSEAU DE DARGUIL (LES ECORCHIERS)	ST-ISMIER	38	0.36	-2.37	-1.55	-2.26	-2.33	-2.19	-2.33	1.48	526	11.9	3.06	0.23	0.17	23	54	79	DFW	293	1110	2721	0.16
ID15	RAVIN DE LA RUINE	LA ROCHE-DE-RAME	5	1.42	-2.64	-1.95	-2.59	-2.25	-2.04	-2.28	0.9	1762	5.2	4.06	0.24	0.16	12	46	92	DFW				0.02
ID150	TORRENT DE CORBONNE	ST-ISMIER	38	0.78	-2.7	-2	-2.61	-2.87	-2.67	-2.85	0.97	578	9.8	2.22	0.18	0.21	21	52	77	DFW	324	915	3429	0.14
ID151	TORRENT DU MANIVAL	ST-ISMIER	38	3.7	-3.07	-2.38	-3.01	-3.3	-2.68	-3.22	0.6	1898	13.5	2.21	0.14	0.16	23	55	82	DFW	5073	14445	85000	0.37
ID164	RUISSEAU DE L'ARCHAT	ST-MAURICE-EN-TRIEVES	38	1.2	-2.91	-2.12	-2.82	-3.05	-2.51	-3	0.8	1673	28.3	2.38	0.17	0.16	26	55	102	DFW	824	2761	6438	0.04
ID171	RUISSEAU DE GORGETTE (1)	ST-PANCRASSE	38	1.02	-3.04	-2.35	-2.97	-3.04	-2.49	-2.96	1.08	796	18.8	3.02	0.13	0.06	25	56	82	DFW	256	1287	2957	0.06
ID175	LE LAVANCHON	ST-PAUL-DE-VARCES	38	7.74	-3.26	-2.39	-3.21	-2.99	-2.44	-2.96	0.51	501	3.3	2.05	0.15	0.11	21	52	81	DFD	1197	3323	15000	0.06
ID176	TORRENT DE LA LAMPE	ST-PAUL-DE-VARCES	38	0.52	-2.61	-1.72	-2.52	-2.71	-2.54	-2.72	1.02	1066	6.2	2.33	0.26	0.29	23	51	77	DFW	25			
ID18	LE VERDAREL	ST-CHAFFREY	5	2.63	-3.3	-2.54	-3.25	-2.68	-2.36	-2.7	0.66	2356	1.7	2.42	0.18	0.15	13	41	86	DFW	1514			0.12
ID180	TORRENT DU BRESSON	ST-VINCENT-DE-MERCUZE	38	6.63	-3.46	-2.74	-3.4	-3.52	-3.23	-3.51	0.59	1706	10.4	1.51	0.17	0.25	21	51	81	DFD		3349	8414	0.06
ID185	L'EBRON	TREMINIS	38	3.93	-3.26	-2.51	-3.2	-3.24	-2.66	-3.19	0.74	1716	53.0	2.21	0.13	0.14	25	60	102	DFW	7321	26169	62823	0.2
ID186	LES SAGNES	TREMINIS	38	0.34	-2.71	-1.85	-2.61	-2.73	-2.59	-2.72	1.12	701	17.8	0.72	0.21	0.22	28	58	101	DFW	345	1451	4360	0.08
ID199	LA ROIZE	VOREPPE	38	12.1	-4.02	-3.27	-4	-4.04	-3.72	-4.01	0.42	3461	3.7	1.77	0.1	0.05	27	65	100	DFD	599	2071	50000	0.1
ID200	MALSOUCHE	VOREPPE	38	3.87	-3.4	-2.78	-3.35	-4.36	-3.69	-4.36	0.75	3286	0.6	0.5	0.09	0.19	25	64	99	DFD	52	228	629	
ID201	LE MERDEREL	AIGUEBLANCHE	73	1.02	-3.04	-2.19	-2.95	-3.83	-3.24	-3.83	0.98	1453	0.7	0.5	0.22	0.05	15	38	79	DFW				0.06

CODE	Torrent	Commune	Dep.	A [km²]	IC50 [-]	IC95 [-]	Icm [-]	IC50zp [-]	IC95zp [-]	Icmzp [-]	M [-]	Lce [m]	Rzp [%]	Igzp [-]	Sce [m/m]	Sc [m/m]	P1h10 [mm]	P6h10 [mm]	P24h10 [mm]	Typ.	Vm [m3]	V10 [m3]	Vref [m3]	Fevt [/an]
ID202	LE CRETET	AITON	73	0.14	-2.76	-1.47	-2.55	-3.31	-2.8	-3.31	0.53	657	1.4	0.5	0.29	0.27	21	43	78	DFD				0.02
ID204	RUISSEAU DU GROS CHENE	AITON	73	2.73	-3.18	-2.25	-3.13	-4.06	-3.44	-4.06	0.53	959	0.2	0.5	0.52	0.09	22	44	82	DFD	116			0.04
ID209	RUISSEAU DES CARROZ	BEAUFORT	73	0.6	-2.89	-2.25	-2.88	-3.74	-3.16	-3.74	0.65	831	0.6	0.5	0.28	0.13	21	51	87	DFW				0.04
ID217	LA GRUVAZ	CEVINS	73	4.76	-3.09	-2.41	-3.04	-2.65	-1.58	-2.46	0.91	1753	0.4	0.5	0.21	0.14	20	45	85	DFW				0.2
ID219	LE RECLAZ	CHAMPAGNY EN VANOISE	73	9.61	-3.7	-2.85	-3.69	-3.17	-2.8	-3.3	0.46	2145	2.3	3.13	0.2	0.22	14	35	66	DFD				0.04
ID222	RUISSEAU DES MOULINS (1)	EPIERRE	73	6.12	-2.95	-2.26	-2.89	-3.12	-2.72	-3.1	0.81	1542	4.6	3.7	0.49	0.26	21	41	74	DFW	402			0.06
ID225	RUISSEAU DE CRUET	FRETERIVE	73	0.51	-2.74	-1.79	-2.63	-2.98	-2.72	-2.96	2.12	1356	21.9	1.61	0.2	0.21	22	50	88	DFW				0.02
ID238	LE REVERS	MERY	73	0.45	-2.75	-1.91	-2.7	-2.83	-2.4	-2.81	1.55	891	9.0	2.71	0.3	0.18	25	58	88	DFW	98	431	1319	0.02
ID239	ST-ANTOINE	MODANE	73	6.38	-3.53	-3.01	-3.54	-3.55	-2.9	-3.46	0.76	2638	38.1	4.26	0.15	0.11	13	40	78	DFW				0.06
ID240	RUISSEAU DU RIEU-ROUX	MODANE	73	1.76	-2.69	-1.9	-2.62	-2.54	-2.36	-2.52	0.94	239	2.0	2.06	0.25	0.16	14	40	75	DFW	73			0.02
ID242	TORRENT DE LA COMBAZ	NOTRE-DAME-DES-MILLIERES	73	3.34	-3.42	-2.84	-3.38	-4.4	-3.72	-4.4	1.03	3407	0.7	0.5	0.2	0.07	18	42	82	DFD	97			0.04
ID245	LE CLINEL	PONTAMAFREY	73	0.75	-2.45	-1.6	-2.37	-2.66	-2.42	-2.64	1.39	738	5.8	3.15	0.46	0.4	16	35	66	DFW				0.06
ID246	LA RAVOIRE	PONTAMAFREY	73	3.79	-3.17	-2.28	-3.09	-3.2	-2.57	-3.18	0.75	1283	26.7	3.47	0.17	0.43	14	37	65	DFW	6378	25411	206000	0.29
ID247	LE NANT CLEMENT	ROGNAIX	73	1.3	-2.77	-2.08	-2.74	-3.56	-3.02	-3.56	1.03	1051	0.4	0.5	0.43	0.19	18	41	83	DFW	421			0.06
ID250	LE NANTUEL (AMONT)	SAINT-AVRE	73	2.32	-2.9	-2.12	-2.85	-2.3	-2.19	-2.3	0.83	536	1.0	3	0.36	0.36	14	37	68	DFW	179	747	3360	
ID251	LE NANTUEL (AVAL)	SAINT-AVRE	73	2.5	-3.16	-2.59	-3.13	-2.99	-2.93	-3	0.86	1021	1.0	3	0.18	0.36	14	37	67	DFW		866	3273	
ID255	COMBE PAILLARDE (AMONT)	SAINT-JEAN-DE-MAURIENNE	73	0.31	-2.36	-1.63	-2.37	-2.23	-1.76	-2.19	1.43	513	22.5	3.72	0.54	0.53	16	33	58	DFW	284	881	1746	0.14
ID257	COMBE VARCIN (ET COMBE CHENAL)	SAINT-JEAN-DE-MAURIENNE	73	0.11	-2.15	-1.55	-2.08	-2.24	-1.78	-2.22	1.81	220	51.1	3.79	0.55	0.57	16	33	59	DFW	248	672	1286	0.14
ID258	CLARET	SAINT-JULIEN-DE-MONTDENIS	73	2.63	-3.23	-2.55	-3.16	-3.23	-2.61	-3.17	1.09	992	64.5	3.14	0.13	0.13	17	34	61	DFW	10553	34138	49544	0.37
ID260	LE MERDEREL	SAINT-MARTIN-LA-CHAMBRE	73	27.31	-3.8	-2.99	-3.72	-3.86	-2.63	-3.71	0.41	1826	4.1	3.22	0.12	0.07	12	35	66	DFD	1953			0.18
ID261	TORRENT DU ST-BERNARD OU ST-MARTIN (AMONT)	SAINT-MARTIN-DE-LA-PORTE	73	16.48	-3.54	-2.6	-3.44	-3.74	-2.24	-3.56	0.45	2127	13.3	3.57	0.34	0.18	15	35	61	DFD	2348	9269	35000	0.18
ID262	TORRENT DU ST-BERNARD OU ST-MARTIN (AVAL)	SAINT-MARTIN-DE-LA-PORTE	73	18.13	-3.6	-2.79	-3.52	-3.78	-2.76	-3.65	0.45	2604	12.3	3.55	0.21	0.19	15	35	61	DFD	3088	13995	35000	0.18
ID264	RUISSEAU DES MOULINS	SAINT-PAUL-SUR-ISERE	73	4.25	-3.02	-2.22	-2.98	-3.87	-3.28	-3.87	0.89	1789	0.3	0.5	0.33	0.13	21	42	82	DFW	140	295	555	

CODE	Torrent	Commune	Dep.	A [km²]	IC50 [-]	IC95 [-]	Icm [-]	IC50zp [-]	IC95zp [-]	Icmzp [-]	M [-]	Lce [m]	Rzp [%]	Igzp [-]	Sce [m/m]	Sc [m/m]	P1h10 [mm]	P6h10 [mm]	P24h10 [mm]	Typ.	Vm [m3]	V10 [m3]	Vref [m3]	Fevt [/an]
ID265	LE GARGOT	SAINT-PIERRE-D'ALBIGNY	73	4	-3.45	-2.85	-3.38	-3.59	-3.32	-3.59	0.79	1452	3.1	1.02	0.13	0.12	19	49	87	DFW				0.08
ID266	LE FAVASSET (AVAL)	SAINT-PIERRE-D'ALBIGNY	73	0.83	-3.03	-2.12	-2.95	-3.83	-3.24	-3.83	1.19	1669	1.0	0.5	0.17	0.11	21	49	87	DFW				0.02
ID268	LE NANT BRUYANT	SAINTE-HELENE-SUR-ISERE	73	11.27	-3.85	-3.23	-3.79	-4.93	-4.17	-4.93	0.63	2097	0.2	0.5	0.08	0.03	20	43	81	DFW				0.04
ID272	TORRENT DU BEY OU RUISSEAU DE BANDY	TERMIGNON	73	1.33	-2.65	-1.87	-2.62	-2.36	-1.64	-2.25	1.45	557	11.6	4.43	0.3	0.29	14	46	92	DFW	787	3448	9818	0.06
ID278	LE NANT CROEX	UGINE	73	2.68	-2.95	-2.08	-2.89	-3.19	-2.78	-3.15	0.91	475	10.9	2.41	0.21	0.17	19	44	85	DFW	1069			0.02
ID279	LE NANT PUGIN	UGINE	73	2.04	-3.46	-2.7	-3.36	-4.36	-3.69	-4.36	0.65	2023	0.6	0.5	0.11	0.11	20	42	85	DFW	370			0.14
ID281	LE RIEUBEL	VILLARGONDRAN	73	2.81	-3.11	-2.34	-3.06	-3.16	-2.94	-3.15	0.74	1571	12.4	1.67	0.27	0.2	16	32	58	DFW	259	1183	4775	0.1
ID286	LE PIEZAN (AMONT)	CONS-STE-COLOMBE	74	1.45	-2.75	-2.07	-2.67	-3.48	-2.94	-3.48	1.1	378	4.9	0.5	0.21	0.16	19	45	80	DFW	289	1180	5000	0.1
ID287	LE PIEZAN (AVAL)	CONS-STE-COLOMBE	74	2.75	-3.18	-2.4	-3.09	-4.01	-3.4	-4.01	0.93	1799	2.9	0.5	0.1	0.15	18	44	79	DFW	691	2954	5000	0.1
ID292	LE NANT BORDON	PASSY	74	4.89	-3.29	-2.31	-3.25	-3.44	-3.02	-3.44	0.78	2096	36.3	3.73	0.33	0.49	16	40	78	DFW	3314	8529	50000	0.22
ID296	TORRENT DE RENINGE	SALLANCHES	74	1.89	-3.5	-2.73	-3.42	-3.62	-3.29	-3.61	1.38	3466	14.0	2.62	0.09	0.11	18	42	68	DFD	327	1186	34000	0.06
ID299	RUISSEAU DE BEROUZE	SAMOENS	74	3.3	-3.54	-2.33	-3.49	-4.54	-3.84	-4.54	0.57	1775	0.4	0.5	0.22	0.14	21	48	96	DFD	194			0.06
ID300	LE CLEVIEUX	SAMOENS	74	27.99	-3.92	-3.12	-3.86	-3.89	-3.17	-3.82	0.36	2309	1.7	3.83	0.04	0.1	18	49	97	DFD	1975			0.06
ID305	NANT SEC	SIXT-FER-A-CHEVAL	74	1.54	-3.08	-2.23	-3	-3.11	-2.29	-3.03	1.19	1972	42.8	2.75	0.15	0.22	23	52	93	DFW	1914	7851	27590	0.02
ID308	TORRENT DE DORJON	MEGEVETTE	74	5.91	-4.52	-3.28	-4.39	-5.71	-4.83	-5.71	0.28	2481	0.3	0.5	0.03	0.2	20	50	85	BL				0.06
ID317	TORRENT DU DARD (AMONT)	ST-GERVAIS-LES-BAINS	74	0.27	-2.36	-1.45	-2.32	-3.02	-2.55	-3.02	1.33	713	0.9	0.5	0.55	0.21	23	45	80	DFW				0.08
ID318	TORRENT DU DARD (AVAL)	ST-GERVAIS-LES-BAINS	74	0.45	-2.59	-1.8	-2.52	-3.28	-2.77	-3.28	1.27	1214	1.1	0.5	0.28	0.21	23	45	80	DFW				0.08
ID319	ARVEYRON DE LA MER DE GLACE	CHAMONIX-MONT-BLANC	74	77.76	-3.61	-2.47	-3.53	-3.99	-3.28	-3.91	0.36	2645	1.9	3.64	0.04	0.24	13	44	90	DFD	11060	42611	150000	0.12
ID320	LES FAVRANDS	CHAMONIX-MONT-BLANC	74	5.59	-2.89	-2	-2.83	-3.17	-2.78	-3.15	1.13	461	14.1	3.12	0.18	0.19	15	43	81	DFW	3515			0.02
ID322	TACONNAZ	CHAMONIX-MONT-BLANC	69	7.56	-2.91	-2.1	-2.83	-2.85	-1.56	-2.64	1.16	1545	2.6	4.86	0.25	0.39	17	44	80	DFW	432	1732	3946	0.02
ID323	LA CREUSAZ	CHAMONIX-MONT-BLANC	74	6.19	-3.19	-2.3	-3.08	-3.28	-2.43	-3.17	1.27	2712	9.7	3.89	0.1	0.2	16	43	81	DFD	5856	5131	90000	0.1
ID326	LE BOURGEAT	LES HOUCHES	74	3.91	-2.72	-2.02	-2.64	-2.87	-2.14	-2.79	1.26	889	39.9	4.16	0.25	0.19	19	44	80	DFW	475			0.12

CODE	Torrent	Commune	Dep.	A [km²]	IC50 [-]	IC95 [-]	Icm [-]	IC50zp [-]	IC95zp [-]	Icmzp [-]	M [-]	Lce [m]	Rzp [%]	Igzp [-]	Sce [m/m]	Sc [m/m]	P1h10 [mm]	P6h10 [mm]	P24h10 [mm]	Typ.	Vm [m3]	V10 [m3]	Vref [m3]	Fevt [/an]
ID329	LE NANT BORDON (2)	PASSY	74	1.65	-2.77	-2.04	-2.71	-2.83	-2.5	-2.82	0.8	1041	61.5	3.97	0.24	0.24	17	42	81	DFW				0.22
ID40	TORRENT DE L'AIGUILLE	BIVIERS	38	0.24	-2.47	-1.59	-2.37	-2.65	-2.43	-2.61	1.59	520	35.6	2.07	0.29	0.26	21	52	78	DFW	276	1065	3000	0.04
ID43	TORRENT DES GUICHARDS	BIVIERS	38	0.58	-2.48	-1.67	-2.37	-2.55	-2.24	-2.52	1.02	402	16.7	2.84	0.17	0.19	21	52	77	DFW	1142	4787	30000	0.16
ID44	TORRENT DE CREPON	BIVIERS	38	0.24	-2.4	-1.79	-2.31	-2.48	-1.86	-2.43	1.68	601	18.0	2.08	0.34	0.2	21	52	77	DFW	125	546	1744	0.16
ID47	TORRENT DE GAMOND (ST-HUGUES)	BIVIERS	38	0.51	-2.45	-1.64	-2.35	-2.59	-2.41	-2.59	1.16	411	23.7	2.44	0.23	0.29	21	52	77	DFW	235	842	2415	0.16
ID48	LE MERDARET (AMONT)	CHANTELOUVE	38	0.91	-2.56	-1.9	-2.48	-2.56	-1.91	-2.49	0.91	525	98.2	3.43	0.32	0.19	21	53	85	DFW	5186	16838	59139	0.47
ID49	LE MERDARET (AVAL)	CHANTELOUVE	38	3.18	-3.25	-2.45	-3.25	-3.36	-2.84	-3.4	0.63	2133	49.8	3.08	0.13	0.14	21	53	84	DFW	13534	31752	62881	0.47
ID50	RAVIN DES PALES	CHANTELOUVE	38	0.74	-2.43	-1.77	-2.39	-2.51	-2.03	-2.5	1.11	937	71.7	2.25	0.29	0.14	21	53	85	DFW	4109	11058	18996	0.27
ID501	ARVEYRON ARGENTIERE	CHAMONIX	74	32.92	-3.59	-2.85	-3.49	-3.69	-2.9	-3.62	0.5	1864	4.2	3.7	0.09	0.27	13	49	99	DFD	2049	7122	25536	0.06
ID57	RUISSEAU DES ARCHES	CHICHILIANNE	38	1.26	-3.26	-2.75	-3.22	-3.36	-2.81	-3.32	0.77	1932	57.5	1.32	0.14	0.14	26	64	98	DFW	3216	9942	17891	0.27
ID58	RUISSEAU DES FRACHES	CHICHILIANNE	38	0.97	-2.97	-2.45	-2.91	-3.01	-2.52	-2.96	0.81	1435	44.0	1.44	0.17	0.17	27	64	97	DFW	1574	5863	15958	0.12
ID59	RUISSEAU DES FRACHES	CHICHILIANNE	38	12.66	-4.22	-3.07	-4.22	-3.33	-2.74	-3.34	0.26	1944	7.1	1.35	0.06	0.17	25	63	95	BL	1922	6551	16033	0.06
ID60	TORRENT DE LA BERNARDIERE	CHICHILIANNE	38	0.81	-3	-2.23	-2.92	-3.1	-2.81	-3.09	0.81	1118	28.6	1.32	0.15	0.22	27	64	97	DFW	682			0.04
ID64	LE RIF TALON	CLAIX	38	1.31	-2.87	-2.22	-2.79	-3	-2.77	-2.99	1.11	953	13.5	1.46	0.23	0.18	21	51	83	DFW	224			0.12
ID65	RUISSEAU DE CHALANNE	CORDEAC	38	2.28	-2.86	-2.15	-2.79	-2.83	-2.1	-2.73	0.64	796	10.1	2.66	0.21	0.11	26	53	89	DFW	619	2373	6529	0.14
ID74	LE CRAPONOZ	CROLLES	38	7.84	-4.26	-3.76	-4.25	-4.17	-3.62	-4.1	0.65	3312	3.0	2.86	0.02	0.06	22	53	79	DFD	1040			0.02
ID76	VERDERET	EYBENS	38	14.16	-4.74	-3.48	-4.63	-6.02	-5.1	-6.02	0.18	1591	0.1	0.5	0.1	0.06	19	50	78	BL	477	1653	3818	0.02
ID79	SONNANT	GIERES	38	26.3	-4.92	-4.2	-4.86	-6.32	-5.34	-6.32	0.31	5093	0.2	0.5	0.02	0.05	20	50	79	DFD	254	510	1403	0.02
ID80	LA GRESSE	GRESSE-EN-VERCORS	38	2.2	-2.87	-2.15	-2.83	-3.05	-2.6	-3	0.67	936	29.7	2.11	0.15	0.14	25	65	93	DFW				0.02
ID88	LE CHARMEYRAN	LA TRONCHE	38	4.1	-3.53	-2.62	-3.46	-3.28	-2.97	-3.26	0.54	910	2.3	2.21	0.06	0.07	23	53	83	DFD	400			0.12
ID96	LE SAINT-ANTOINE	LE BOURG D'OISANS	38	1.35	-2.74	-2.22	-2.71	-2.81	-2.2	-2.74	1.01	1073	30.6	3.92	0.15	0.23	18	53	87	DFW	4245	16878	80000	0.1
ID98	LE TREUIL	LE BOURG D'OISANS	38	4.55	-2.92	-2.11	-2.84	-3.09	-2.39	-3.03	0.84	1345	12.5	0.8	0.25	0.25	20	51	87	DFW	106			0.06

H Historique de la BD-RTM pour les torrents de la METRO

Le Lanfrey

Source	Date	Nature	Causes	Zone de départ	Zone d'arrivée
BD RTM	07/06/2002	Crue du torrent de Lanfray avec débordements à 1 H dans le village puis à l'aval R.N.	Orage assez exceptionnel : trentennale à cinquantennale. - Lit de capacité limitée avec digues faibles (étude SOGREAH de 1996). Dans cette étude le débit décennal est de 8 à 10 m3, le centennal de l'ordre de 20 m3. Le ponceau de la R.N. 75 est plein bord à 12 m3/s, sans compter l'engravement, le lit aval à une capacité de 8 à 16 m3/s. Le débit constaté peut être estimé à 12 à 15 m3/s environ a priori.		Chancelière et plaine
BD RTM	22/08/2005	Crue du ruisseau du Lanfrey : risque de débordement dans le secteur endigué en aval de la RN 75 et inondation de pied de versant due aux infiltrations à travers la digue. A noter : crue modérée du Rif Tronchard ; pas de crue sur le Souchet (quelques centaines de l/s dans galerie)... Mais crues sur Domeynon, Vorz en Belledonne : voir carte des pluies.	Insuffisance du gabarit du Lanfrey et fragilité des digues pour des crues vraisemblablement au-delà d'un événement pluri-décennal ; rôle d'un ruissellement accru après sécheresse signalé par quelques témoins (?)	Rive gauche de la digue du Lanfrey Infiltrations importantes à partir du massif semi-perméable, confectionné vraisemblablement avec matériaux de curage puis renforcé (enrochements, rehaussement...)	Cuvette en amont de la voie SNCF après circulation en pied de digue Quelques dizaines de cm d'eau (secteur classé en I1 sur la carte des aléas)
BD RTM	1693	Lave torrentielle du ruisseau le long du hameau de Fontanil			
BD RTM	02/09/1783	Inondation, débordement et crue du torrent du Fontanil			

Le Charmeyran

Source	Date	Nature	Causes	Zone de départ	Zone d'arrivée
BD RTM	1750	Crue torrentielle du Charmeyran et de l'Isère.			
BD RTM	1758	Crue torrentielle du Charmeyran et de l'Isère.			
BD RTM	1781	Crue torrentielle du Charmeyran.			
BD RTM	1er trimestre 1875	Crue torrentielle du Charmeyran.			Route nationale.
BD RTM	21/07/1882	Crue torrentielle du Charmeyran.			
BD RTM	1905	Crue torrentielle du Charmeyran.			Commune de la Tronche : cimetière.
BD RTM	07/12/1913	Crue torrentielle du Charmeyran.			Commune de la Tronche : devant l'Hôpital civil.
BD RTM	28/12/1923	Crue torrentielle du Charmeyran.			Route de Chambéry.
BD RTM	19/01/1951	Crue torrentielle du Charmeyran.		Débordement sur la RN 90 à la suite de l'obstruction du pont Bottu.	La Tronche : devant l'Hôpital civil. Débordement sur la RN 90 suite à l'engorgement du pont par les matériaux charriés : dépôts de matériaux sur plusieurs centaines de mêtres jusqu'à l'entrée de l'Hopital civil.
BD RTM	08/02/1955	Crue torrentielle du Charmeyran.		Hameau de Chantemerle.	
BD RTM	25/12/1968	Crue torrentielle du Charmeyran.			La Tronche : RN 90.

BD RTM	04/06/1971	Crue torrentielle du Charmeyran.			RD 512 au carefour de la RD 512 et de la RD 512 a.
BD RTM	1er trimestre 1993	Débordement du torrent du Goutey.			Propriété Gontier.
BD RTM	juil-00	Coulées boueuses, d'un volume de 30 à 40 m3, dans la combe du Verney débordant sur la RD 512.		Ravines du St-Eynard dans la Combe du Verney.	RD 512.
BD RTM	18/08/1986	Lave torrentielle dans le torrent de la Ruine.		Cote 600 : ravin de la Ruine.	Cote 370 : chemin communal de la Vierge Noire à Maubec. Lentille de 2500 m3 stoppée dans le lit du ruisseau, à l'altitude de 400 m.
BD RTM	25/08/2009	Crue du torrent du Gorget avec transport de matériaux remplissant partiellement (70%) la plage de dépôt du torrent du Gorget et totalement la plage de dépôt aval du torrent du Charmeyran.		Bassin versant du torrent - Alt : 800 m Bassin versant dénudé constitué de bancs marneux	Plage de dépôt aval - Alt : 268 m Capacité de stockage d'environ 500 m³
BD RTM	06/06/2010	Orages qui ont provoqués des crues sur une partie des torrents de la FD du St Eynard (Manival / 3000 m³ - Arguil / 1200 m³ - Corbonne / 400m³ - Mont Garin / 330 m³ - Gamond / 930 m³ - Chandetière / 220 m³ - Bizenons / 900 m³) avec dépôt dans les plages de dépôts et bouchons sur la piste des réservoirs. Crue également sur le Charmeyran avec remplissage de la plage de dépôt et fonctionnment de la surverse. Pas de dépôt dans le PDD amont. Une seule zone de débordement du torrent de Chandetière en partie aval au niveau du chemin de Montlivet en direction des maisons en RG. Engravement des passages à gué. Ruissellement de versant important combiné en partie basse des communes citée à un problème général de saturation des réseaux EP et de refoulement dans les zones inondables.		Falaise du St Eynard Falaise subverticale fortement dénudée	En aglomérations jusqu'aux chantournes dépôt sur les gués et dans les plages de dépôt - refoulement des réseaux en partie basse

Les Jaillières amont (Ruine amont)

Source	Date	Nature	Causes	Zone de départ	Zone d'arrivée
BD RTM	03/06/1998	Crues solides des torrents du St-Eynard : torrents de la Ruine, de Mont-Garin, de Chandetière, de Corbonne, d'Aiguille, des Guichards, de Crépon, d'Arguil, des Ecorchiers et du Manival. Volume estimé pour le Manival : 15 000 m3.	Trombe d'eau sur la Crête du St-Eynard et le Bec Charvet.	Cote 700 environ. Mise en charge des cône d'éboulis.	Cote 500 environ à la première rupture de pente ou barrage de rétention. Plage de dépôt du Manival - Aiguille : 500 m3. Guichards : 500 m3. Ecorchiers : 500 m3. Corbonne : 500 m3. Plage de dépôt du Manival : 6000 m3. Plage de dépôt d'Arguil : 1500 m3.
BD RTM	32288	Crues torrentielles (liquide + solide) des torrents de la Ruine - Saillère, de Lachas (ravin A + principale +B), de Bizenon + ravin A, et de Chandetière + branche A, et des torrents du Mont-Pellet (Gamond et Mont Garin). - Création d'un chenal d'écoulement : important transport solide en masse (lave torrentielle) au lieu-dit Billerey en limite communale Biviers - Meylan.	Destabilisation des cônes d'éboulis au pied de la falaise du St-Eynard suite à un orage de grêle. - Mise en charge des matériaux de l'effondrement d'abrupt du 12.02.1987 au lieu-dit Billerey.	Cote 850 : pied de falaise. Cônes d'éboulis mis en charge.	La Ruine : plage de dépôt + cote 227 à Maupertuis. Lachas : cote 600 route des réservoirs. Bizenon : route des réservoirs + cote 475 (grange Mathieu). Chandetière : route des réservoirs + cote 450. Billerey : cote 470, + ancienne ferme de Montlivet (maison Mathieu). Gamont et Mont Garin : aux Plantées. La Ruine : 1500 m3 dans la plage de dépôt de Chateau Corbeaux. Lachas : 100 m3 dans le ravin A, 75 m3 dans la branche principale, 150 m3 dans la branche B. Bizenon : 500 m3 sur la route des réservoirs. Chandetière : 500 m3 sur la route des réservoirs. Gamond : débordement sous la piste menant aux réservoirs, au niveau des barrages 21 (en RG) et 31 (en RD et RG) avec un basculement sur la RG en direction du Mont Garin. Dépôt de la lave dans les taillis. Sortie de la lame d'eau au dessus de la jonction des 2 torrents. Le flot se jette dans le Mont Garin qui rompt ses digues en RG. Mont Garin : débordement entre le passage de St-Hugues et celui des Arriots et débordement sur le chemin qui juxtapose les pupilles de l'air.
BD RTM	05/07/1987	Petites laves torrentielles et transports de branches du ruisseau de Jaillières (= Ruine).	Orages très violents de début juillet.	Bassin versant du St-Eynard.	Indéterminée.
BD RTM	nov-35	Crue torrentielle du torrent des Jaillères (= Ruine).			
BD RTM	21/07/1882	Crue torrentielle du torrent de Jaillères.			RN 90.

BD RTM	29/08/2003	Crue de tous les torrents avec lave torrentielle. L'ensemble des dépôts cumulés est estimé à 7000 m3.	Violents orages dans la nuit du 28 au 29 Août.	Crête de la FD du St Eynard (1 300-1 350 m). Falaises calcaires générant des temps de concentration des eaux de ruissellement très rapides.	Les laves se sont arrêtées en amont ou au niveau des PDD (environ 550 m), sauf pour le torrent de Chandetière. Crépon : le débordement de la lave en rive gauche est descendu d'environ 200 m en-dessous niveau PDD. Chandetière : plage de Montlivet, altitude 420, avec débordements et écoulement sur voirie jusqu'au bas du chemin des Combes, altitude 370. Plage comblée (200 m3). Plage non concédée (responsable ST Meylan).
BD RTM	18/07/2005	Laves torrentielles dans série RTM du St Eynard. Torrents de Chandetière, Bizenon I et II, Gamond, Mont Garin, Crépon, Guichards, Corbonne, Arguil, Ecorchiers, Manival.	Précipitation orageuse.	Haut bassin versant - Falaises du St Eynard (1 300 - 1 350 m) Bassin de réception type torrent à clappes	Route des réservoirs et plages de dépôts : environ 550 m
BD RTM	12/07/2006	Crues sur l'ensemble des torrents du St Eynard avec débordements et dépôts de matériaux (du Nord au Sud : Arguil - Corbonne - Crépon - Mont Garin - Gamond - Chandetière - Bizenon I, II et III - Ruine)	Météo : violents orages localisés	Massif du St Eynard ; torrents en forêt domaniale RTM	Dans les PDD, la route des réservoirs et dans l'agglomération en partie basse (gestion Mairie, SITSE) : dépôts au niveau des passages à gué, grilles encombrées. Arguil : important dépôt de matériaux dans PDD (altitude 590 m) et en amont (inférieur à 2 000 m3) ; très importante activité dans la branche B avec forte érosion régressive. - Corbonne : dépôt de matériaux (environ 300 m3) dans la PDD (amont B21) - Altitude 540 m. - Crépon : dépôt dans PDD (altitude 550 m) environ 200 m3. - Mont Garin : dépôts sur route des réservoirs (altitude 560 m) environ 60 m3. - Gamond : dépôts sur route des réservoirs (altitude 570 m) environ 400 m3 et PDD St Hugues (altitude 500 m) environ 200 m3. - Chandetière : dépôt sur route des réservoirs (altitude 590 m) estimé à 200 m3. Important enfoncement du lit en forêt (supérieur à 1 m entre altitude 530 et 580 m) avec transport matériaux et débordements principalement au niveau de la PDD de Montlivet (altitude 420 m) comblée (environ 300 m3), débordement rive gauche jusqu'en bas du chemin des Combes. - Bizenon I, II, III : dépôts sur route des réservoirs et arrivée de deux nouvelles branches (altitude 590 m). Quelques dépôts estimés à 1 100 m3. Pas de lit identifié en partie basse. - La Ruine : léger débordement amont barrage 17 rive droite (altitude 500 m). Plage de dépôt et grilles remplies.

BD RTM	06/06/2010	Orages qui ont provoqués des crues sur une partie des torrents de la FD du St Eynard (Manival / 3000 m³ - Arguil / 1200 m³ - Corbonne / 400m³ - Mont Garin / 330 m³ - Gamond / 930 m³ - Chandetière / 220 m³ - Bizenons / 900 m³) avec dépôt dans les plages de dépôts et bouchons sur la piste des réservoirs. Crue également sur le Charmeyran avec remplissage de la plage de dépôt et fonctionnment de la surverse. Pas de dépôt dans le PDD amont. Une seule zone de débordement du torrent de Chandetière en partie aval au niveau du chemin de Montlivet en direction des maisons en RG. Engravement des passages à gué. Ruissellement de versant important combiné en partie basse des communes citée à un problème général de saturation des réseaux EP et de refoulement dans les zones inondables.		Falaise du St Eynard Falaise subverticale fortement dénudée	En aglomérations jusqu'aux chantournes dépôt sur les gués et dans les plages de dépôt - refoulement des réseaux en partie basse

Les Jaillières aval (Ruine aval)

Source	Date	Nature	Causes	Zone de départ	Zone d'arrivée
BD RTM	25/05/1988	Crues torrentielles (liquide + solide) des torrents de la Ruine - Saillère, de Lachas (ravin A + principale +B), de Bizenon + ravin A, et de Chandetière + branche A, et des torrents du Mont-Pellet (Gamond et Mont Garin). - Création d'un chenal d'écoulement : important transport solide en masse (lave torrentielle) au lieu-dit Billerey en limite communale Biviers - Meylan.	Destabilisation des cônes d'éboulis au pied de la falaise du St-Eynard suite à un orage de grêle. - Mise en charge des matériaux de l'effondrement d'abrupt du 12.02.1987 au lieu-dit Billerey.	Cote 850 : pied de falaise. Cônes d'éboulis mis en charge.	La Ruine : plage de dépôt + cote 227 à Maupertuis. Lachas : cote 600 route des réservoirs. Bizenon : route des réservoirs + cote 475 (grange Mathieu). Chandetière : route des réservoirs + cote 450. Billerey : cote 470, + ancienne ferme de Montlivet (maison Mathieu). Gamont et Mont Garin : aux Plantées. La Ruine : 1500 m3 dans la plage de dépôt de Chateau Corbeaux. Lachas : 100 m3 dans le ravin A, 75 m3 dans la branche principale, 150 m3 dans la branche B. Bizenon : 500 m3 sur la route des réservoirs. Chandetière : 500 m3 sur la route des réservoirs. Gamond : débordement sous la piste menant aux réservoirs, au niveau des barrages 21 (en RG) et 31 (en RD et RG) avec un basculement sur la RG en direction du Mont Garin. Dépôt de la lave dans les taillis. Sortie de la lame d'eau au dessus de la jonction des 2 torrents. Le flot se jette dans le Mont Garin qui rompt ses digues en RG. Mont Garin : débordement entre le passage de St-Hugues et celui des Arriots et débordement sur le chemin qui juxtapose les pupilles de l'air.

BD RTM	05/07/1987	Petites laves torrentielles et transports de branches du ruisseau de Jaillières (= Ruine).	Orages très violents de début juillet.	Bassin versant du St-Eynard.	Indéterminée.
BD RTM	01/11/1935	Crue torrentielle du torrent des Jaillères (= Ruine).			
BD RTM	21/07/1882	Crue torrentielle du torrent de Jaillères.			RN 90.
BD RTM	06/06/2010	Orages qui ont provoqués des crues sur une partie des torrents de la FD du St Eynard (Manival / 3000 m³ - Arguil / 1200 m³ - Corbonne / 400m³ - Mont Garin / 330 m³ - Gamond / 930 m³ - Chandetière / 220 m³ - Bizenons / 900 m³) avec dépôt dans les plages de dépôts et bouchons sur la piste des réservoirs. Crue également sur le Charmeyran avec remplissage de la plage de dépôt et fonctionnment de la surverse. Pas de dépôt dans le PDD amont. Une seule zone de débordement du torrent de Chandetière en partie aval au niveau du chemin de Montlivet en direction des maisons en RG. Engravement des passages à gué. Ruissellement de versant important combiné en partie basse des communes citée à un problème général de saturation des réseaux EP et de refoulement dans les zones inondables.		Falaise du St Eynard Falaise subverticale fortement dénudée	En aglomérations jusqu'aux chantournes dépôt sur les gués et dans les plages de dépôt - refoulement des réseaux en partie basse

Le Domeynon

Source	Date	Nature	Causes	Zone de départ	Zone d'arrivée
BD RTM	22/08/2005	Crue torrentielle du torrent du Domeynon. A Domène : - Débordements limités (avec début d'érosion) au droit des digues du Domeynon en rive droite à l'aval de la voie SNCF. - Puis rupture de digue en rive gauche à l'amont du lotissement de Chenevières sur une vingtaine de mètres, à l'amont d'un dépôt de matériaux obstruant la totalité du lit et sur toute sa hauteur sur une centaine de mètres de long. - Totalité du débit du Domeynon dans le lotissement avec évacuation du "trop-plein" de la cuvette par la chantourne.	Pluies importantes sur les hauts bassins (versants occidentaux) de Belledonne. - Capacité du lit du Domeynon à Domène de l'ordre de 30 m3/s (soit la crue décennale estimée), compte non tenu d'éventuelles obstructions ou dépôts de matériaux.	A Domène, débordement en rive gauche du Domeynon, à l'amont du lotissement de Chenevières A Domène : colmatage du lit du Domeynon a priori antérieur à la brèche ; a priori phénomène progressif de l'aval vers l'amont (causes : variation de pente ? - non évident - ; apport subit de matériaux depuis l'amont et bouchon ?)	Cuvette de Chenevières puis chantourne vers l'Isère A Domène : 1,5 à 2 m d'eau et de boues pour les habitations les plus touchées
BD RTM	1679	Lave torrentielle			
BD RTM	07/06/1955	Crue torrentielle du Domeynon			Papeteries de Domène
BD RTM	1er semestre 2007	Arrachement sur environ 100m² à l'aval de la route d'accès au hameau du CORNET.	Ravinement de surface : les pluies intenses de ce printemps sont renvoyées par un dévers de la plate-forme routière sur le talus aval constitué de matériaux facilement mobilisables (remblais?). Des glissières de sécurité récemment mises en place ont par leurs poteaux légèrement cisaillés le terrain offrant ainsi une porte d'entrée aux écoulements. Sous l'abondance des eaux de ruissellement concentrées, le terrain en forte pente s'est arraché sur une profondeur < 1m00. Erosion torrentielle : à noter que le phénomène peut également trouver sa cause par un sapement du pied de berge due à l'activité torrentielle du DOMEYNON. Les dépôts successifs et particulièrement la crue d'août 2005 ont détournés le cours d'eau dans son lit mineur et concentrés l'activité érosive sur la rive droite.	Voie communale d'accès au hameau du CORNET - cote 590m. Route revêtue avec enrobé récent présentant à cet endroit précis un léger dévers aval. Des glissières de sécurité ont récemment été installées pour éviter la chute de véhicule, particulièrement lorsque la chaussée est glissante (lieu confiné, fort risque de gel en hiver).	Torrent du DOMEYNON, rive droite - cote 580m. La berge sur laquelle est assise la route est constituée de matériaux peu stables et présente une forte pente. Le lit mineur du torrent est confiné par la présence d'un important îlot central prolongé à l'amont par des dépôts faisant suites aux crues de 2005. L'écoulement est donc concentré dans un extrados, favorisant l'érosion du pied de berge.
BD RTM	01/09/1783	Crue torrentielle du ruisseau de Revel			

Le Verderet

Source	Date	Nature	Causes	Zone de départ	Zone d'arrivée
BD RTM	26/07/1758	Crue torrentielle du "torrent d'Eybens" au lieu-dit "Les Granges"			
BD RTM	25/12/1968	Crue torrentielle du Merdaret (Verderet)			
BD RTM	22/12/1991	Crue torrentielle du ruisseau du Verderet	Neige + pluie (redoux)	Plateau de Brié et ruisseaux d'Herbeys Vaste impluvium naturel, peu boisé, encore fortement agricole (polyculture) et zone pavillonaires en extension croissante.	Eybens. Caserne des Pompiers, Comanderie puis quartier des Ruires/Javaux. Obstruction du passage souterrain. Débordements hors du lit mineur canalisé, sans retours des eaux (lit en toit, cône de déjection). Urbanisation récente (1970-1990).

Le Vernon

Source	Date	Nature	Causes	Zone de départ	Zone d'arrivée
BD RTM	11/09/1783	Lave torrentielle des ruisseaux de la Gorge (Prémol) et des Roux (Vernon).	Pluies 1000m en 48h (voir documents joints)	Bassin versant Recoin	Cone de dejaction et plaine de Vaulnaveys. Uriage touché.
BD RTM	08/10/1960	Lave torrentielle du torrent du Vernon.		Rupture d'un barrage artificiel dû à l'accumulation de rochers et d'arbres.	Ravines de plusieurs mêtres dans les champs.
BD RTM	sept-60	Lave torrentielle du torrent du Vernon.	Fortes pluies continues durant les heures précédentes.	Roche Béranger (station de Chamrousse) terrassement de piste. Cote > 1600.	Cote 553 : pont de la route de Belmont à St-Martin d'Uriage.
BD RTM	1858	Crue torrentielle du ruisseau du Vernon.			Hameau de la Faurie.
BD RTM	1758	Crue torrentielle du ruisseau du Vernon.			Château des Alberges à St-Georges d'Uriage.
BD RTM	1751	Crue torrentielle du ruisseau du Vernon.			Hameau de St-Georges.
BD RTM	1685	"Inondation, débordement, crue" du ruisseau du Vernon.			
BD RTM	22/08/2005	Crue des ruisseaux de Prémol et du Vernon.	Forte pluie les jours précédents dans le haut bassin		Pour le Prémol : ancienne scierie Roussin et habitations aux Coyrets. Pour le Vernon : RD 524 et habitations aux alentours. Le Prémol : érosion de berge au niveau de la scierie Roussin ; débordement dans la cour de la scierie en rive gauche. Attaque de la berge rive droite aux Coyrets et débordement en rive droite. Quelques dizaines de cm d'eau aux Coyrets.
BD RTM	août-18	Écoulements torrentiels, débordements hors du lit mineur sans gravité. Ces écoulements ont cependant provoqué un renardage important (sans doute déjà entamé précédemment) d'un contreseuil situé en aval du chemin Naclard	Précipitations orageuses du mois d'aout aggravées par des ruptures d'embâcles	Linéaire en aval du Recoin	Seuil en aval du chemin Naclard

Le Prémol

Source	Date	Nature	Causes	Zone de départ	Zone d'arrivée
BD RTM	1970	Débordement du ruisseau de Prémol à Passe-Rivière.	Embâcle de végétaux au pont de la route communale.		Cote 340 environ.
BD RTM	11/09/1783	Lave torrentielle des ruisseaux de la Gorge (Prémol) et des Roux (Vernon).	1000mm de pluie. Voir documents joints.	Inconnue. A priori tout le bassin versant est concerné.	Cônes de déjections et plaine. Dégâts indifférenciés entre VLB et VLH (voir "impacts")
BD RTM	22/08/2005	Crue des ruisseaux de Prémol et du Vernon.	Forte pluie les jours précédents dans le haut bassin		Pour le Prémol : ancienne scierie Roussin et habitations aux Coyrets. Pour le Vernon : RD 524 et habitations aux alentours. Le Prémol : érosion de berge au niveau de la scierie Roussin ; débordement dans la cour de la scierie en rive gauche. Attaque de la berge rive droite aux Coyrets et débordement en rive droite. Quelques dizaines de cm d'eau aux Coyrets.

Le Lavanchon amont

Source	Date	Nature	Causes	Zone de départ	Zone d'arrivée
BD RTM	17/06/1986	Crue torrentielle du torrent de l'Echarina			Route forestière de l'Echarina
BD RTM	18/05/1988	Laves torrentielles (les premières de 2 à 3 m de hauteur d'après les traces laissées sur les berges) du torrent de l'Echarina		Haut-bassin dans le cône détritique formé par l'écroulement du 28/4/1988	Les laves les plus audacieuses s'étalent sur l'atterrissement du barrage supérieur du Lavanchon
BD RTM	09/08/2009	Lave torrentielle, d'un volume vraisemblablement supérieur à 6000m3 (à confirmer après curage ou selon estimation via section d'écoulement sous le pont de la piste). Estimation des vitesses (calculs interne RTM 38) : de 3 à 4 m/s pour un débit instantanné maximum compris entre 20 et 30 m3/s.	Orage violent localisé sur la bordure orientale du Vercors (Cornafion/Gerbier), entre 16h30 et 17h00	Bassin de reception, altitude 1040m Vaste bassin dénudé et raviné dans les marnes hauteriviennes. Structure géologique complexe et très fracturée suite au chevauchement du Moucherotte/pic St Michel. Restes de l'écroulement de 1988 encore visibles mobilisés et mobilisables par le torrent.	Plage de dépôt (PDD), altitude 540m L'Echarina, Combe Louve (IGN) - Etalement de la lave sur toute la largeur de la PDD + calage du front de lave sur le barrage. L'intumescence dans la zone amont de la PDD a atteint 1 à 2 m de hauteur et plus de 3,5 m dans la partie chenalisée.
BD RTM	13/08/2020	Lave torrentielle	Orages. Vraisemblablement les orages survenus dans la soirée du 13 août 2020.	Bassin amont de l'Echarina. Forte reprise de matériaux sur l'ensemble du lit de l'Echarina et plus particulièrement sur les biefs compris entre les barrages B5 et B9 (réapparition des seuils B6 à B8 qui étaient enfouis depuis plusieurs années) et sur les biefs entre les barrages B20 et B22.	La lave s'est arrêtée dans la plage de dépôt. Le volume déposé est estimé entre 2000 et 3000 m3. Léger débordement en rive gauche de la plage de dépôt dans sa partie aval.

Le Lavanchon aval

Source	Date	Nature	Causes	Zone de départ	Zone d'arrivée
BD RTM	1931	Crue torrentielle du Lavanchon			
BD RTM	09/02/1955	Crue torrentielle du torrent du Lavanchon		Le Pied du Tour	La Combe
BD RTM	01/11/1935	Plusieurs crues à fort charriage du Lavanchon en novembre et décembre 1935. Exhaussement du lit entre 60 et 80 cm sur 1 km de long entre St Paul de Varces et Varces. Des débordements localisés avec engravement des zones agricoles, mais aucun rupture ou brèche dans les digues.	Pluies d'automne abondantes sur le quart sud-est de la France.	Haut bassin du Lavanchon	Plaine de Varces

Le Rif Talon

Source	Date	Nature	Causes	Zone de départ	Zone d'arrivée
BD RTM	16/11/2002	Crue du torrent du Rif Talon	Fortes pluies pendant pusieurs jours ayant entraîné une crue du Rif Talon - La buse au niveau de la rue de la Ronzy s'est bouchée. Le torrent a débordé inondant la rue de la Ronzy		
BD RTM	13/07/2006	Montée brutale du niveau d'écoulement du torrent du Rif Talon aux alentours de 19 H 45, suite au déclenchement d'une lave torrentielle boueuse. Passage de 5 à 6 "vagues" allant jusqu'à 1,5 m de hauteur dans le hameau de Malhivert et submersion de plusieurs habitations. Les dépôts sont constitués d'une pâte argileuse parsemée d'éléments rocheux et ligneux. Remplissage de la plage de dépôt par 300 m3 à 500 m3 de matériaux. Arrêt des plus gros blocs et des flottants issus des premières coulées. Fontionnement des branches principale, A et B. Aucune activité sur les branches C et D. La branche A ayant d'abord fonctionné en apportant les plus gros matériaux ainsi que la branche principale puis la branche B de nombreux matériaux plus fins (au moins deux vagues), la boue a été reprise plus en aval.	Averse de grêle et de pluies particulièrement intense en tête de bassin (les falaises du Vercors étant parfois invisibles derrière le rideau de pluis depuis le hameau de Malhivert), faisant suite à un orage survenu la veille, sans conséquence	Bassin versant du Rif Talon en forêt domaniale du Gerbier. Altitude : rebord des falaises du Vercors culminant à 1 872 m. Branche principale, A et B (aucune activité branche C et D). Falaises du Vercors avec plusieurs terrasses de l'altitude 1 872 m à 1 400 m puis forêt RTM de protection en aval	Hameau de Malhivert. Altitude : 454 m. Partie du hameau de Malhivert à proximité du torrent. La coulée de boue s'est arrêtée rue des Giroudes dans un champ.
BD RTM	14/01/1899	Crue torrentielle du Rif Talon	"Si le Rif Talon a quitté son lit, la faute en est à un riverain négligeant qui, depuis de longues années, l'a laissé encombré de brindilles, de bois coupé et même d'arbres entiers."		
BD RTM	oct-28	Crue torrentielle du Rif Talon			
BD RTM	1932	Crue torrentielle du torrent du Rif Talon			
BD RTM	févr-90	Crue torrentielle du Rif Talon - Draye blanche		Falaise, cicatrice jaunâtre	La lave et les blocs ont traversé le sentier du Balcon Est Balcon Est
BD RTM	21/11/1992	Crue torrentielle du Rif Talon		La Chièze - Pont du CD 106d (altitude : 270 m)	Carrefour de la Chièze (altitude : 255 m)
BD RTM	08/06/1996	Débordement du torrent du Rif Talon	Orage violent		Plusieurs débordements à différents ponceaux. Le plus important à l'amont de l'école de Malhivert.
BD RTM	10/06/2007	Crue torrentielle du Rif Talon avec débordement dans le hameau de Malhivert.	Pluies abondantes sur les falaises du Vercors.	Altitude : 1872 m, rebord des falaises du Vercors Falaises du Vercors avec plusieurs terrasses de l'altitude 1872 m à 1400 m puis forêt domaniale RTM du Gerbier en aval. Les branches A et B ont fonctionné. La piste forestière traversant la branche B est obstruée, la branche A a été purgée de ces matériaux.	Altitude : 454 m Peu de stockage dans la plage de dépôt, les matériaux ayant transités plus en aval. Le passage couvert dans le hameau de Malhivert s'est bouché entraînant le débordement. Quelques maisons sont touchées.

I Confrontation des observations aux prédictions des modèles empiriques

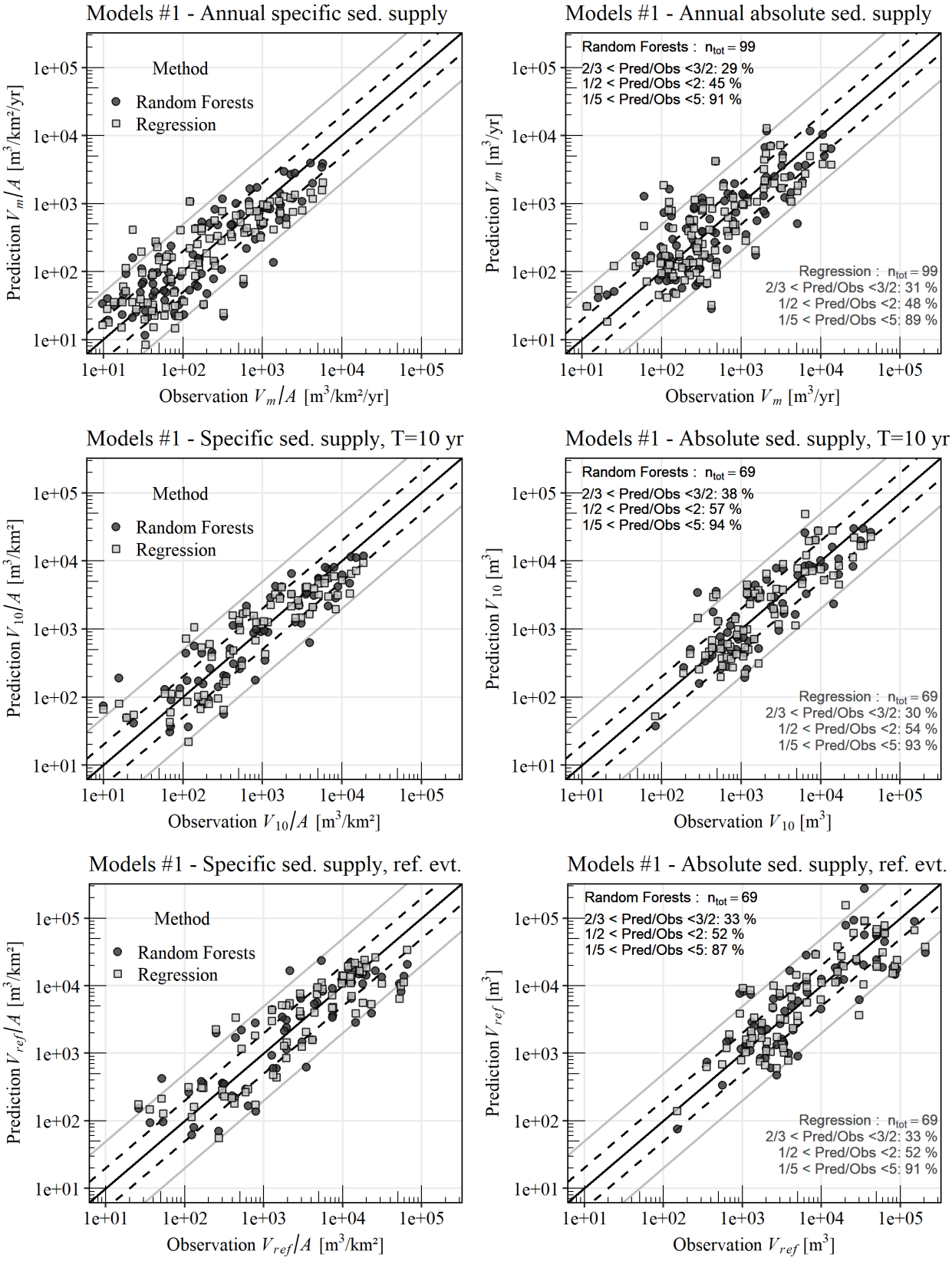


FIGURE 41 – Modèles #1 : Confrontation des valeurs prédites et observées de production sédimentaire moyenne annuelle (première ligne), décennale (seconde ligne) et de référence (dernière ligne) en valeur spécifique (colonne de gauche) et en valeur absolue (colonne de droite)

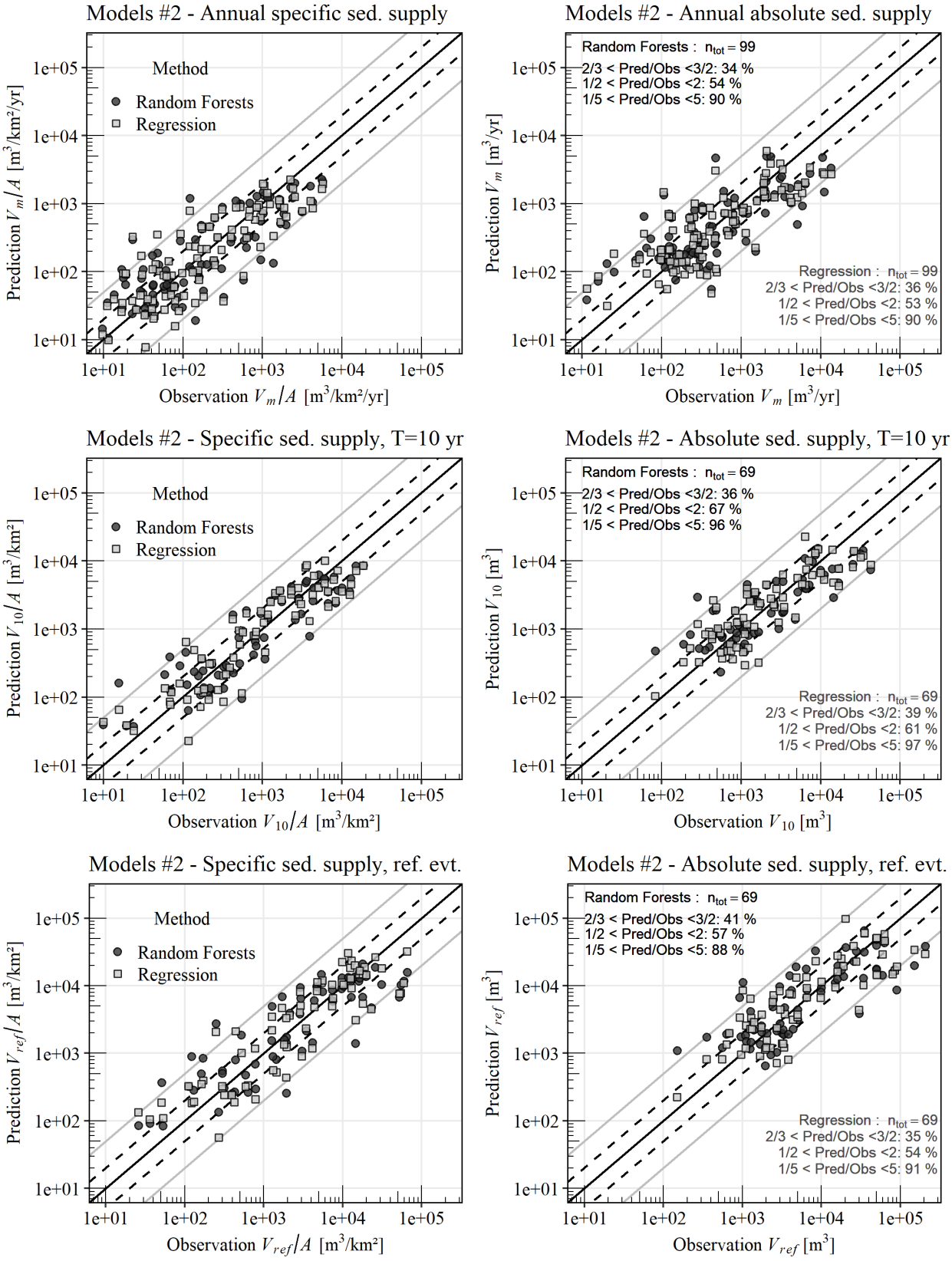


FIGURE 42 – Modèles #2 : Confrontation des valeurs prédites et observées de production sédimentaire moyenne annuelle (première ligne), décennale (seconde ligne) et de référence (dernière ligne) en valeur spécifique (colonne de gauche) et en valeur absolue (colonne de droite)

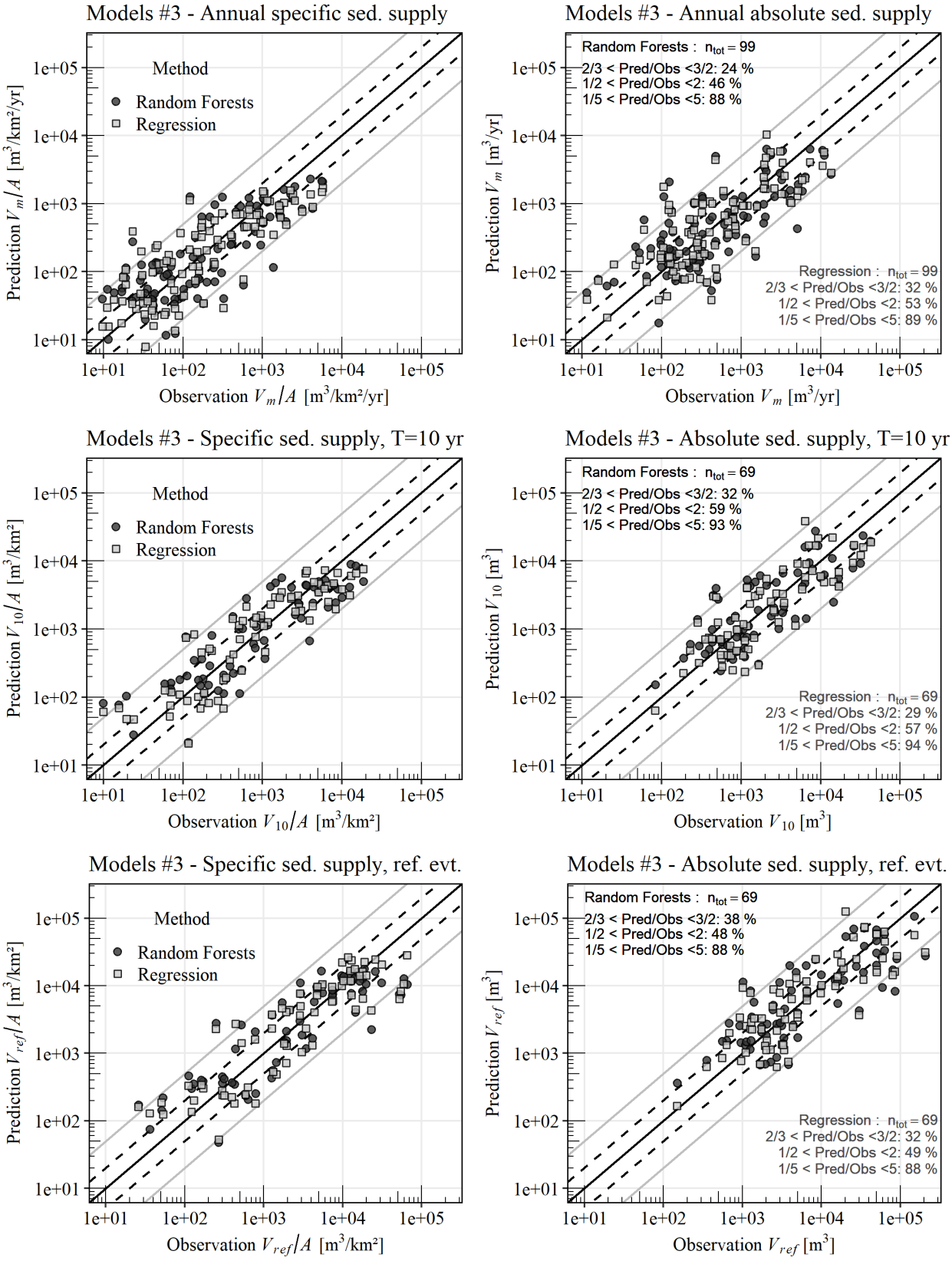


FIGURE 43 – Modèles #3 : Confrontation des valeurs prédites et observées de production sédimentaire moyenne annuelle (première ligne), décennale (seconde ligne) et de référence (dernière ligne) en valeur spécifique (colonne de gauche) et en valeur absolue (colonne de droite)

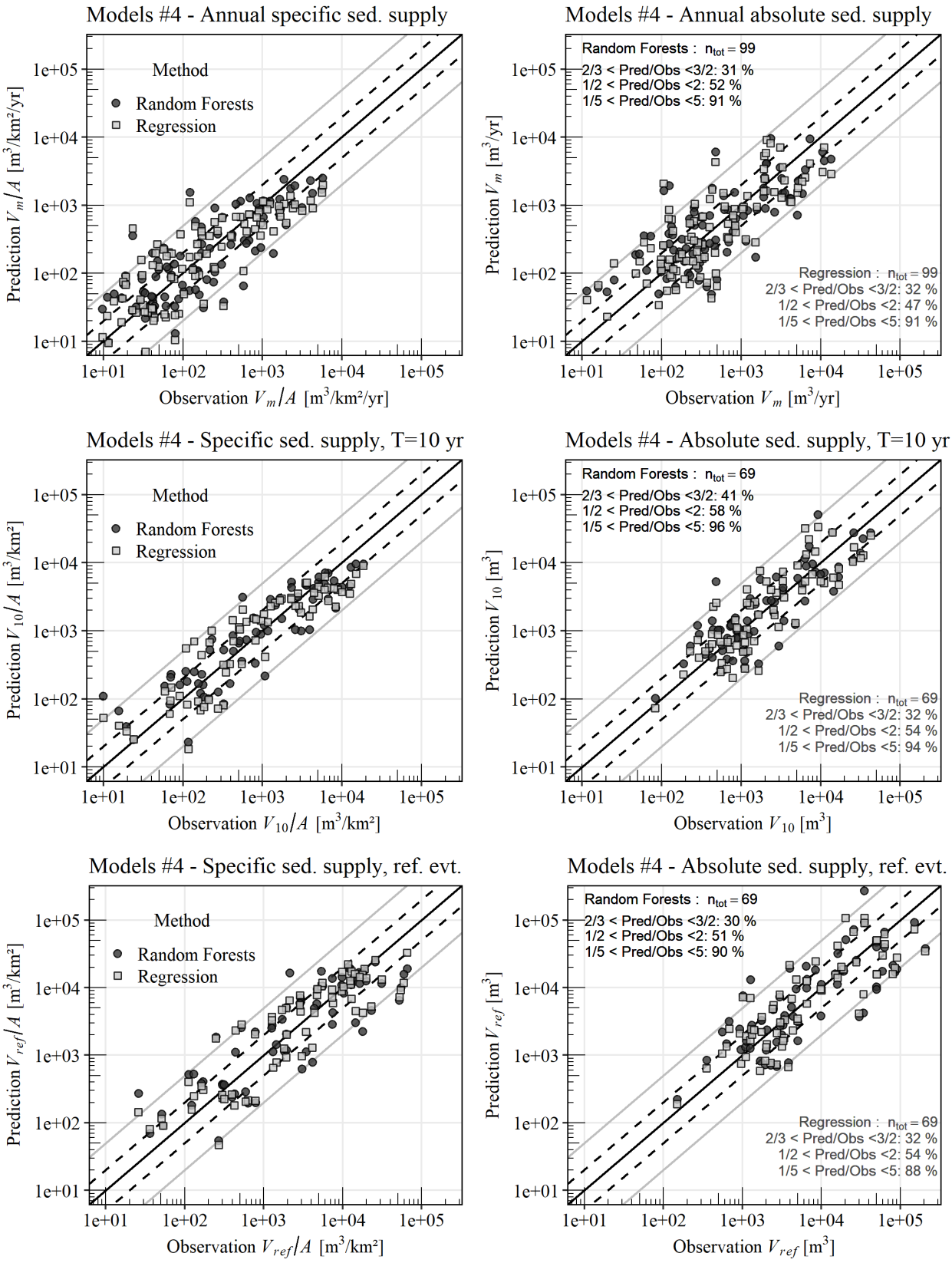


FIGURE 44 – Modèles #4 : Confrontation des valeurs prédites et observées de production sédimentaire moyenne annuelle (première ligne), décennale (seconde ligne) et de référence (dernière ligne) en valeur spécifique (colonne de gauche) et en valeur absolue (colonne de droite)

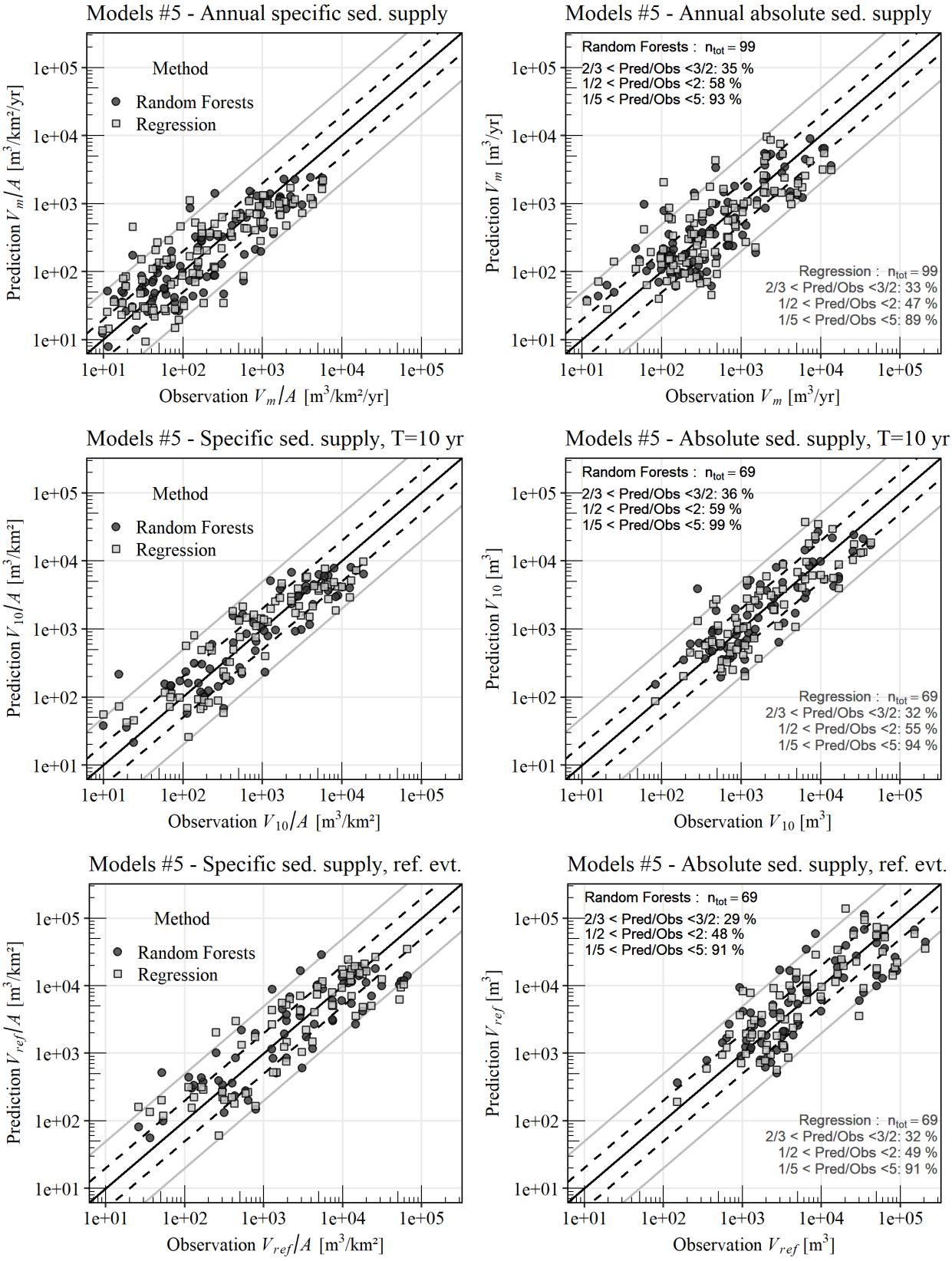


FIGURE 45 – Modèles #5 : Confrontation des valeurs prédites et observées de production sédimentaire moyenne annuelle (première ligne), décennale (seconde ligne) et de référence (dernière ligne) en valeur spécifique (colonne de gauche) et en valeur absolue (colonne de droite)

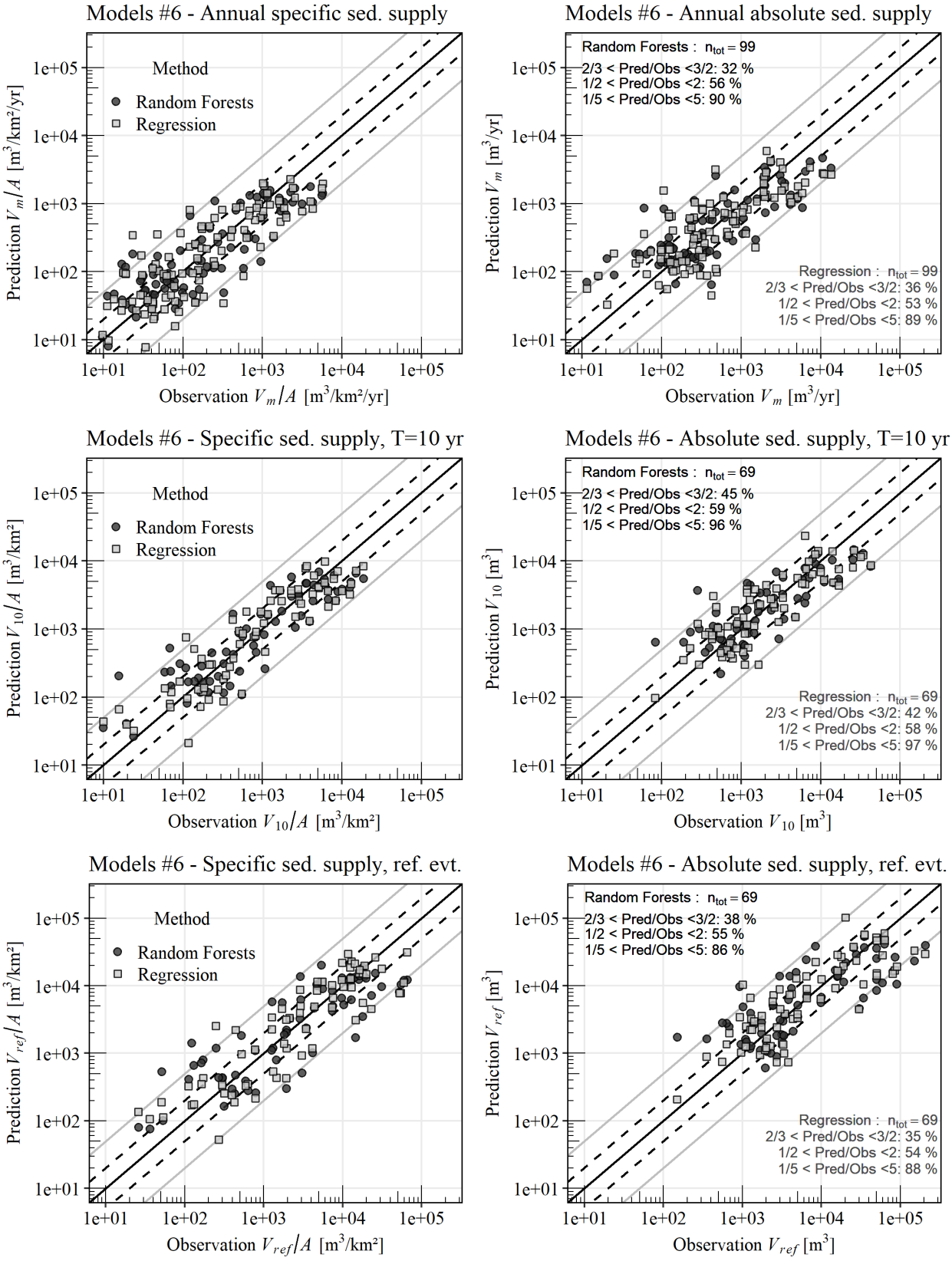


FIGURE 46 – Modèles #6 : Confrontation des valeurs prédites et observées de production sédimentaire moyenne annuelle (première ligne), décennale (seconde ligne) et de référence (dernière ligne) en valeur spécifique (colonne de gauche) et en valeur absolue (colonne de droite)

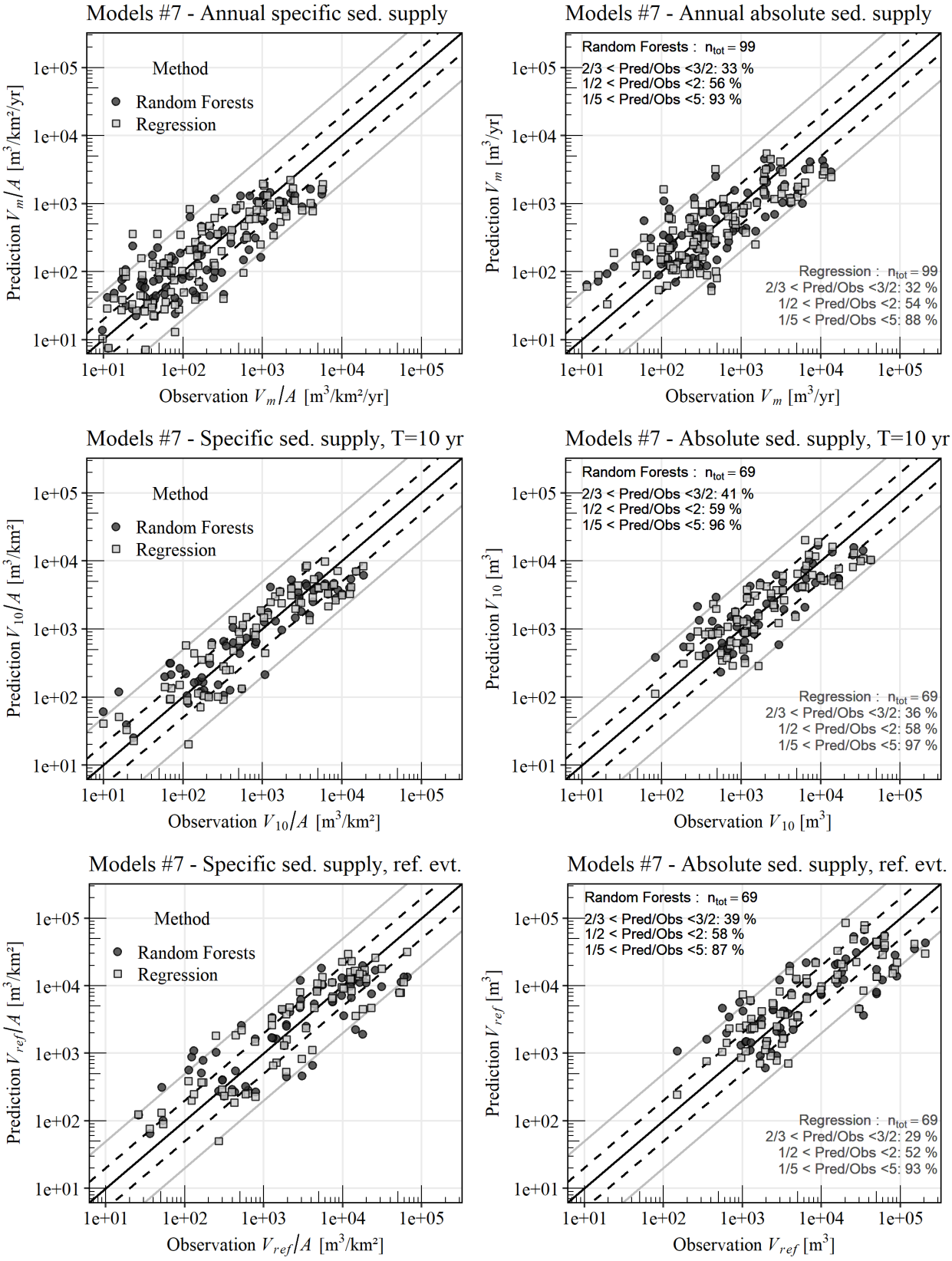
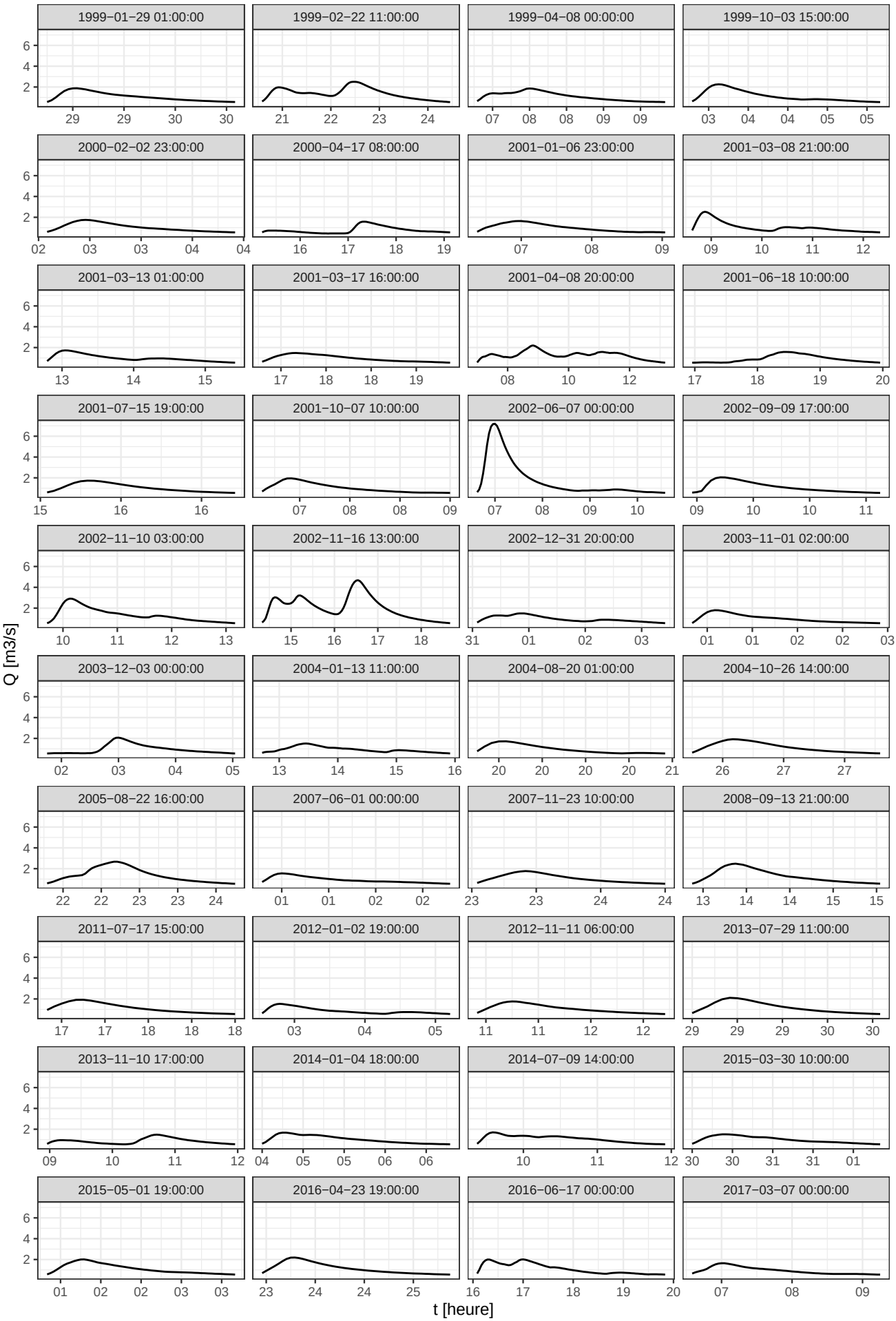
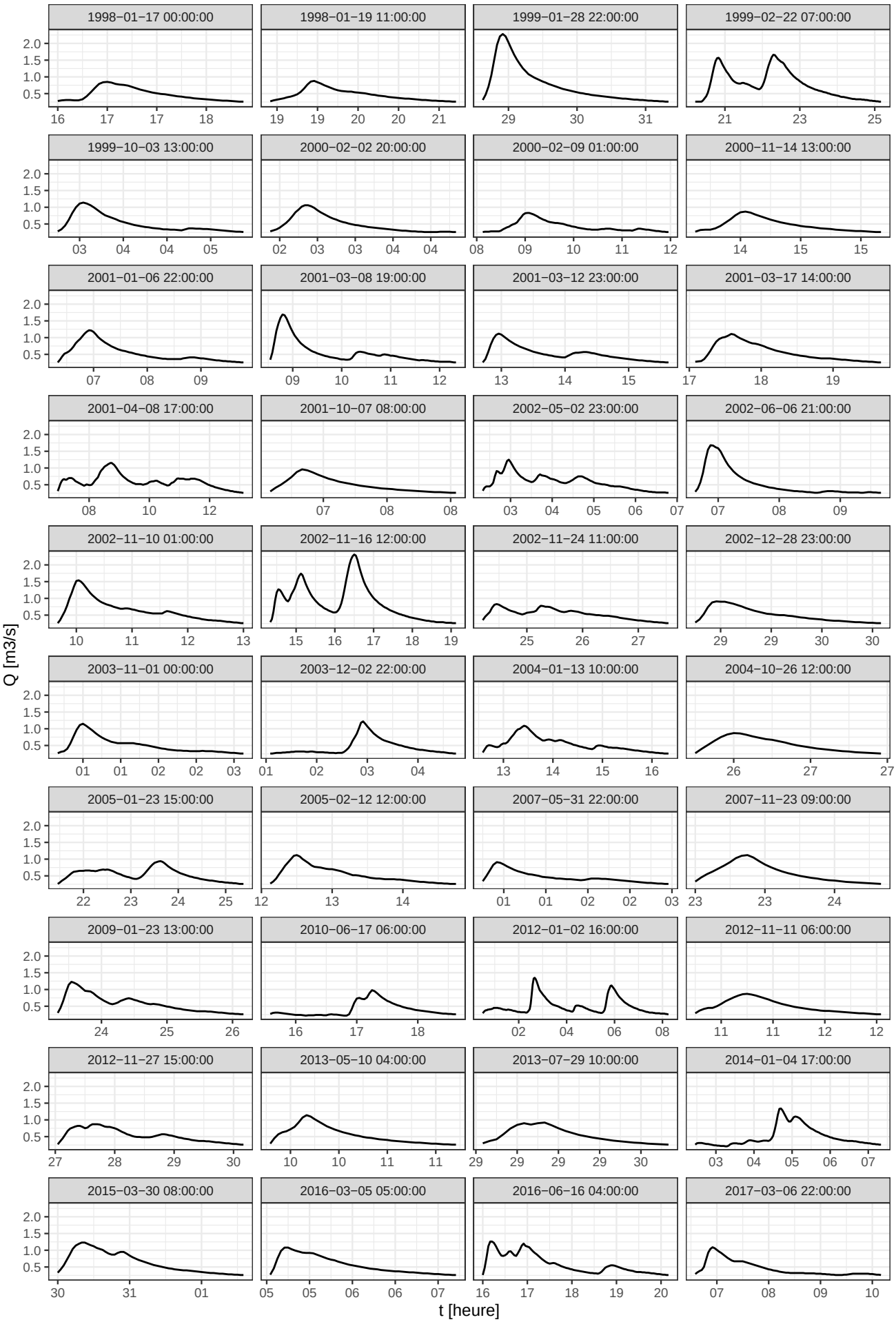


FIGURE 47 – Modèles #7 : Confrontation des valeurs prédites et observées de production sédimentaire moyenne annuelle (première ligne), décennale (seconde ligne) et de référence (dernière ligne) en valeur spécifique (colonne de gauche) et en valeur absolue (colonne de droite)

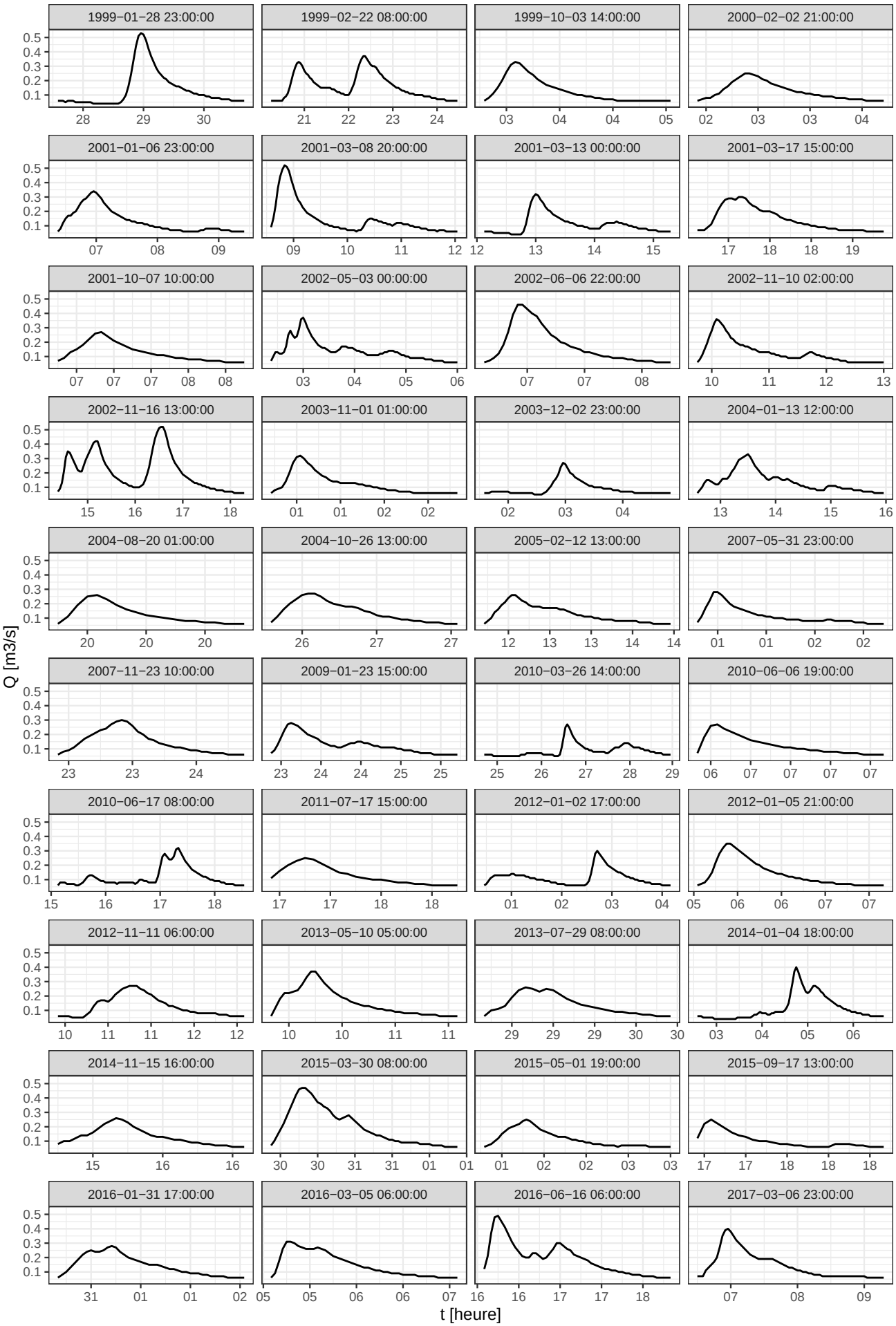
J Hydrogrammes des bassins versants METRO



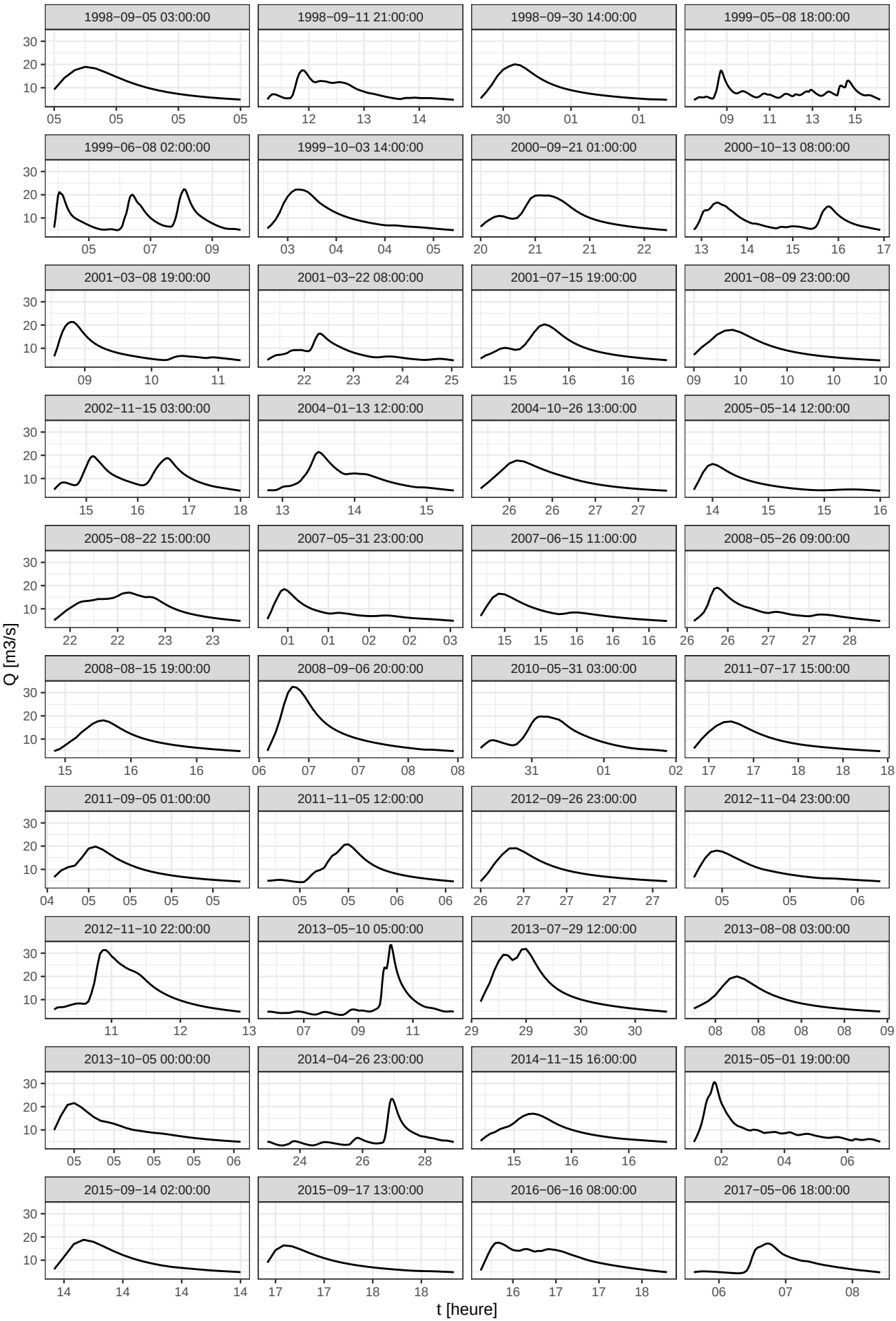
Modélisation pluie−débit MORDOR (projet HYDRODEMO): Bassin versant METRO1−Le Lanfrey



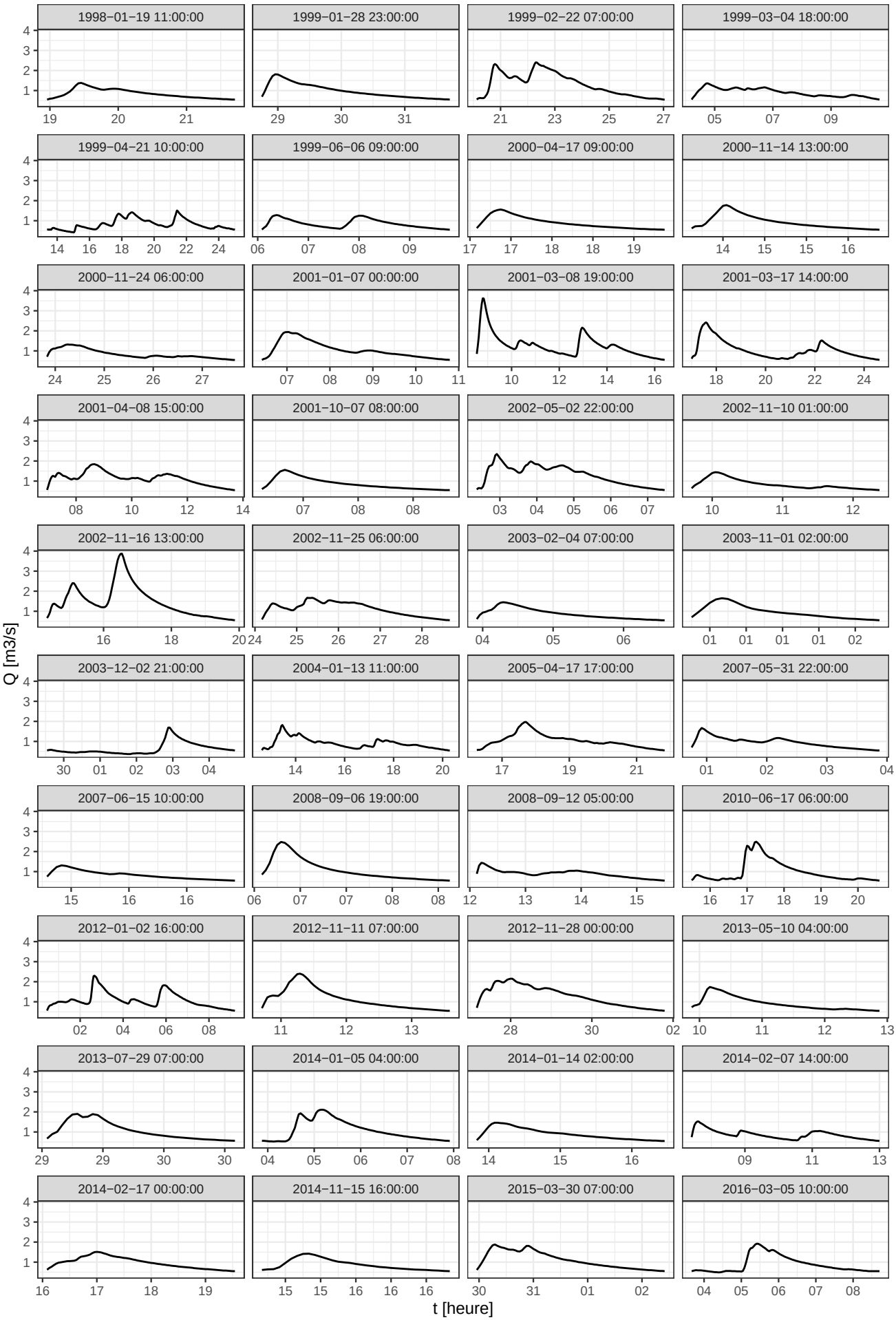
Modélisation pluie−débit MORDOR (projet HYDRODEMO): Bassin versant METRO2−Le Charmeyran



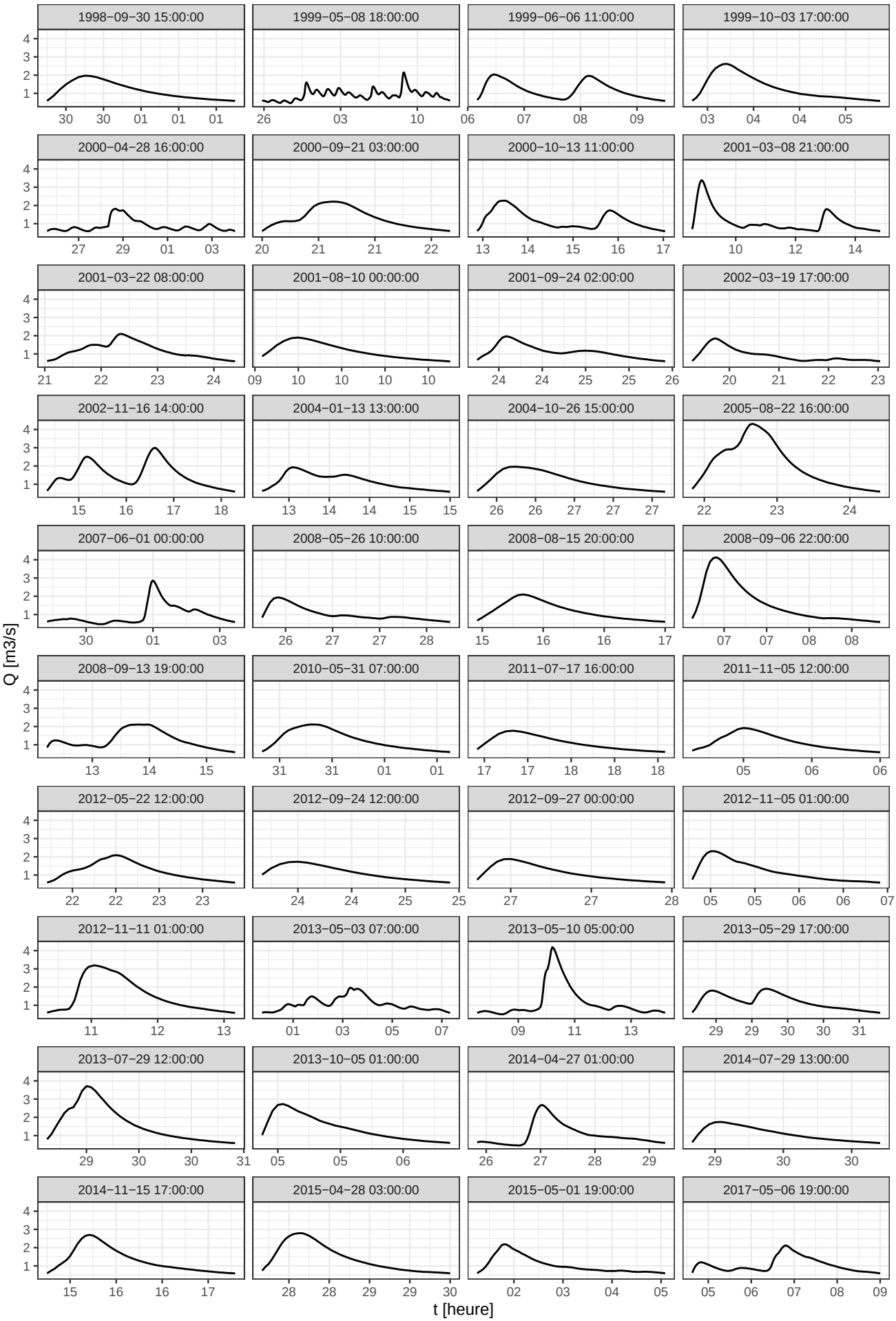
Modélisation pluie−débit MORDOR (projet HYDRODEMO): Bassin versant METRO3−Les Jaillères



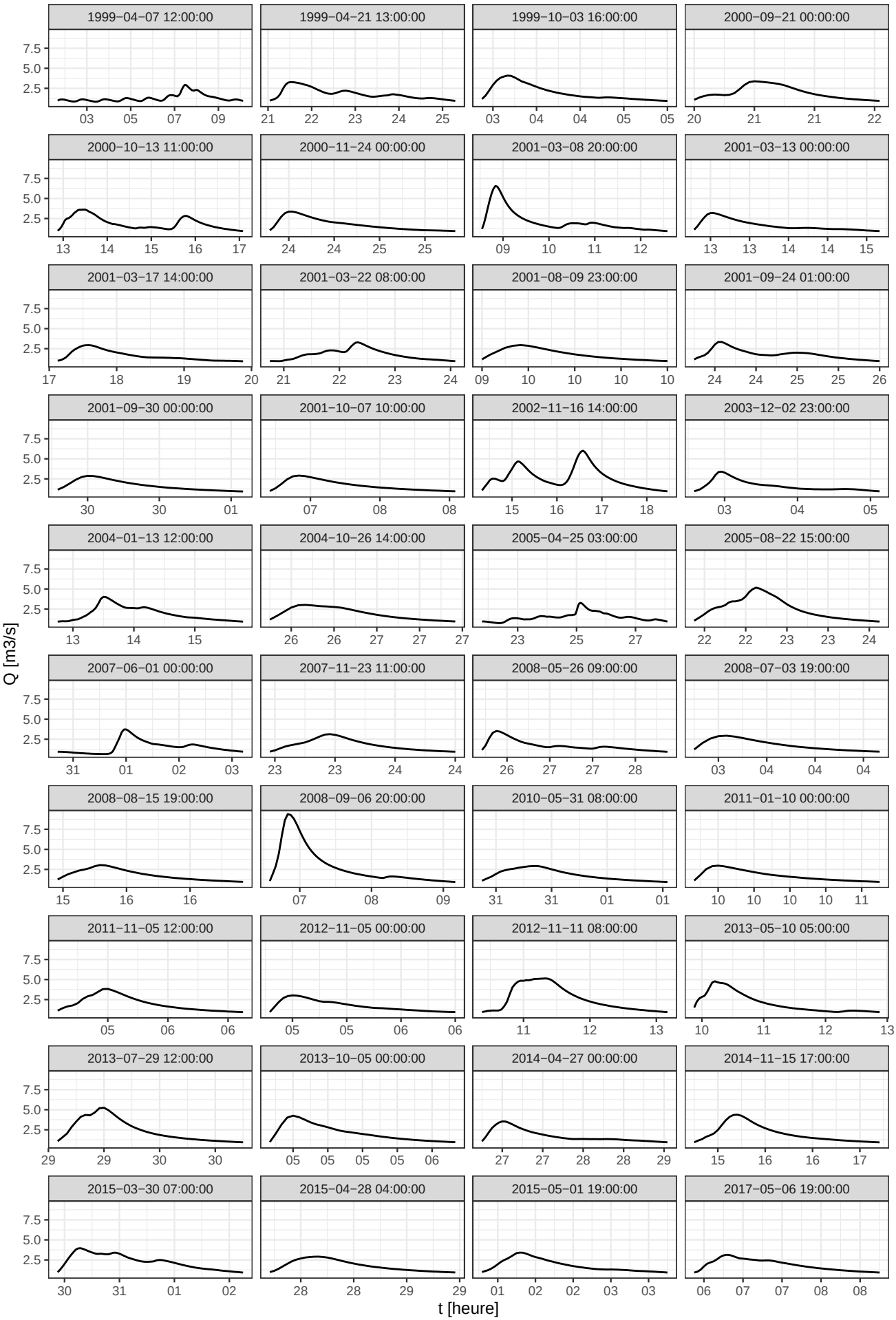
Modélisation pluie−débit MORDOR (projet HYDRODEMO): Bassin versant METRO4−Le Domeynon



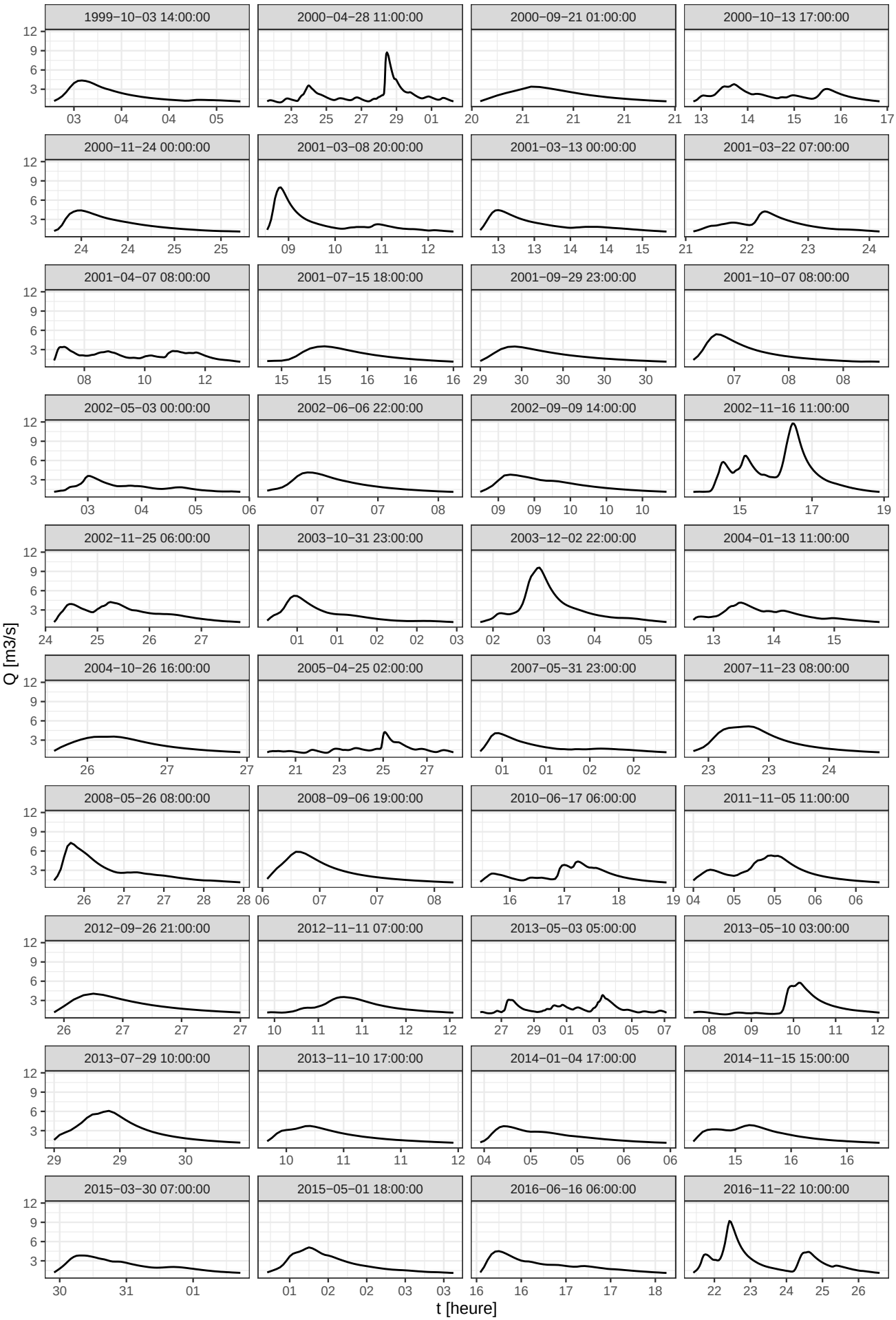
Modélisation pluie−débit MORDOR (projet HYDRODEMO): Bassin versant METRO5−Le Verderet



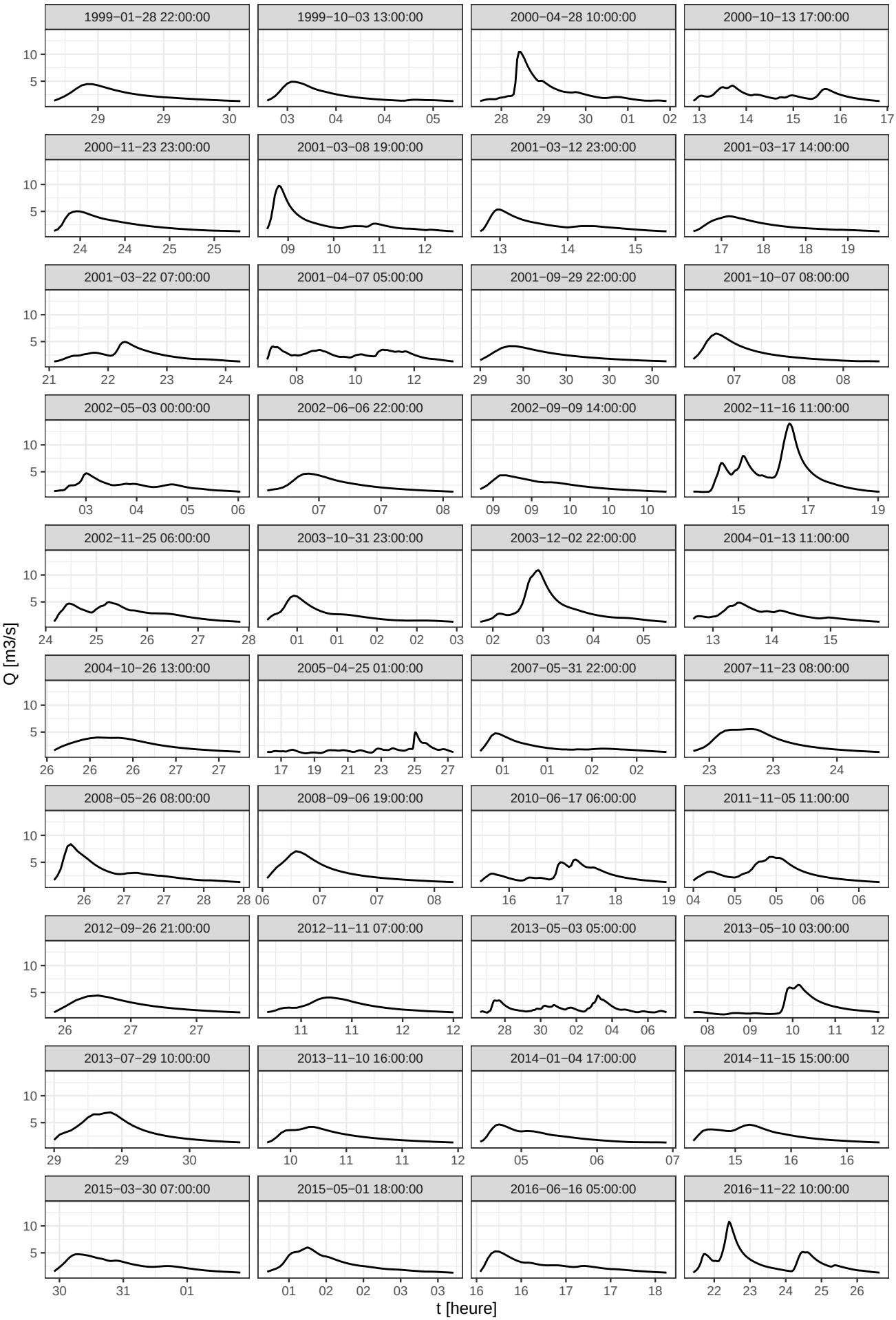
Modélisation pluie−débit MORDOR (projet HYDRODEMO): Bassin versant METRO6−Le Vernon



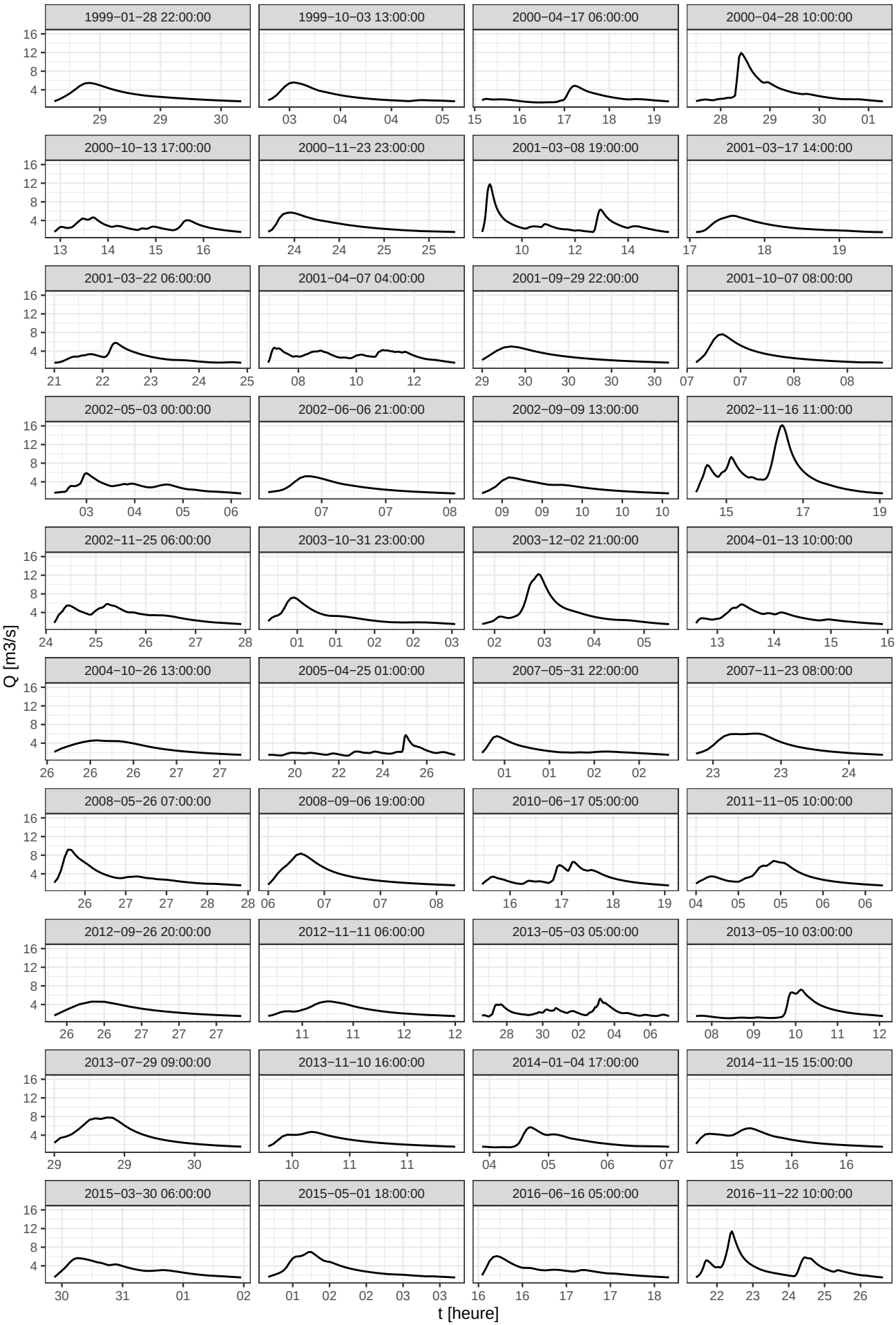
Modélisation pluie−débit MORDOR (projet HYDRODEMO): Bassin versant METRO7−Le Prémol



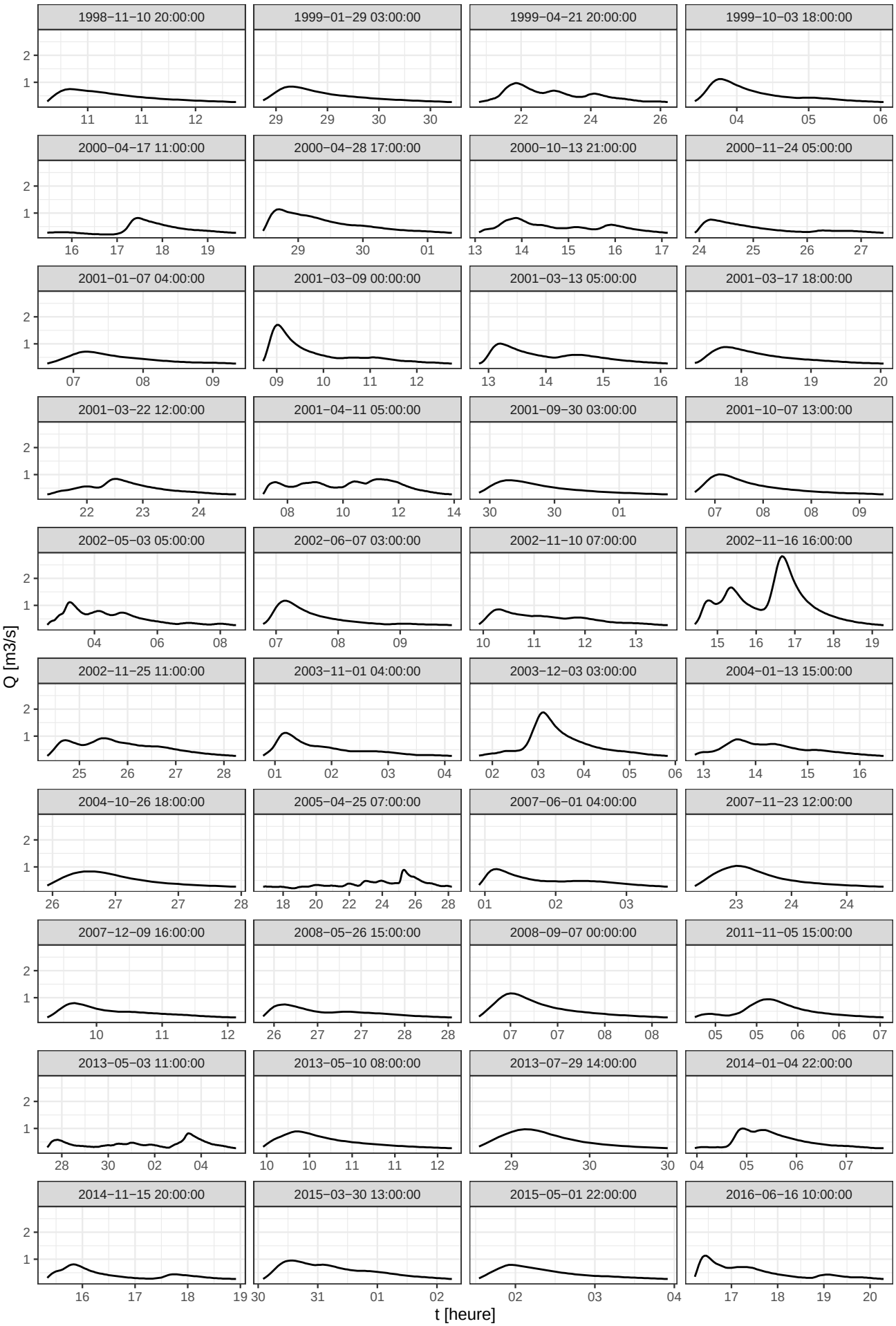
Modélisation pluie−débit MORDOR (projet HYDRODEMO): Bassin versant METRO8a−Le Lavanchon (Am.)



Modélisation pluie−débit MORDOR (projet HYDRODEMO): Bassin versant METRO8b−Le Lavanchon (Int.)



Modélisation pluie−débit MORDOR (projet HYDRODEMO): Bassin versant METRO8c−Le Lavanchon (Av.)



Modélisation pluie−débit MORDOR (projet HYDRODEMO): Bassin versant METRO9−Le Rif Talon

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

INRAE
la science pour la vie, l'humain, la terre