



HAL
open science

Hydrologie et hydraulique torrentielle, étude d'un cas pratique : la Roize

E. Lamand, Guillaume G. Piton, A. Recking

► **To cite this version:**

E. Lamand, Guillaume G. Piton, A. Recking. Hydrologie et hydraulique torrentielle, étude d'un cas pratique: la Roize. irstea. 2017, pp.89. hal-02605416

HAL Id: hal-02605416

<https://hal.inrae.fr/hal-02605416v1>

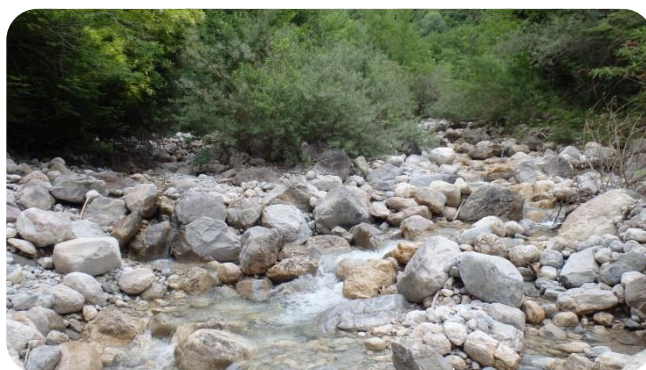
Submitted on 16 May 2020

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.

Hydrologie et hydraulique torrentielle, étude d'un cas pratique: la Roize

ANALYSE HISTORIQUE, GEOMORPHOLOGIQUE,
HYDROLOGIQUE, HYDRAULIQUE ET DE LA DYNAMIQUE
SEDIMENTAIRE



18 JANVIER 2017

**ELIE LAMAND, GUILLAUME PITON
ET ALAIN RECKING**

2 Rue de la Papeterie,
38402 Saint-Martin-d'Hères

Structure Fédérative



Vulnérabilité des
Ouvrages aux Risques
(VOR)
Structure Fédérative de
recherche



Institut national
de recherche en sciences
et technologies
pour l'environnement
et l'agriculture

1 Avant propos

Ce rapport est basé sur le travail de fin d'étude de Elie LAMAND (Ingénieur ENSE³-promo 2015).

Le travail ayant été repris partiellement pour ses encadrants (Guillaume PITON et Alain RECKING).

Tableau 1 : Etat des versions

Version	Date d'édition	Commentaire	Rédigé par	Vérifié par
A	1/9/2015	Edition initiale	Elie LAMAND & Guillaume PITON	Alain RECKING
B	27/6/2016	Reprise de l'hydrologie, transport solide, complément sur partie monitoring.	Guillaume PITON	Alain RECKING
C	18/01/2017	Mise à jour des estimations de transport solide suivant les données fournies par l'Association Syndical Pique Pierre à Roize	Guillaume PITON	Alain RECKING

Le travail réalisé dans le cadre de la rédaction de ce rapport a été financé par l'IRSTEA et par la structure fédérative de recherche **VOR (Vulnérabilité des Ouvrages aux Risques)** via le projet " *Le transit de la charge de fond dans les ouvrages torrentiels : quelles interactions entre barrages et flux sédimentaires ?*" du groupement EDYTEM (UMR 5204 CNRS) - IRSTEA centre de Grenoble, UR ETGR de l'appel à projets 2015.

2 Contenu

1	Avant propos	2
2	Contenu	3
	Table des figures et tableaux	5
1	Introduction	7
1.1	Contexte général	7
1.2	Spécificités de l'hydraulique torrentielle	8
1.2.1	Torrents ou rivières ?	8
1.2.2	Etude des torrents des Pré-Alpes du Nord	8
2	Analyse géomorphologique du bassin versant de la Roize	9
2.1	Situation géographique et relief	9
2.1.1	Description générale	9
2.1.2	Morphométrie	11
2.2	Géologie du bassin versant	12
2.3	Zones de productions sédimentaire de la Roize	14
2.4	Géomorphologie du lit	15
2.5	Granulométrie	20
2.6	Analyse des pentes	21
2.6.1	Données littérature	21
2.7	Occupation des sols	22
2.8	Synthèse sur la géomorphologie	24
3	Analyse historique	25
3.1	Cartes anciennes	25
3.2	Synthèse des événements majeurs recensés depuis 1690	27
3.3	Crue de 1971	30
3.3.1	Informations issues de la littérature	30
3.3.2	Analyse des photos aériennes	31
3.4	Analyse historiques des principaux ouvrages	33
3.4.1	Les ouvrages de Scipion Gras (1851)	33
3.4.2	Données d'archives complémentaires	35
3.4.3	La plage de dépôt (1985)	36
3.4.4	Ouvrages de correction dans le haut bassin versant (Pinhas, 1987)	38
3.5	Synthèse de l'étude historique	38
4	Analyse hydrologique	39
4.1	Saisonnalité des crues historiques majeures	39
4.2	Analyse régionale des bassins versants torrentiels des massifs calcaires des Pré-Alpes du nord	39
4.2.1	Bassins versants étudiés	39
4.2.2	Analyse des débits sans corrélations avec les pluies	41
4.2.3	Analyse des pluies et mise en place d'un modèle	49
4.3	Application à la Roize	56
4.3.1	Données tirées des études antérieures	56
4.3.2	Analyse des pluies de la Roize	56
4.3.3	Estimation des débits classés	58

4.3.4	Estimation des hydrogrammes de crues	59
4.4	Variabilité interannuelle des débits	61
5	Analyse hydraulique	63
5.1	Hauteur de crue dans quelques sections caractéristiques	63
5.2	Courbe de tarage	64
5.2.1	Equations utilisées	64
5.2.2	Méthode d'"hydraulique simplifiée"	65
6	Etude du transport solide	66
6.1	Contexte sédimentaire et processus en jeux	66
6.2	Estimation du transport solide par site	67
6.2.1	Equations utilisées	67
6.2.2	Mise en œuvre pratique - approche annuelle moyenne	68
6.2.3	Approche événementielle	73
6.3	Synthèse sur la méthodologie	77
6.4	Nouvelle plage de dépôt	78
7	Susceptibilité aux laves torrentielles - Comparaison avec le torrent du Manival	78
8	Installation d'une caméra sur la plage de dépôt de la Roize	79
	<i>"Morpho-dynamique dans les plages de dépôt de Chartreuse</i>	<i>80</i>
9	Conclusion	81
10	Bibliographie	82
11	Annexes	84
11.1	Carte géologique	84
11.2	Description méthode SPEED	86
11.2.1	BASES THEORIQUES	86
11.2.2	REGIONALISATION	86
11.3	Zone de production du Manival	88
	Résumé du rapport	89
	Abstract	89

Table des figures et tableaux

Tableau 1 : Etat des versions	2
Figure 1 : Photos extraites du PPRN 2011 de Voreppe	7
Figure 2 : Localisation du bassin versant a) carte routière b) carte des massifs	9
Figure 3: Dérochoir principal de la Roize © (RTM38 2009)	9
Figure 4 : Vue 3D du bassin versant (en rouge).....	10
Figure 5 : Carte du bassin versant sur fond d'IGN	10
Tableau 2 : Morphométrie du bassin versant de la Roize.....	11
Figure 6 : Courbe hypsométrique calculée à partir du MNT pour le bassin versant total	12
Tableau 3 : Répartition de la surface en fonction de l'altitude	12
Figure 7 : Photo du haut bassin versant de la Roize depuis Roche Brune © M. Gidon(Gidon 2013)	12
Figure 8: Cartographie des zones actives d'érosion sur la Roize (RTM38 2009).....	14
Figure 9 : Faciès géomorphologiques de la Roize à partir des analyses de terrain	15
Figure 10 : a) branches du haut bassin versant de la Roize b) falaises du haut bassin versant c) ouvrages installés en contrebas des falaises d) verrou rocheux principal e) à l'aval du verrou rocheux	16
Figure 11 : a) rocher verrou 1 marquant l'entrée dans les gorges b) début des gorges	17
Figure 12 : a) haut bassin versant de la Petite Roize b) bourrelet de lave érodé dans la Petite Roize.....	17
Figure 13 : a) zones d'écoulement sur un affleurement rocheux b) faciès de cascade influencé par des blocs rarement mobiles	17
Figure 14 : faciès caractéristiques de la Roize supérieure : a) lit large, trace visible de transport solide, accumulation de bois morts b) dépôts probable de laves torrentielles c) rocher verrou 2 d) step-pool.....	18
Figure 15 : a) faciès caractéristique de la Roize en aval de la plage de dépôt b) faciès caractéristique de la Roizette, cours d'eau moins actif et plus envahi par la végétation c) plage de dépôt	18
Figure 16 : a) exutoire du bassin versant étudié b) chenal sur le cône de déjection	19
Figure 17 : Ouvrages en travers du lit de la Roize à Voreppe	19
Figure 18 : Courbe granulométrique relevée par les étudiants de l'IGA.....	20
Tableau 4 : Granulométrie de la Roize.....	20
Figure 19 : Profil en long de la Roize IGN 1/25000 (RTM38 2009).....	21
Figure 20 : Profil en long du canal (RTM38 2006).....	22
Figure 21 : Occupation des sols selon CORINE LAND COVER 2006.....	22
Figure 22 : Répartition de l'occupation des sols pour le bassin versant depuis l'exutoire	23
Figure 23 : Répartition de l'occupation des sols : a) pour le bassin versant de la Roizette b) bassin versant de la Roize supérieure	23
Figure 24 : Carte de Cassini (1768)	25
Figure 25 : Carte d'Etat-Major (1849).....	26
Tableau 5 : Synthèse des événements historiques majeurs liés à la Roize.....	27
Figure 26 : zoom sur les ruisseaux de Pierrefit à gauche et du Buisseret à droite a) 1970 b) 1973	31
Figure 27 : zoom sur la confluence, photos aériennes de a) 1970 b) 1973 c) 2000.....	32
Figure 28 : zoom sur la partie aval depuis la confluence jusqu'au pont de Gigot, a) 1970 b) 1973 c) 2000	32
Figure 29 : Schéma type d'un ouvrage de Scipion Gras (Culmann 1865)	33
Figure 30 : Restes probables du barrage 1 de 1851	34
Figure 31: Schéma des ouvrages conçu par Scipion Gras pour réguler le transport solide sur la Roize: a) Coupe en long (Culmann 1865), b) vue d'aval (Culmann 1865) et c) bloc équipé d'une épingle métallique retrouvé en 2015 entre la confluence avec Roizette et la PDD	34
Figure 32 : Plan général de 1867 de « Réglementation d'office des prises d'eau d'arrosage » : canal de dérivation de la Roize au niveau du vieux village de Voreppe.....	35
Figure 33 : « Plan des abords du barrage en amont de Voreppe et de la prise d'eau du canal des usines à ciment » de 1883, dont on peut observer les restes en amont de la confluence Roize – Roizette.....	35
Figure 34 Plan non daté (post 1895) du confortement de la berge rive droite de la Roize en amont du Pont (du vieux village ?)	35
Tableau 6 : Caractéristiques de la plage de dépôt	36
Figure 35 : Plage de dépôt : a) vue depuis l'aval du bassin b) vue depuis l'amont du bassin en avril 2015	36
Figure 36 : Plage de dépôt : a) vue d'aval du barrage terminal durant la crue de décembre 1991 (© RTM 38) b) vue d'amont du barrage avant le curage du 20/08/2013 (© RTM 38).....	36
Figure 37 : Historique des curages et crues.....	37
Figure 38 : Correction mise en place a) pour le torrent de Charminelle et b) pour la petite Roize et la Roize (Pinhas 1987)	38
Tableau 7 : saisonnalité des crues relevées par le BD RTM	39
Figure 39 : Diagramme des crues majeures rencontrées suivant la saison	39
Figure 40 : Cartographie des bassins versants et postes pluviométriques étudiés	40
Tableau 8 : liste des stations hydrologiques étudiées	41
Figure 41: Graphique de Gumbel des débits moyens journaliers (Qjm) , maximum annuels instantanés(Qix), N maximum moyens journaliers (Qjmx) de la station a) de la Bornette à Lathuille et b) de la Vence à Proveysieux.....	42
Figure 42: Débits moyens journaliers sur graphique de Gumbel	43
Figure 43 : Courbe des débits classés journaliers (Qjm)	44
Figure 44 : Courbe des débits classés adimensionnalisés par $S_0^{0.75}$	45
Figure 45 : Courbes des débits classés adimensionnalisés par $S\alpha$ pour les "Petits" bassins versants.....	46
Figure 46: Courbe des débits classés pseudo-spécifiques du groupe des petits cours d'eau sur un axe linéaire et logarithmique (à gauche courbe complète, à droite représentation log pour les fréquences >50%)	47
Tableau 9: Débit pseudo spécifiques $Q_{sp}=Q/S_{BV}^{0.75}$ classés sur l'échantillon des petits cours d'eau	47
Figure 47 Graphique de Gumbel de débits pseudo-spécifiques. Le gradient naturel de valeurs lié à la superficie du bassin versant s'est effacé. Le Méaudret se dégage par ses valeurs très basses. Le Guiers Mort et le Guiers Vif par leurs valeurs fortes. Les cours de la Laysse, du Chéran et du Sierroz semble cohérent avec les valeurs tirées des petits cours d'eau ($S_{BV}<60 \text{ km}^2$)	48
Tableau 10 : liste des pluviomètres étudiés	49
Figure 48 : Graphique de Gumbel pour les stations a) de la Bornette à Lathuille et b) de la Vence à Proveysieux	50
Tableau 11 : valeurs de PT et $Q_{jm}SPEEDT$ pour toutes les stations.....	51
Figure 49 : Modèles des pluies-débits.....	52
Tableau 12: Valeurs $P_0 = P_{10ANS} - Q_{SPEED,10ANS}$	53
Figure 50 Analyse critique du coefficient de régression de la droite $Q_{SPEED} = f(P)$	54
Figure 51: Comparaison entre 4 valeurs caractéristiques des débits classés et la pluie journalière de temps de retour 2 mois.....	54
Figure 52: Définition empirique des valeurs équivalentes entre U variable réduite de Gumbel et f fréquence annuelle de non dépassement.....	55
Tableau 13 : P(T) estimés par Pinhas (1983) pour les plus proches stations	56

Figure 53 : Ajustement sur graphique de Gumbel des pluviomètres aux alentours du bassin versant de la Roize, a) tendance avec cassure b) tendance sans cassure.....	57
Tableau 14 : P(T) [mm] pour la Roize	58
Tableau 15 : Valeurs des débits classés pour la Roize	58
Tableau 16 : Débits réduits de points [mm] selon analyse SPEED pour la Roize selon les différents modèles hydrologiques (§4.2.3.6) et les différents ajustements de valeurs de pluies (Tableau 14)	59
Tableau 17 : Débits de points [m ³ /s] selon analyse SPEED pour la Roize selon les différents modèles hydrologiques (§4.2.3.6) et les différents ajustements de valeurs de pluies (Tableau 14).....	59
Tableau 18: durées caractéristiques des crues de la Roize supérieure RTM38 (2006)	60
Figure 54: Exemples d'hydrogrammes de crues	60
Figure 55: série temporelle des débits moyens journaliers de la Vence à Proveysieux : Septembre 1968 à Avril 1993	61
Figure 56 : Variabilité interannuelle des débits classés de la Vence	61
Tableau 19 : Coefficients de correction à appliquer à la courbe des débits classés pour représenter une année sèche ou humide de temps de retour 10 ans, calculés à partir des données de la Vence	62
Figure 57 : Courbes des débits pseudo-spécifiques classés : a) échantillon des stations régionales retenues dans l'analyse et valeur moyenne régionale et b) variabilité interannuelle approchées par les coefficients de correction estimés à travers l'hydrologie de la Vence	62
Tableau 20 : Surfaces drainantes respectives des GR et autres paramètres globaux	63
Figure 58 : a) profil en travers 3, site GRc et b) Courbe des paramètres GRc_3.....	63
Figure 59 : a) Exemple de courbe de tarage et autres paramètres et b) courbe des débits classés pour lesquels sont interpolées les valeurs affichées en (a)	64
Tableau 21: Largeur au miroir pour h=75cm	65
Figure 60 : Illustration de différents scénarios de contrôle du débit solide dans les torrents de montagne, en gris clair les sédiments transportés régulièrement et en gris foncé, les éléments du lit pavé, rarement transportés (tiré de Piton and Recking 2017)	66
Figure 61 : a) Valeurs du paramètre de Shield estimé pour la granulométrie des bancs ou du lit évoluant en fonction du débit liquide et b) débit solide apparent en fonction du débit liquide pour le PT GRc_3. Les points représentent les valeurs caractéristiques de la courbe des débits classés	68
Figure 62 : a) courbe des débits classés solides et b) cumul annuel transporté et dérivé de la courbe indiquant les débits les plus efficaces en terme de transport (produit de probabilité d'occurrence et d'intensité de transport)	69
Tableau 22 : Volumes solides transportés annuellement – hydraulique détaillée	69
Tableau 23: Volumes solides transportés annuellement – hydraulique simplifiée.....	71
Figure 63 : Volumes annuels transportés selon deux hypothèses de calcul : à gauche le D ₈₄ mesuré sur le lit et à droite, le D ₈₄ mesuré sur le lit pour les calculs de la hauteur d'eau et le D ₈₄ mesuré sur le banc de la plage de dépôt (diamètre réellement transporté) pour la formule de transport solide et le cisaillement adimensionnel (paramètre de Shields), ceci pour les 3 largeurs de lit mesurées sur le tronçon de référence et pour 3 courbes des débits classées (année sèche, moyenne et humide). Les valeurs moyennes de transport annuel et l'incertitude sur ces derniers (estimée à travers la variabilité interannuelle) sont représentés par les bandes vertes. On constate que les estimations utilisant le concept du "travelling bedload" (dissociation des deux diamètres) permet d'obtenir des estimations du bon ordre de grandeur (une telle précision est même surprenante) alors que les estimations utilisant la procédure de base (une seule valeur de D ₈₄) donnent des valeurs de transport des quelques dizaines de m ³ /an, cohérente seulement avec les années où la Roize est considérée comme dormante.....	72
Figure 64: volume annuel transporté estimé par les formules de la littérature	73
Tableau 24: volume transportés estimé empiriquement.....	74
Figure 65 Comparaison de volume transporté dans la Roize supérieure selon les formules de la littérature pour les crues de temps de retour: a) 5 ans, b) 10 ans et c) 100 ans	75
Figure 66: Volume transporté estimé au droit de chaque site pour les crues de temps de retour a) 10 ans et b) 100 ans	76
Figure 67 : Comparaison des zones de production primaires des torrents du Manival et de la Roize.....	78
Figure 68 : a) Plan du dispositif installé sur la Roize b) photo prise par la caméra (Fontaine 2015) (*En violet : le géophone, en rouge : le conditionneur, en bleu : la station imagerie, en jaune : la câble de transmission).....	79
Figure 69 : a) panneau solaire et caméra installés sur le barrage de la PDD b) géophone installé à l'amont	79
Figure 70 – Images prises depuis les barrages de fermeture des plages de dépôt du Manival (a-c) et de la Roize (d-g). Illustration des changements morphologiques et des cycles naturels d'écoulements mono- et multi-chenalisés dans les deux cas, à l'échelle d'une crue dans le Manival et d'une année dans la Roize, à la fourniture sédimentaire plus faible.".....	80
Figure 70: carte géologique détaillée du bassin versant de la Roize, issue des données du Cemagref (légende page suivante)	84
Figure 71: Cartographie des zones actives d'érosion sur le Manival (RTM38 2009).....	88

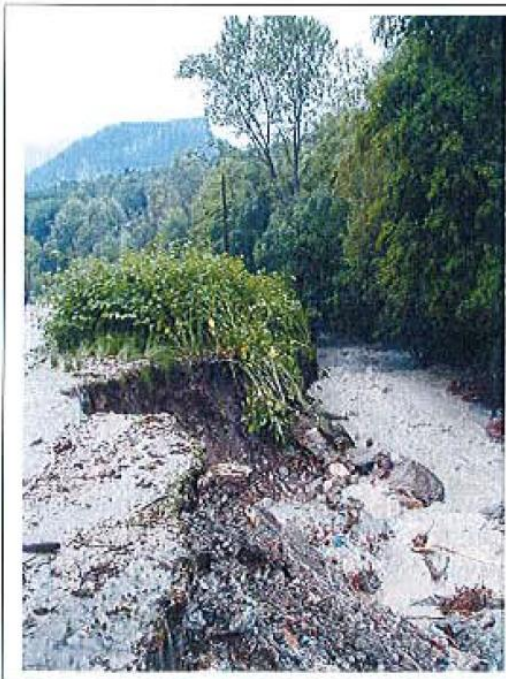
1 Introduction

1.1 Contexte général

Un des objectifs de la recherche en hydraulique torrentielle est l'étude des phénomènes mis en jeu au sein des torrents afin de prévenir les dégâts qu'ils pourraient causer ; ceci à l'aide d'ouvrages de correction torrentielle et de reboisement ou via des mesures non structurales (cartographie des risques, plan d'urbanisme adapté, etc.). La dangerosité d'une crue torrentielle en zone de montagne est due à la combinaison de plusieurs facteurs tels que la présence de constructions humaines, un débit de rivière important, et parfois un transport de sédiments et flottants aggravant les débordements du torrent hors de son lit.

Le transport solide dépend lui-même de plusieurs phénomènes. Le relief du bassin versant, sa géologie, l'occupation de son sol ainsi que la pluviométrie et les conditions climatiques locales jouent des rôles prépondérants.

La Roize est un des torrents les plus importants du massif de la Chartreuse. Elle a engendré des crues à de nombreuses reprises (e.g. Fig. 1) et le transport de matériaux a souvent eu un rôle majeur dans les dégâts causés aux infrastructures. Elle représente de ce fait un cas intéressant. Son étude nous permettra d'approfondir et de mettre en pratique certaines méthodes récentes utilisées en hydraulique torrentielle.



Erosion de berge en rive gauche du torrent de la Roize, à l'amont du pont de Gigot suite à la crue de juillet 1971. la route et la culée du pont en rive gauche ont été totalement emportés.

source : COREPHA

Erosion de berge en rive gauche du torrent de la Roize, à l'amont du pont de Gigot suite à la crue de juin 2002.

source : mairie de Voreppe

Figure 1 : Photos extraites du PPRN 2011 de Voreppe

1.2 Spécificités de l'hydraulique torrentielle

1.2.1 Torrents ou rivières ?

Un torrent est un cours d'eau proche des sources primaires de production sédimentaire (Recking et al. 2012, Liebault et al. 2013). Son fonctionnement peut être très influencé par les processus de versants (avalanches, glissements de terrains, chutes de blocs, etc.). Il est généralement caractérisé par :

- Une hydrologie fortement variable induisant une hydraulique très transitoire : le débit d'un torrent est parfois nul pendant des périodes sèches et les crues peuvent être très subites ; le niveau d'eau pouvant passer de quelques centimètres à plusieurs mètres en une durée courte, de l'ordre de quelques minutes à quelques heures ;
- Une capacité à transporter des volumes sédimentaires très importants par comparaison avec la faiblesse du débit moyen, la taille du bassin versant, etc.

On distingue un ruisseau d'un torrent en particulier sur le deuxième point. Un ruisseau présente peu d'activité morphologique, c'est-à-dire de transport solide. C'est en particulier leur pente qui permet aux torrents de transporter de tels volumes de sédiments : c'est le « moteur » du transport solide. On considère généralement qu'un torrent a une pente supérieure ou égale à 6%, les plus grands torrents pouvant avoir des pentes descendant jusqu'à 2% dans les parties basses de leurs cônes de déjection (Lefort 1996). On retrouve donc des torrents spécifiquement dans les zones de montagnes.

1.2.2 Etude des torrents des Pré-Alpes du Nord

Les Pré-Alpes du Nord sont constitués des massifs du Vercors, de la Chartreuse, des Bauges, des Bornes, des Aravis, du Faucigny et du Chablais. Ils constituent, après la plaine du Rhône, la première barrière montagneuse aux flux d'ouest qui atteignent l'arc alpin. Ces zones majoritairement calcaires présentent un certain nombre de torrents qui menacent plus ou moins fortement des zones habitées.

L'hydrologie, l'hydraulique et la dynamique sédimentaire de ces relativement petits cours d'eau sont généralement mal connues. De plus elles diffèrent partiellement de celles des torrents des Alpes internes de par la géologie, le relief ainsi que les régimes climatiques.

Le site du Manival (Saint Nazaire les Eymes – 38) constitue un observatoire de la dynamique sédimentaire d'un torrent à lave torrentielles. IRSTEA réalise des observations sur celui-ci depuis de nombreuses années (Veyrat-Charvillon and Meunier 2006, Lopez Saez et al. 2011, Theule et al. 2012, Bel et al. 2014a, 2014b, Bel 2016). Dans le cadre de la présente étude, un dispositif d'observation du remplissage de la plage de dépôt du Manival a été mis en place. Le torrent du Manival peut toutefois être caractérisé comme étant représentatif d'un torrent à lave torrentielle, à la production sédimentaire particulièrement active. Un certain nombre de torrents des Pré-Alpes du Nord ne présentent pas une telle propension à transporter des laves torrentielles jusqu'à leur cône de déjection. Les crues de ces torrents ont alors tendance à transporter leurs sédiments sous forme de charriage. Afin de compléter et de confronter les observations réalisées sur le Manival, le torrent de la Roize à Voreppe a aussi été équipé d'une caméra d'observation du remplissage de la plage de dépôt. Ce torrent était référencé comme étant un torrent à charriage au droit du cône de déjection tout en présentant une configuration sensiblement comparable à celle du Manival : torrent de Chartreuse au cône de déjection bien développé et alimenté par un dérochoir très actif (falaise calcaire en érosion). Afin de mieux comprendre les observations réalisées dans la partie basse du torrent au droit de la plage de dépôt, il a été décidé de mener une analyse complète du fonctionnement de ce torrent. Cette étude doit permettre :

- De mieux comprendre le fonctionnement et les spécificités de ce torrent en particulier,
- De tenter d'appliquer des méthodes d'estimation de l'hydrologie, de l'hydraulique et du transport solide, de les confronter avec les données existantes et d'en tirer des enseignements sur les applications de ces méthodes dans ces cours d'eau de montagne.

2 Analyse géomorphologique du bassin versant de la Roize

2.1 Situation géographique et relief

Le relief est un des facteurs clé dans l'étude d'un torrent puisque le facteur pente régit fortement l'intensité du transport sédimentaire.

2.1.1 Description générale

La Roize (anciennement appelée Roise) est un torrent situé au sud-ouest du massif de la Chartreuse (dans les Pré-Alpes du Nord), débouchant dans l'Isère. Elle est située sur les communes de Voreppe et de Pommier-la-placette (Figure 2).

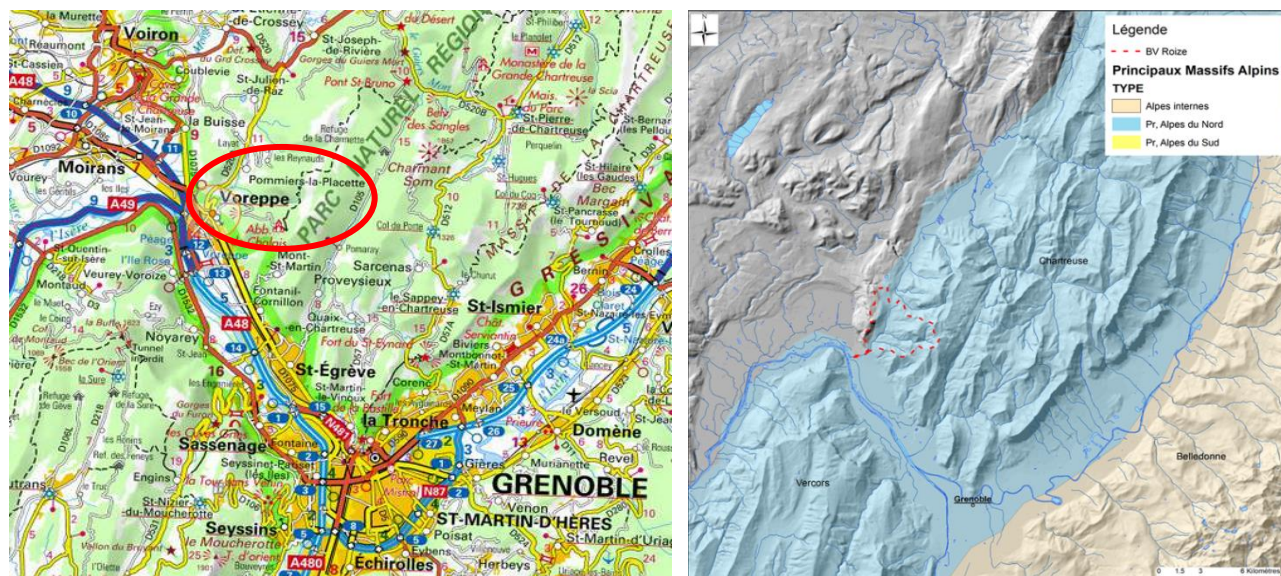


Figure 2 : Localisation du bassin versant a) carte routière b) carte des massifs

Son bassin versant est orienté Ouest/Nord-Ouest et est délimité à l'ouest par le sommet de Roche Brune, au nord par le col de la Placette, à l'est par les Rochers de Lorzier et de Chalves et au sud par l'aiguille de Chalais. Le haut bassin versant de la Roize présente un dérochoir (falaise productrice de matériaux détritiques – Fig. 3) très visible depuis la vallée de l'Isère en arrivant sur Voreppe.

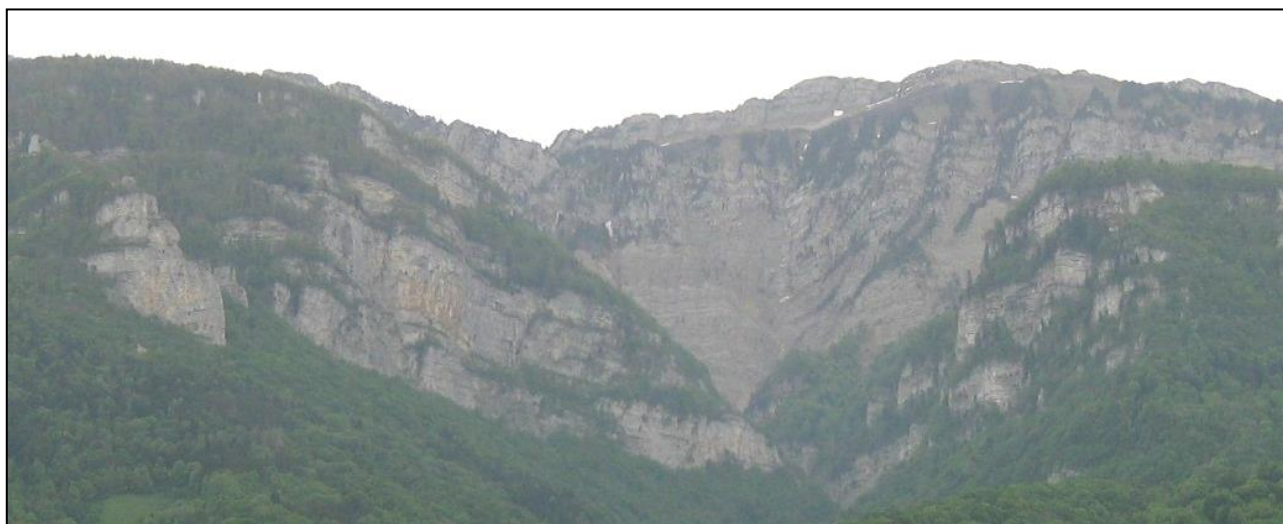


Figure 3: Dérochoir principal de la Roize © (RTM38 2009)

On pourra visualiser l'ensemble du bassin versant dans la Figure 4.

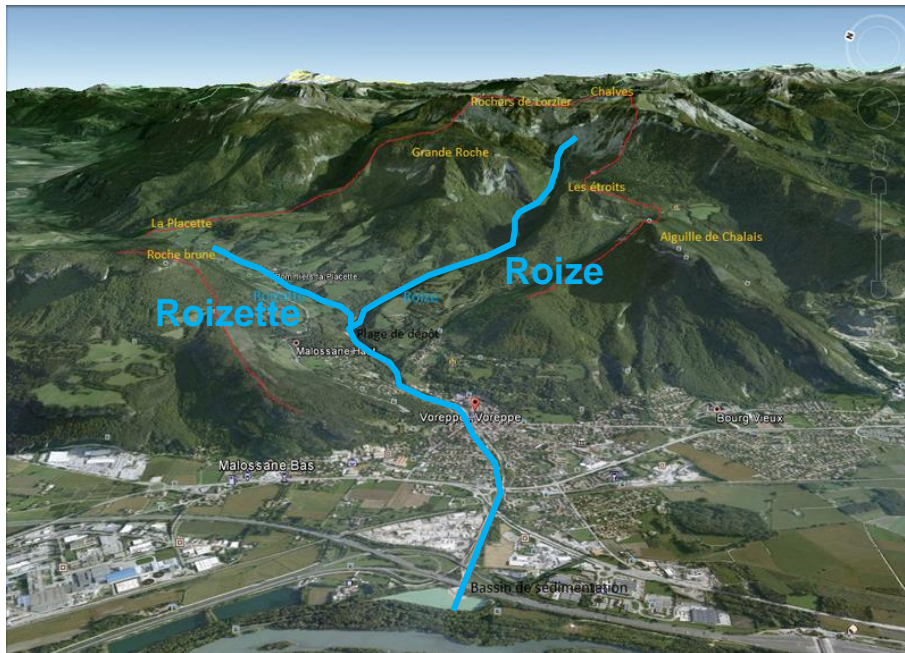


Figure 4 : Vue 3D du bassin versant (en rouge)

La Roize comporte 4 affluents majeurs aux écoulements parfois intermittents dont les caractéristiques sont très différentes :

- Le ruisseau de Charminelle (rive droite) et la Petite Roize (rive gauche) alimentent la branche principale de la tête de bassin de la Roize ;
- La Roizette coule depuis la commune de Pommier-la-placette en rive droite de la Roize amont. C'est l'affluent principal du torrent ;
- Le torrent du Référon s'écoule en contre-bas de l'aiguille de Chalais en rive gauche.

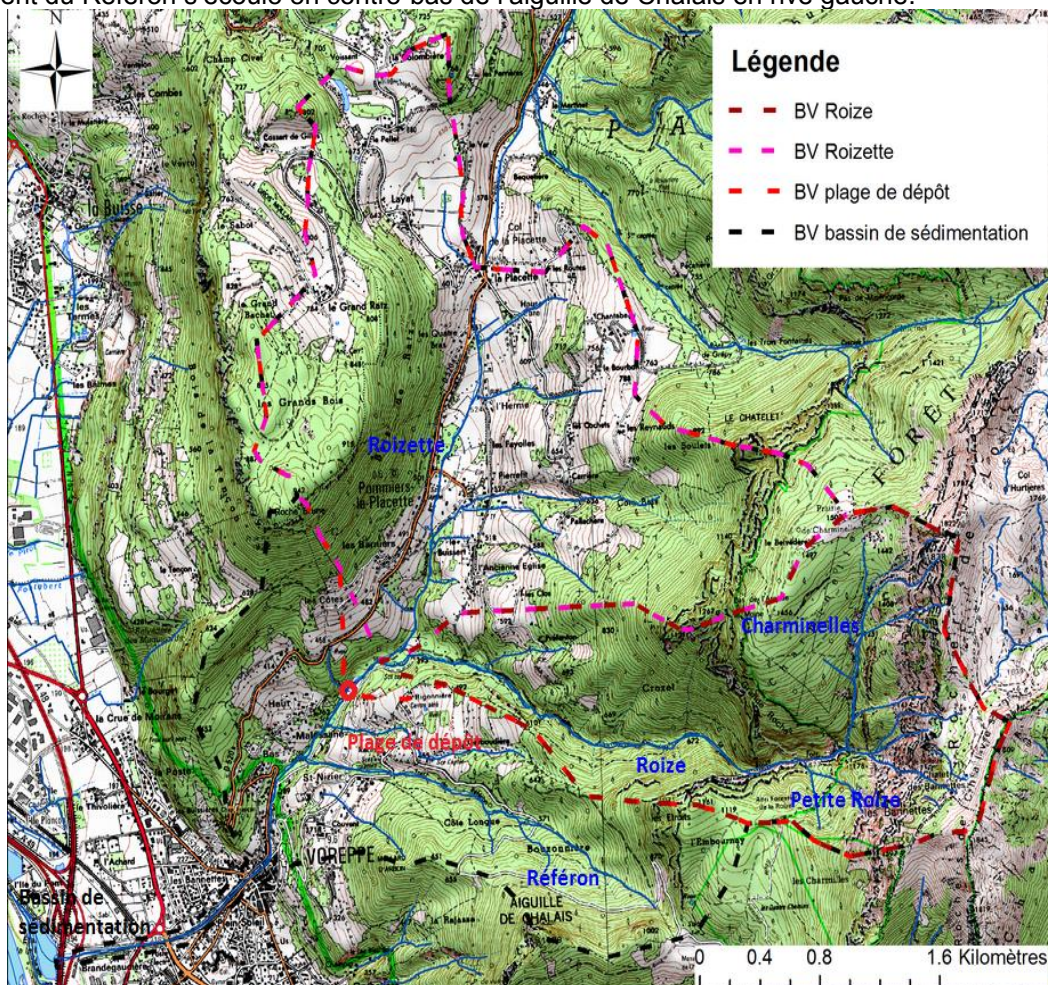


Figure 5 : Carte du bassin versant sur fond d'IGN

Dans la suite du rapport, nous désignerons par "Roize supérieure", le torrent en amont de la confluence avec la Roizette et par "exutoire" le bassin de sédimentation à l'aval du canal de la Roize.

La Roize est un torrent parmi les plus développés de Chartreuse, en particulier au niveau de son cône de déjection. La commune de Voreppe, implantée sur ce dernier, est aujourd'hui peuplée d'environ 10 000 habitants et a subi à de nombreuses reprises des crues plus ou moins dévastatrices (voir 3 Analyse historique).

2.1.2 Morphométrie

Le Tableau 2 recueille les données morphométriques principales estimées à partir du Modèle Numérique de Terrain ainsi que de la carte IGN.

Nota : la Roize est endiguée sur son cône de déjection ce qui modifie les valeurs de surface et périmètre du bassin versant à l'exutoire et influe donc sur la dénivelée spécifique et le coefficient de compacité en l'augmentant légèrement.

Les valeurs entre parenthèses sont celles fournies dans le rapport de RTM38 (2009).

Tableau 2 : Morphométrie du bassin versant de la Roize

Superficie (projetée) des bassins versants S [km ²] (voir Figure 5) A partir du Modèle Numérique de Terrain (MNT)	Bassin de sédimentation (bassin versant total)	Sommet du cône de déjection	Plage De Dépôt (PDD)	Roizette (à la confluence avec la Roize)	Roize supérieure
	16.2	16.06 (14.3)	12.2 (11.2)	7.3 (5.1)	4.7 (5.5)
Altitudes caractéristiques [m]	Exutoire	Sommet du cône de déjection	PDD	Confluence avec la Roizette	Culminante (Rochers de Chalves)
	194	270	345	~370	1845
Indices spécifiques (depuis l'exutoire)	Dénivelée [m] (voir Figure 7) H5%-H95%	Dénivelée spécifique $D_s = D\sqrt{l}/\sqrt{L}$ 458 (450) relief fort suivant la classification IRD	Coefficient de compacité de Gravelius*	Périmètre P [km] $P = 2(l + L)$	L [km] l [km] $S = l * L$
	1483-365=1118		1.6 (1.44) forme allongée	22.9	9.8 1.7
Longueur [km]	Du plus long thalweg depuis la PDD	De la Roize depuis le pont de Voreppe	De la Roize depuis l'exutoire	De la Roizette	
	4.51	5.8	7.3	2.72	

Note : * Coefficient de compacité de Gravelius : $Kg = P/2\sqrt{\pi A}$

La courbe hypsométrique ci-dessous a été calculée à partir du MNT et est représentative de tout le bassin versant incluant le canal à l'aval de Voreppe.

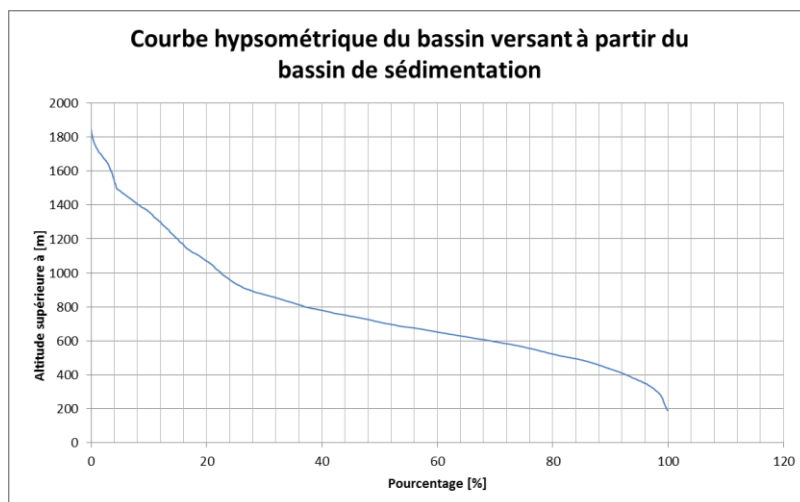


Figure 6 : Courbe hypsométrique calculée à partir du MNT pour le bassin versant total

On remarque que seul 20% du bassin versant dépasse les 1000 m d'altitude, celui est donc un torrent de moyenne montagne.

Tableau 3 : Répartition de la surface en fonction de l'altitude

Altitude [m]	>1400	[1400 ; 1200]	[1200 ; 1000]	[1000 ; 800]	[800 ; 600]	[600 ; 400]	<400
Pourcentage de la surface % selon MNT	8.3	6.7	7.5	14.7	32.3	23.3	7.2

A noter que le bassin versant de la Roizette est situé à moindre altitude que celui de la Roize supérieure et représente quasiment la moitié du bassin versant total ce qui laisse supposer que celle-ci est susceptible d'apporter une grande quantité d'eau à la Roize.

2.2 Géologie du bassin versant

Les données reportées ici sont principalement tirées de (Pinhas 1987, RTM38 2009) et du site de M. Gidon¹:

Les matériaux transportés par le torrent sont originaires de certaines formations géologiques du bassin versant. La géologie conditionne fortement le faciès d'une rivière et par ailleurs le risque torrentiel. La photo ci-dessous représente le haut bassin versant de la Roize. On y distingue l'entonnoir de réception du torrent ainsi que le chenal d'écoulement.

Figure 7 : Photo du haut bassin versant de la Roize depuis Roche Brune © M. Gidon (Gidon 2013)

A partir de la carte géologique synthétique fournie en annexe (Figure 71), de l'étude fournie dans le rapport de M. Pinhas, et de la vérification sur le terrain, les éléments clés de la géologie du bassin versant (les éléments les plus importants pour la



¹ <http://www.geol-alp.com>.

compréhension des phénomènes mis en jeu sont en rouge):

A Haut Bassin versant (Pinhas 1987)

Replat des Banettes (sous les rochers de Chalves):

Calcaire roux et calcaire corallien du crétacé, plus ou moins fracturé.

Falaises :

- Calcaire Valanginien : Calcaire du Fontanil et calcaire coralligène (dur)
- Plateformes où s'installe la végétation
- **Présence de couches tendres assez effritées**

Entonnoir :

- **Couches marno-calcaires (fournit d'énormes quantités d'éboulis) => la fourniture sédimentaire provient très majoritairement de cette zone**
- **Alternance de couches fracturées et de couches tendres (marneuse)**
- Partie supérieure : marnes grises du berriasien et calcaire marneux (1200 à 1050m)

Second entonnoir :

- Terrains jurassiques.
- Avant la confluence avec Charminelle, calcaire lithographique tithonique (solide)
- Confluence sur du calcaire crétacé berriasien

Gorges :

- RG : calcaires tithoniques : lithographique et brun-marneux => falaises
- RD : alternance de roches jurassiques et de roches en dolomie argileuse et calcaire argileux (plus tendre) => ce qui implique le faciès de falaises de la Grande Roche puis pentes douces en dolomie argileuse en contrebas

B Chenal d'écoulement

- **Falaises calcaires et zone d'éboulis anciens et végétalisés**
- **Terrains alluviaux, glaciaires => possibles glissements => sources potentielles de matériaux**
- **Terrains molassiques : très bonne stabilité (ex : falaises de poudingues) => lit stable**

I Falaises de calcaire aux falaises de poudingue

RG :

- falaises de calcaire compact
- **chutes de blocs (d'un diamètre parfois égal à 3m)**
- berge stable

RD :

- **Bonne couverture végétale sous les falaises de la Grande Roche empêchant les blocs d'arriver dans le lit**
- Erosion de roches tendres juste au niveau du passage du torrent, la roche y est mise à nue.
- Ravines d'écoulements bien tracées sous la Grande Roche.
- La granulométrie est assez grossière dans les gorges (voir 6.1) et **présence d'anciens dépôts de laves torrentielles à partir du point 670 et vers l'aval (voir Figure 9)**

II Falaises de poudingue au barrage de la plage de dépôt (PDD)

- Zone d'éboulis anciens puis falaises de poudingues
- Pentes riveraines recouvertes d'alluvions glaciaires (pente environ 50 à 55%)
- **Ruisseau encadré par des falaises dont les crêtes recouvertes de terrains glaciaires permettent des chutes d'arbres déracinés.**
- Egalement pentes glaciaires arrivant jusqu'au lit, la molasse étant enfouie sous les dépôts du torrent
- **Matériaux en provenance du haut bassin versant déposés en quasi-totalité.**
- **Lit du torrent : divagation d'un bord à l'autre, zone de reprises et de dépôt, arrêt préférentiel des laves torrentielles.**

III Barrage à l'exutoire

- De la Roizette au Référon, le torrent coule sur des poudingues.
- Du Référon au pont du Gigot, alluvions glaciaires.
- Du pont du Gigot au passage en ville, la pente passe à 5% et moins. Jusqu'au débouché du cône de déjection, la Roize coule en limite de terrains durs en RD et sur des terrains alluvionnaires puis molassique en RG.

C Affluent principal : la Roizette

Bassin versant important (cf. §2.1.2).

RD : pentes raides du bois de Ratz

RG : pentes modérées jusqu'à 30% et ravines

Terrains constitués d'alluvions glaciaires sauf vers « l'Ancienne Eglise », plus molassique

- En amont de Pierrefit : pas d'activité notable, terrain marécageux
- Ruisseaux de Pierrefit et du Buissert : très actifs en 1971 => terrains argileux, glissements pouvant fournir des matériaux alluvionnaires en cas d'épisode de crue générant ravinement et/ou glissements de terrains.
- RD, vers les Barniers, versant glissant

2.3 Zones de productions sédimentaire de la Roize

Le service RTM de l'Isère a mené un travail important de cartographie des zones actives d'un grand nombre de bassin versant torrentiel dans le cadre de l'établissement de la méthode ECsTREM (Peteuil 2010, Peteuil et al. 2012). La cartographie suivante est extraite de la fiche de la Roize (RTM38 2009):

Extension des zones actives: (d'après BDOrtho IGN© de 2003 et Scan25 IGN©) :

- Connectées au réseau hydrographique : 0,33 km² (3%)
- Non connectées au réseau hydrographique : 0,05 km² (0,5%)

Processus érosifs : Ravinement, éboulements, chutes de blocs et glissements de terrains (pour la Roizette)

Phénomène de transport solide prépondérant :

- Observations RTM : Charriage
- Indice géomorphologique : Charriage

Dispersion des zones en érosion : moyenne (ID = 0,2)

Légende

- Axe d'écoulement principal
- - - Limite du bassin versant
- Surface en érosion connectée au réseau hydrographique
- Surface en érosion non connectée au réseau hydrographique
- Surface végétalisée

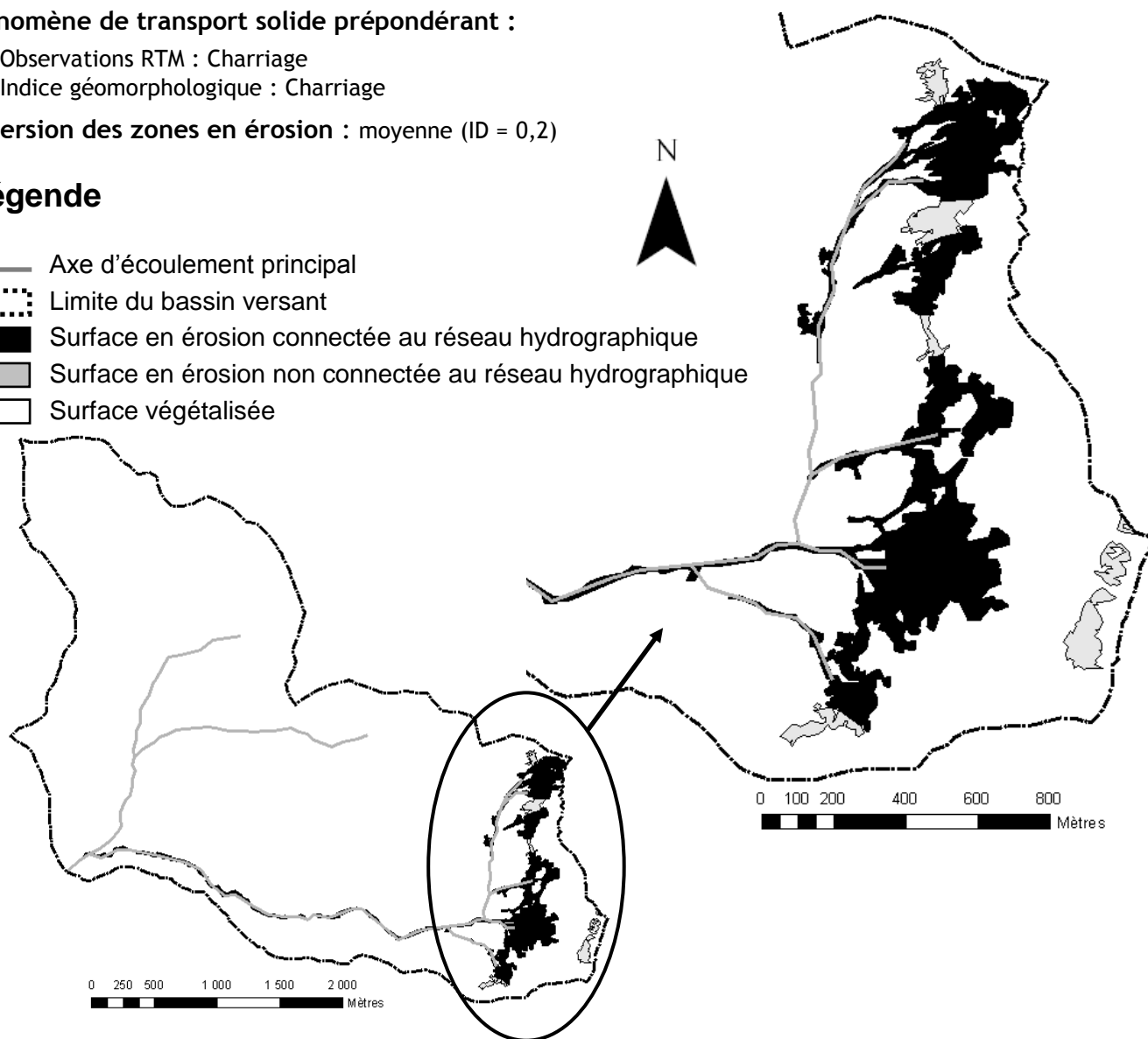


Figure 8: Cartographie des zones actives d'érosion sur la Roize (RTM38 2009)

On confirme ainsi la concentration des zones de production sédimentaire dans la partie haute du bassin versant de la Roize supérieure et leur absence dans le bassin versant de la Roizette. Les zones de productions de la Roize sont toutefois réparties en 5 branches actives distinctes.

2.4 Géomorphologie du lit

La Figure 9 représente la carte détaillée fruit de l'analyse de terrain. Nous y ferons référence à de nombreuses reprises dans le rapport. Elle représente en particulier les types de faciès rencontrés dans le lit du torrent selon la classification de (Montgomery and Buffington 1997).

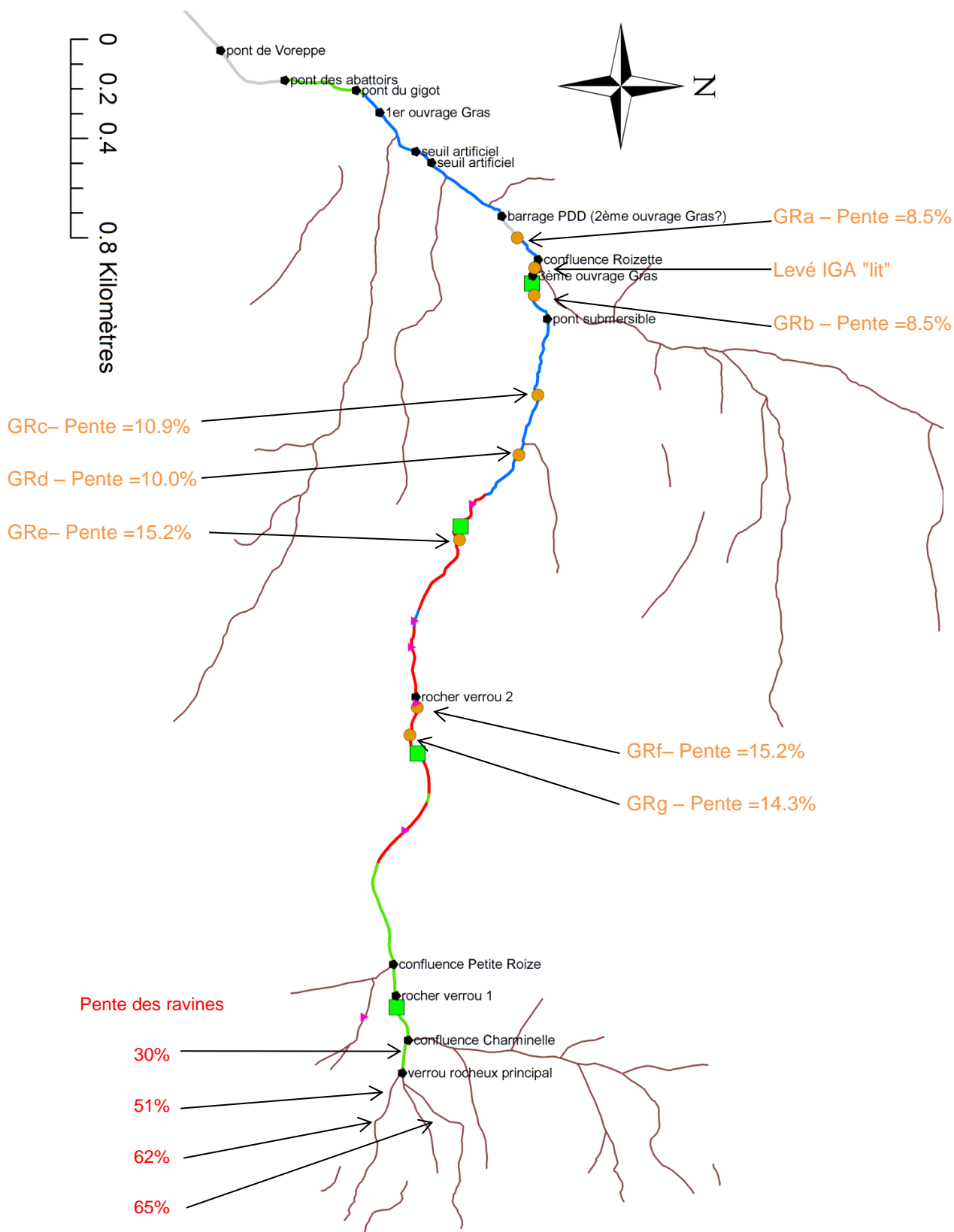


Figure 9 : Faciès géomorphologiques de la Roize à partir des analyses de terrain

- En orange, depuis l'aval vers l'amont : emplacement des Granulométrie + profils en travers + profils en long: a, b,c, d, e, f, g et h.
- En vert, les zones de régulation où nous avons effectué des granulométries.
- En rose, les traces de laves torrentielles aperçues.

On remarque que le torrent a un faciès :

- Dans la partie haute,
 - très influencé par la présence de la roche mère à faible profondeur.
 - très influencé par les processus colluviaux² de chutes de blocs, d'éboulements et de laves torrentielles.

Ceci explique les faciès de cascade et de lit colluvial.



Figure 10 : a) branches du haut bassin versant de la Roize b) falaises du haut bassin versant c) ouvrages installés en contrebas des falaises d) verrou rocheux principal e) à l'aval du verrou rocheux

² Se rapporte au "colluvium", nom général des sédiments non consolidés déposés à la base des versants, sous-entendu, apportés par les processus de versants par opposition au processus alluvial.



Figure 11 : a) rocher verrou 1 marquant l'entrée dans les gorges b) début des gorges



Figure 12 : a) haut bassin versant de la Petite Roize b) bourrelet de lave érodé dans la Petite Roize



Figure 13 : a) zones d'écoulement sur un affleurement rocheux b) faciès de cascade influencé par des blocs rarement mobiles

- En amont de la Roizette, les faciès de cascade laissent peu à peu place à ceux de step-pool. On rencontre régulièrement des zones de forte respiration du lit, d'anciennes terrasses alluviales, des restes d'accumulation de blocs laissant penser qu'il s'agit de fronts de laves arrêtées et des quantités importantes d'arbres morts.



Figure 14 : faciès caractéristiques de la Roize supérieure : a) lit large, trace visible de transport solide, accumulation de bois morts b) dépôts probable de laves torrentielles c) rocher verrou 2 d) step-pool

- La Roizette est un cours d'eau visiblement moins actif du point de vue géomorphologique. Elle correspond plus à la description d'un ruisseau qu'à celle d'un torrent du point de vue de Surell (1841). Son lit est très envahi par la végétation. En aval de la plage de dépôt RTM (PPD), la Roize a également un faciès envahi par la végétation, probablement lié à sa plus faible activité de transport solide après le piégeage total généré par la PDD.



Figure 15 : a) faciès caractéristique de la Roize en aval de la plage de dépôt b) faciès caractéristique de la Roizette, cours d'eau moins actif et plus envahi par la végétation c) plage de dépôt

- En arrivant sur le cône de déjection, la Roize sort de son canal d'écoulement boisé pour s'écouler dans les ouvrages bâtis par l'homme pour contenir ses crues.
- La Roize se jette finalement dans un étang, probablement un ancien bras mort de l'Isère, connecté à cette dernière plus à l'aval. Les apports solides du torrent forment un delta à chenaux multiples. L'aspect des sédiments (mélange de graviers, sables et limons) laissent penser qu'à la fois les charges transportées en suspension et en charriage se déposent ici. L'AD (Association Syndical Pique Pierre à Roize), en charge de la gestion des digues et de l'étang, mène régulièrement des curages sur le site (voir §3.4.3.2).

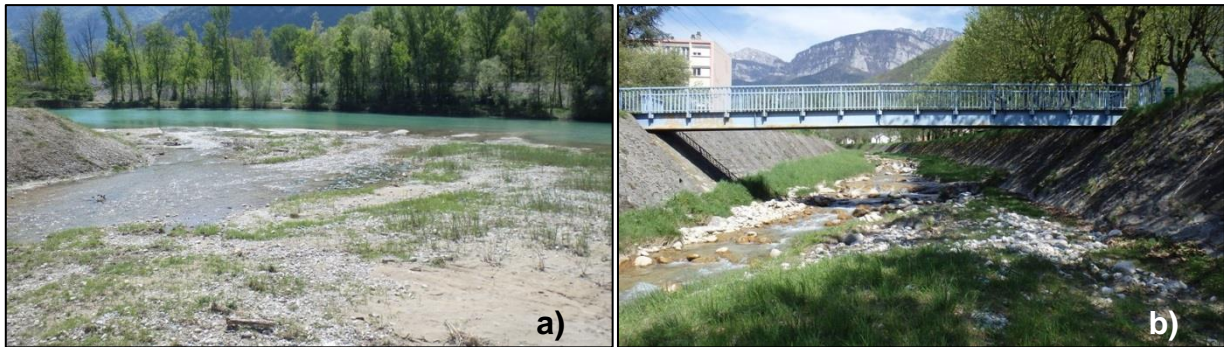


Figure 16 : a) exutoire du bassin versant étudié b) chenal sur le cône de déjection

Le cône de déjection de la Roize est complètement aménagé et le lit est canalisé sur l'ensemble du linéaire, ceci suite à de nombreux travaux décrits dans la section 3. Les ouvrages anciens ou récents situés sur le lit au niveau du cône de déjection jusqu'au niveau de l'Isère sont représentés Figure 17.

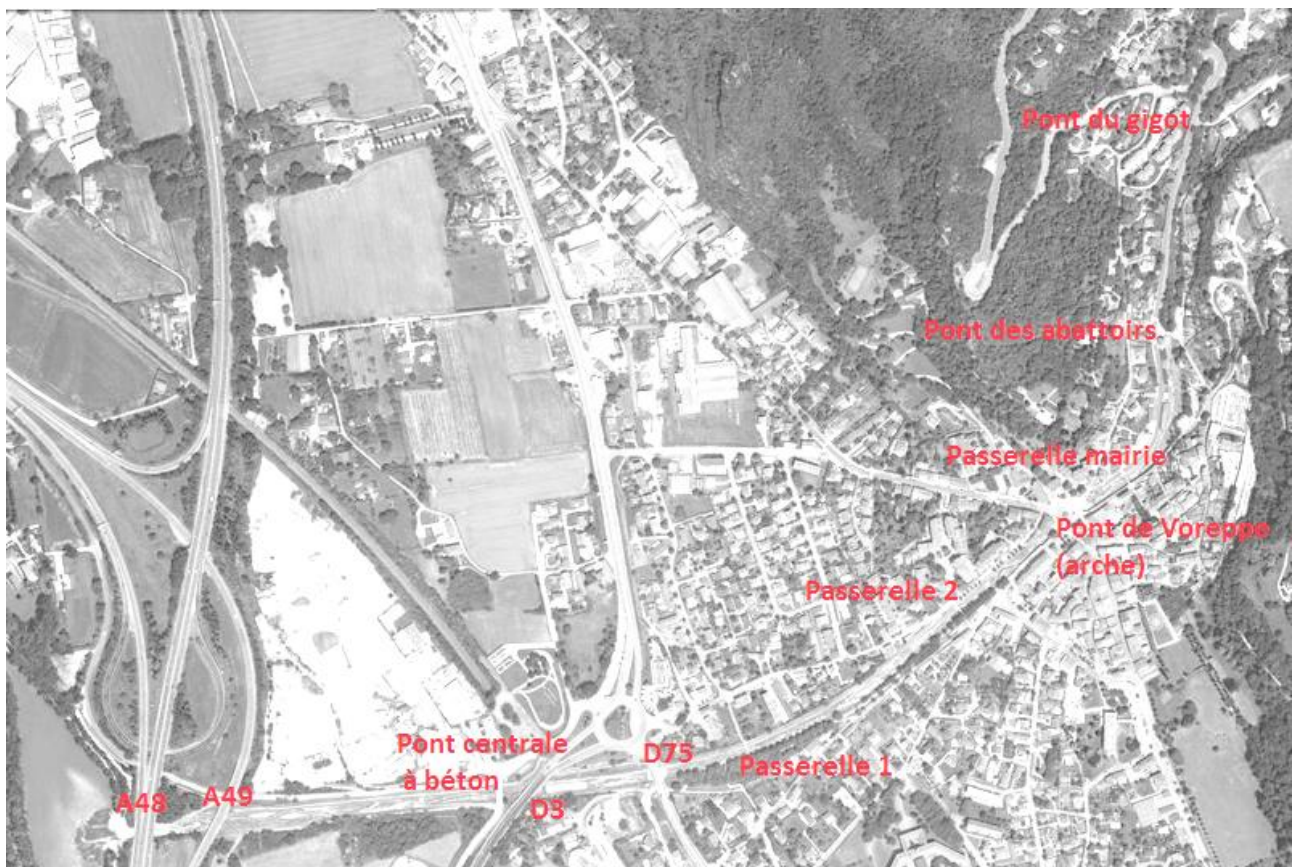


Figure 17 : Ouvrages en travers du lit de la Roize à Voreppe

2.5 Granulométrie

2.5.1.1 Roize

2.5.1.1.1 Données existantes

La granulométrie de la Roize est majoritairement influencée par le transport des matériaux en provenance du haut bassin-versant. La couche marno-calcaire de la falaise surplombant l'amont de la Roize se délite facilement avec la pluie et ses blocs sont ensuite charriés et érodés au fil du lit.

RTM38 (2006) retient les granulométries suivantes :

- Dm=110mm
- D30=30mm
- D50=70mm
- D90=360mm

Des mesures granulométriques ont été réalisées en 2014 par des élèves de l'Institut de Géographie Alpine de Grenoble sous l'encadrement de Alain Recking et de Frédéric Liébault.

- D₅₀, plage de dépôt=29 mm
- D₈₄, plage de dépôt =72 mm
- Nombre galets mesurés : 1 104
- D₅₀, chenal amont =64 mm
- D₈₄, chenal amont =186 mm
- Nombre galets mesurés : 288

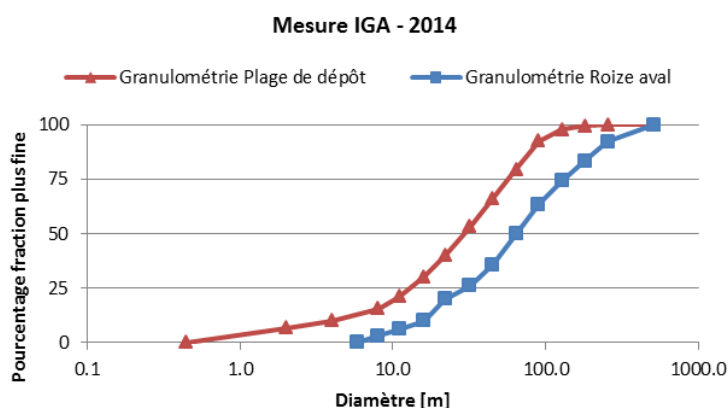


Figure 18 : Courbe granulométrique relevée par les étudiants de l'IGA

2.5.1.1.2 Nouvelles mesures

Une série de mesure de terrain par comptage de surface (Wolman count - Wolman (1954), voir méthodologie dans Liébault et al. (2013)) a été réalisée (implantation cf. Figure 9). Sur chacun des sites, lorsque cela était possible, deux granulométries ont été réalisées :

- La première en bordure directe de l'écoulement, voire dans l'eau : cette dernière est considérée comme représentant le lit du torrent et comme caractérisant la dimension des rugosités participants à l'hydraulique du site ;
- La seconde a été mesurée sur les bancs latéraux, zones de dépôts et d'accumulations de la charge sédimentaire transportée. Elle est considérée comme étant représentative de la granulométrie réellement transportée par le torrent (dans le cas de la GRa, la mesure est prise, en surface, sur des dépôts non remaniés dans la plage de dépôt. Compte tenu de l'influence de l'ouvrage sur le dépôt des sédiments, cette valeur est considérée comme douteuse).

Cette distinction peut être nécessaire dans les cours d'eau où le lit n'est pas uniquement constitué de matériaux alluvionnaires apportés par le transport solide du cours d'eau : la Roize, comme la majorité des torrents, présente de nombreux blocs, très rarement mobilisés, qui pavent son lit. Ces derniers participent à la dissipation de l'énergie par turbulence lors de l'écoulement des crues mais ne peuvent être considérés comme des matériaux transportés et inclus dans les équations de transport solide (Figure 51d).

A partir de toutes les mesures effectuées sur le terrain, voici un résumé des valeurs de granulométrie obtenues (Tableau 4).

Tableau 4 : Granulométrie de la Roize

Site	D _{50%} banc [mm]	D _{50%} lit [mm]	D _{84%} banc [mm]	D _{84%} lit [mm]
GRa	52	77	112	426
GRb	46	85	254	238
GRC	85	87	294	403
GRd	42	88	242	361
GRe	59	58	279	320
GRf	58*	89	245*	349
GRg	57	67	211	277

Note * : au droit de GRf, aucun banc n'était clairement visible, il n'y a donc pas de mesure de la granulométrie du banc. Dans les calculs, une valeur moyenne de 245 mm entre les valeurs amont et aval de D₈₄ sera prise en compte, idem pour le D₅₀.

2.5.1.2 Roizette

La granulométrie de la Roizette est, quant à elle, celle d'un lit pavé dans la mesure où celle-ci emporte tous les matériaux alluvionnaires. En effet, outre une fourniture sédimentaire majoritairement fine, issue des parcelles agricoles et en faible proportion comparée à celle de la Roize, la quantité d'eau qu'elle apporte de manière régulière permet de lessiver son lit jusqu'à la roche ou à une armure de gros blocs qu'elle ne peut transporter, et ceci jusqu'à des épisodes de crue importants (voir 3.3 Crue de 1971 et Figure 15).

2.6 Analyse des pentes

2.6.1 Données littérature

Sur la Figure 9, on peut voir l'évolution des pentes moyennes mesurées sur le terrain à l'aide d'un télémètre. Celles-ci varient entre 8% et 15% entre la confluence et le début des gorges avant d'atteindre 24% dans celles-ci puis jusqu'à environ 60% dans les ravines du haut bassin versant. Le récapitulatif complet des mesures de profil en long est disponible en annexe.

A noter que la pente des falaises du haut bassin versant, mesurée sur une seule paroi et très grossièrement, se situe aux alentours de 60°.

Les deux figures suivantes illustrent le profil en long de la Roize; la Figure 20, en particulier qui se focalise sur le canal endigué à l'aval. Sur la Figure 19 on rappelle qu'entre la confluence et le sommet du cône de déjection, la morphologie est celle d'un lit pavé, parfois avec un affleurement quasi continu du substratum vers l'apex. Ceci est due au fait que les apports de la Roizette étant essentiellement liquides et conséquents (voir 2.1.2 Morphométrie), la capacité de transport de la Roize y est toujours excessive (RTM38 2006) en complément des effets de piégeage de la plage de dépôt.

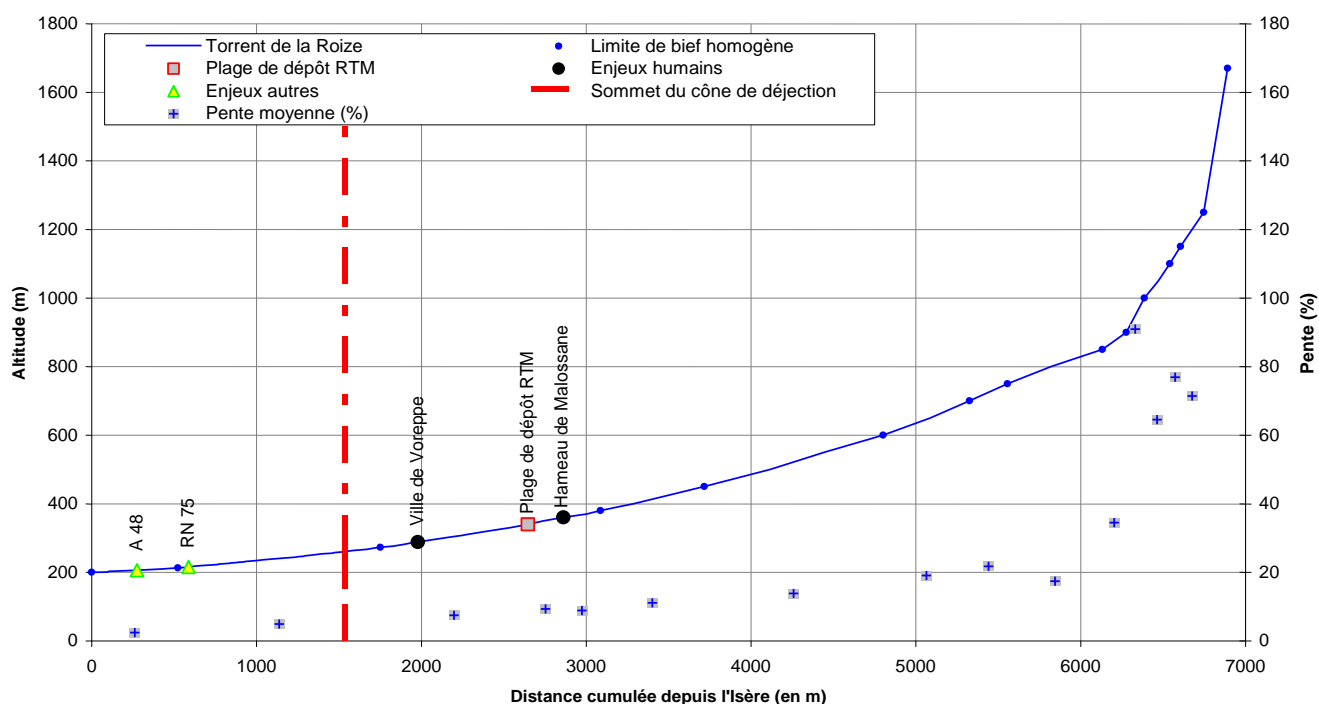


Figure 19 : Profil en long de la Roize IGN 1/25000 (RTM38 2009)

Sur la Figure 20 on distingue la décroissance très nette de la pente. Ceci induit une tendance systématique au dépôt dans le canal en cas de forte crue. Les matériaux atteignant la sablière que l'on peut voir Figure 16 représentent en effet un volume très faible par rapport à la totalité des apports Figure 37 (RTM38 2006).

Les mesures réalisées par les étudiants de l'IGA confirmaient un ordre de grandeur de 11.3% en amont de la plage de dépôt.

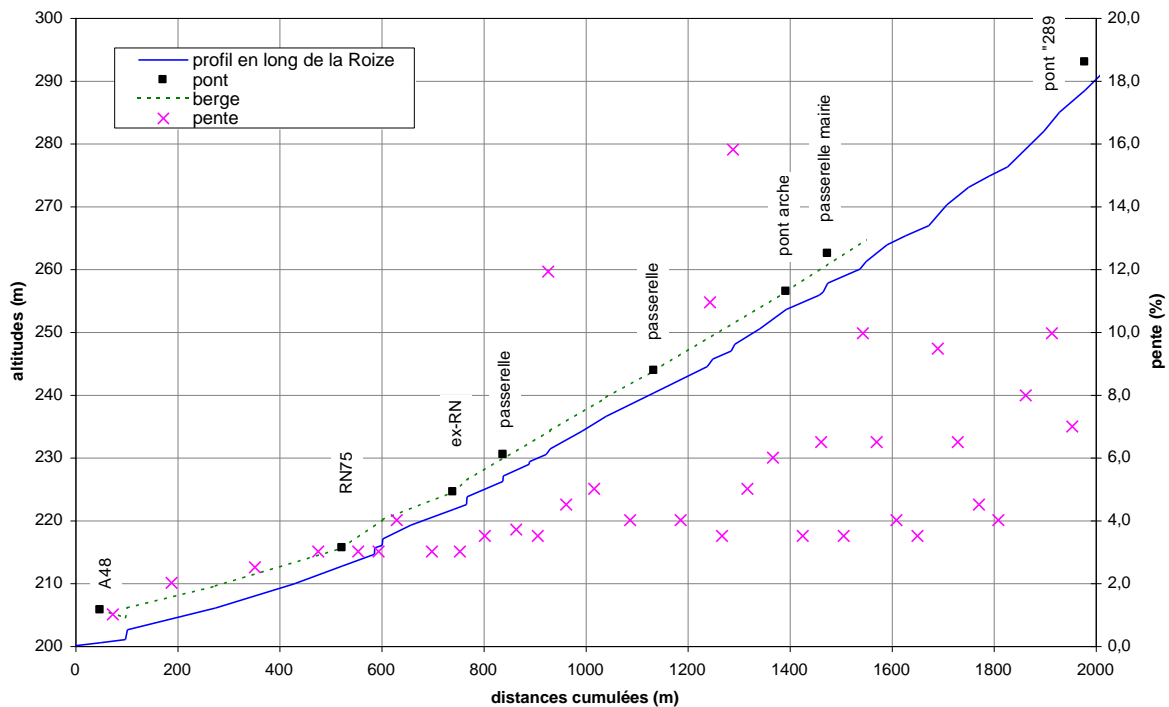


Figure 20 : Profil en long du canal (RTM38 2006)

Dans le cadre des calculs menés dans le § suivant, les valeurs de pentes utilisées sont celles mesurées sur site lors des campagnes de mesure (voir annexes).

2.7 Occupation des sols

L'étude de l'occupation des sols permet d'affiner l'analyse du transport solide en déterminant les zones les plus sujettes à fournir des matériaux au torrent.

A partir de la base de données SIG (Système d'Information Géographique) d'IRSTEA dont les données ont été traitées sous Arcgis, puis en vérifiant les informations à partir des photos aériennes du bassin versant, la carte de synthèse de la Figure 21 illustre l'occupation des sols sur le bassin versant.

Corine Land Cover 2006

Territoires artificialisés - Zones urbanisées

112 : Tissu urbain discontinu

Territoires artificialisés - Zones industrielles ou commerciales et réseaux de communication

121 : Zones industrielles et commerciales

Territoires artificialisés - Mines, décharges et chantiers

131 : Extraction de matériaux

132 : Décharges

Territoires agricoles - Terres arables

211 : Terres arables hors périmètres d'irrigation

Territoires agricoles - Prairies

231 : Prairies

Territoires agricoles - Zones agricoles hétérogènes

242 : Systèmes culturaux et parcellaires complexes

243 : Surfaces essentiellement agricoles, interrompues par des espaces naturels importants

Forêts et milieux semi-naturels - Forêts

311 : Forêts de feuillus

312 : Forêts de conifères

313 : Forêts mélangées

Forêts et milieux semi-naturels - Milieux à végétation arbustive et/ou herbacée

321 : Pelouses et pâturages naturels

324 : Forêt et végétation arbustive en mutation

Forêts et milieux semi-naturels - Espaces ouverts, sans ou avec peu de végétation

332 : Roches nues

333 : Végétation clairsemée

Surfaces en eau - Eaux continentales

511 : Cours et voies d'eau

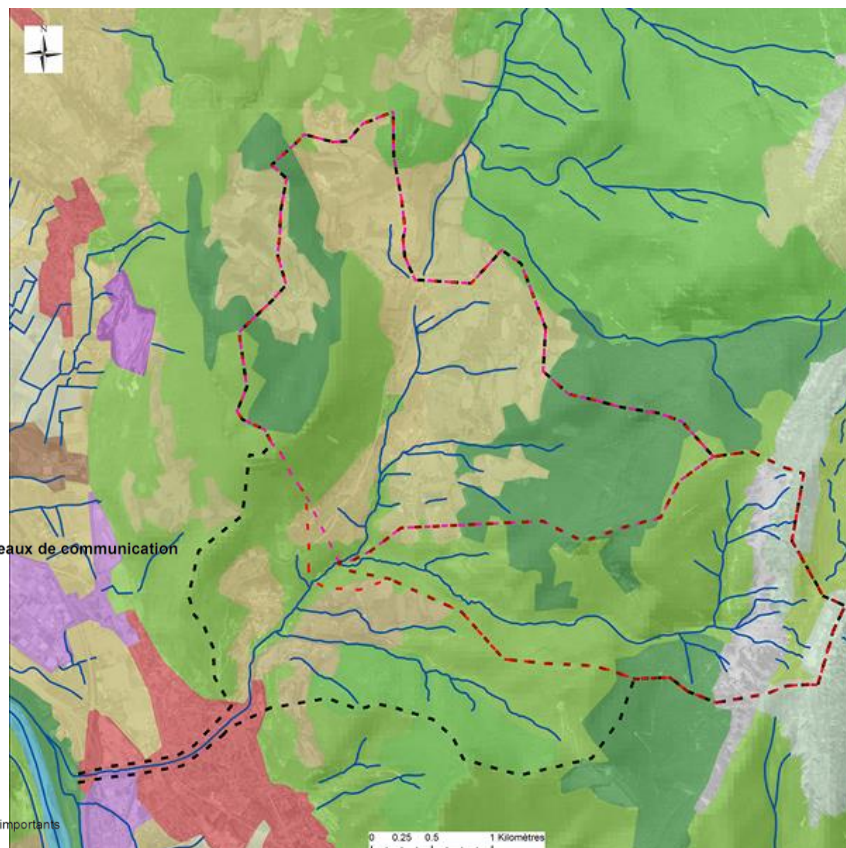


Figure 21 : Occupation des sols selon CORINE LAND COVER 2006

Les trois figures ci-dessous et en particulier les deux dernières attestent de la différence de couverture des sols entre la Roizette et la Roize supérieure.

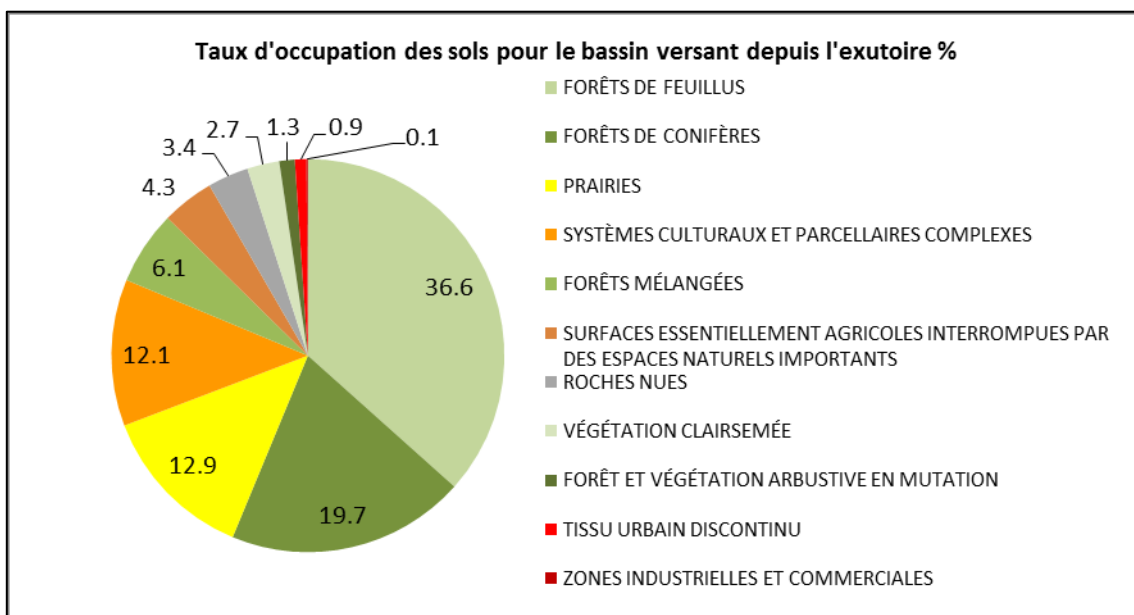


Figure 22 : Répartition de l'occupation des sols pour le bassin versant depuis l'exutoire

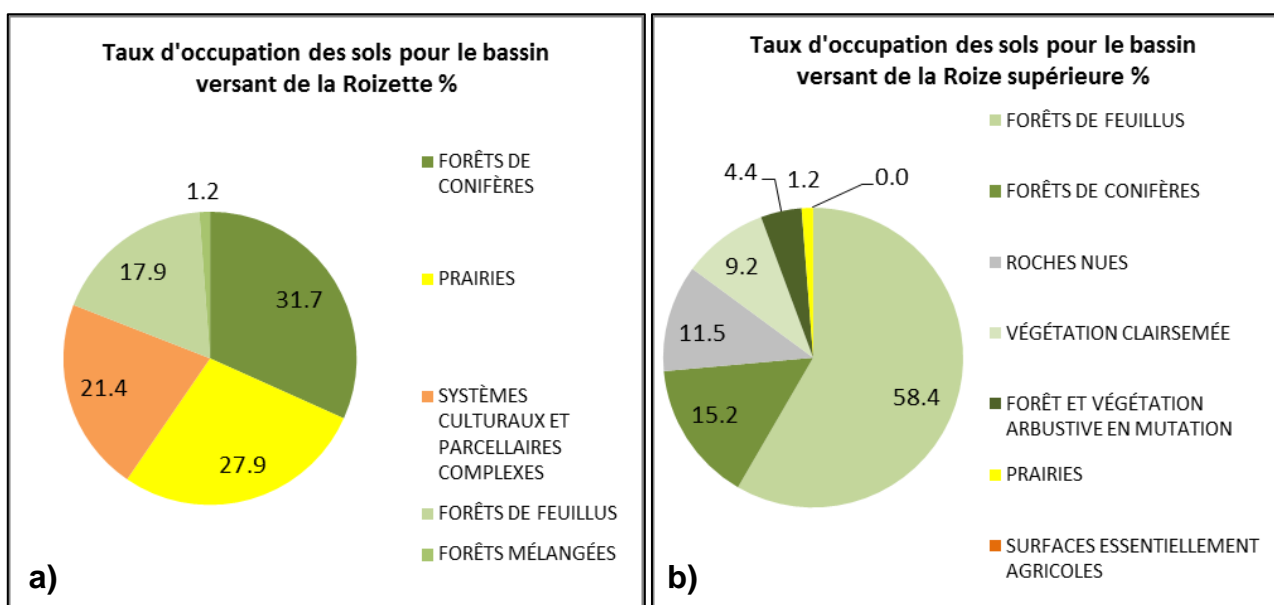


Figure 23 : Répartition de l'occupation des sols : a) pour le bassin versant de la Roizette b) bassin versant de la Roize supérieure

Outre le fait que le bassin versant de la Roizette est plus bas que celui de la Roize supérieure (voir 2.1.2 Morphométrie), on constate une réelle différence en termes d'occupation des sols :

- celui de la Roizette comporte des prairies et surfaces de culture en grand nombre alors que celui de la Roize est recouvert de forêts. Ceci est vraisemblablement dû au fait que l'exploitation des terres y est plus facile de par sa moindre altitude, ses terrains plus plats et plus accessibles.
- la fourniture sédimentaire, elle, est majoritairement apportée par la Roize car le haut bassin versant comporte une grande zone de roches nues dont une partie est très sensible à l'érosion (voir 2.2 Géologie du bassin versant).

2.8 Synthèse sur la géomorphologie

A partir des paragraphes ci-dessus, on peut résumer grossièrement le fonctionnement de la Roize de la manière suivante :

- Les sédiments sont majoritairement fournis par la Roize supérieure, au niveau des falaises de marno-calcaire du haut bassin versant ;
- Le lit de cette branche principale montre de nombreuses traces d'activité torrentielle et est caractérisé par la présence de nombreuses zones de régulation du transport solide : zones de lit plus larges situées en amont de verrous rocheux ou de zones très stables et plus raides du lit.
- Les analyses granulométriques montre des valeurs:
 - De D_{50} variant généralement dans la gamme [65mm-90mm], parfois légèrement moins au droit de patches de graviers observés sur les bancs;
 - De D_{84} relativement homogènes au niveau des bancs situés en amont de la confluence avec la Roizette de l'ordre de [210mm;290mm]. Le D_{84} est notoirement plus faible en aval, avec une valeur de 112 mm.
Au niveau du lit, les D_{84} sont généralement bien plus élevés, démontrant l'effet de pavage et l'existence des step-pools avec des valeurs souvent de l'ordre de 350 mm et atteignant 426 mm en aval de la confluence où les apports de la Roizette génèrent une capacité de transport accrue et un pavage plus marqué du lit.
- Les pentes présentent un gradient marqué vers l'amont:
 - De l'ordre de 8.5% au voisinage de la confluence Roize-Roizette;
 - De l'ordre de 10-11% dans la zone de step-pools amont;
 - Elles s'élèvent à 14-15% en amont des verrous rocheux qui précèdent les zones de régulations amont.
- L'occupation des sols de la Roizette et son bassin versant plus important lui donne une hydrologie de basses-eaux plus importante que la celle de la Roize (basée sur nos observations de terrain). Le débit d'eau de la Roizette souvent supérieur à celui de la Roize (notamment en période d'étiage) engendre en deçà de la confluence des crues plus marquées du point de vue des débits liquides.

Les chapitres 4, 5 et 0 visent à qualifier cette hydrologie et à en étudier l'effet sur la capacité de transport du cours d'eau, capacité liée à l'hydrologie mais aussi aux pentes et granulométrie du cours d'eau.

3 Analyse historique

Une analyse historique du bassin versant de la Roize permet de comprendre quels ont été les phénomènes mis en jeu au cours des deux derniers siècles et quels ont été les réponses qui ont été apportées afin de prévenir au mieux aux risques associés.

Les informations proviennent de la banque de données RTM ou de ses archives, des données disponibles sur Géoportail, ou des archives départementales.

3.1 Cartes anciennes

Le document cartographique d'ensemble le plus ancien disponible sur le secteur est la carte de Cassini réalisée vers 1768 (Figure 24). On y remarque :

- Que sur celle-ci comme sur les autres archives anciennes, la Roize était autrefois appelée la Roise.
- La présence de nombreux moulins après la confluence de la Roize avec la Roizette et ceci jusqu'à l'aval de Voreppe. Il a été constaté lors de nos visites que le débit en aval de la confluence était plus régulier qu'en amont où des infiltrations sont récurrentes. Lors des visites de terrain, nous avons retrouvé des traces de prise d'eau en amont de la confluence avec la Roizette. Des restes d'un autre ouvrage de prise d'eau existent aussi dans les sous-bois à proximité de la confluence avec Référon. Cet ouvrage doit être très ancien puisqu'il est visible sur la carte de Cassini (flèche rouge).
- A l'époque, aucun bassin tampon n'existait entre l'Isère et la Roize.
- L'Isère prenait la forme d'un lit en tresse caractérisé par des chenaux multiples.
- La route principale dans la vallée traversait Voreppe au niveau du « pont de Voreppe » (voir Figure 17).

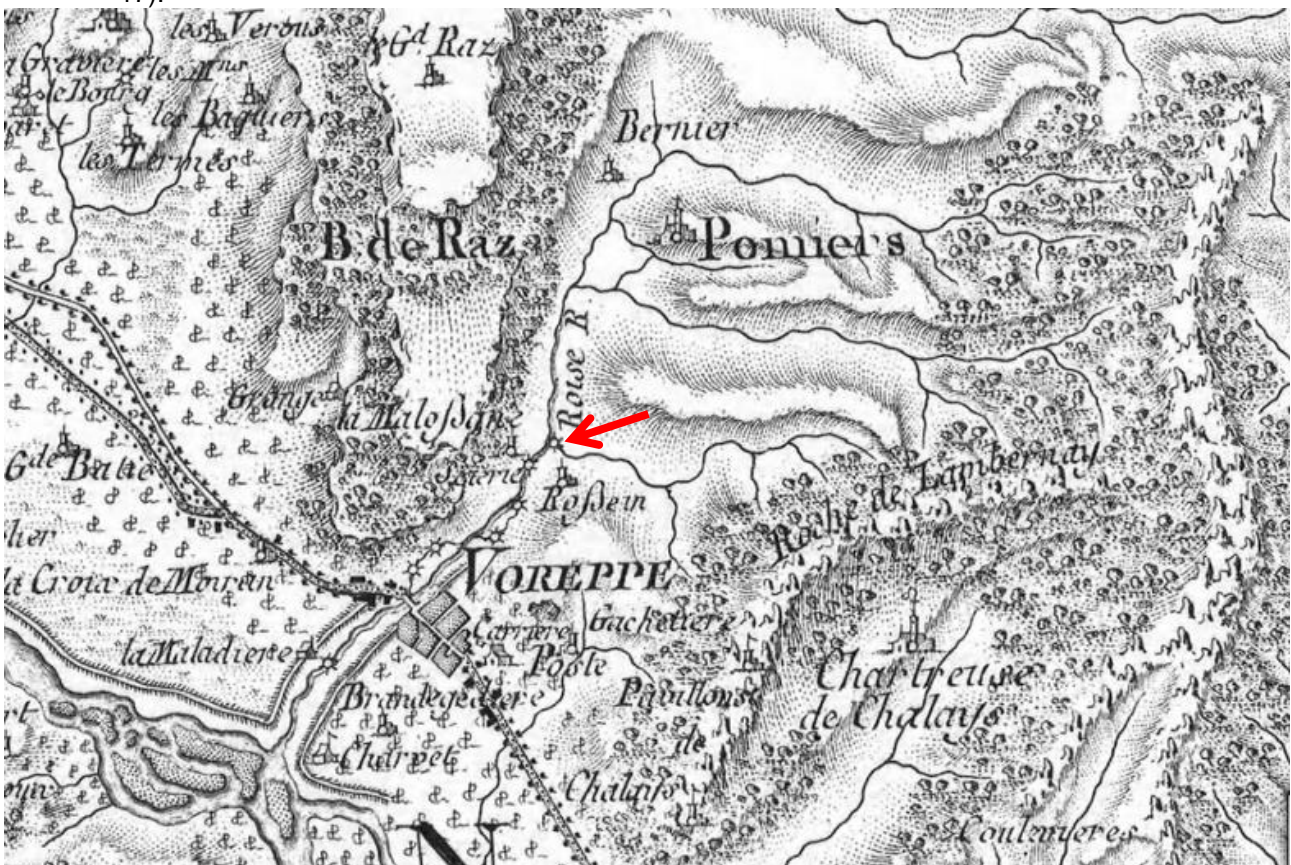


Figure 24 : Carte de Cassini (1768)

La carte d'état-major de 1849 constitue le second document d'ensemble du secteur.



Figure 25 : Carte d'Etat-Major (1849)

- On constate la présence de digues construites au XVIIIème siècle à l'aval de Voreppe
- En 1849 un bassin tampon entre la Roize et l'Isère est visible. Celui correspond peut-être à un ancien bras mort de l'Isère.
- Un canal de dérivation des eaux de la Roize partant de Voreppe et orienté Nord-Sud est également visible. On en retrouve des traces dans les archives départementales de l'Isère.

3.2 Synthèse des événements majeurs recensés depuis 1690

L'ensemble des événements majeurs liés à la Roize et rapportés dans les archives ont été compilés dans le Tableau 5.

=> Symboles utilisée dans le tableau, colonne Informations : Informations diverses, Ouvrages, Crues, Curages, Commentaires sur les photos aériennes disponibles

Tableau 5 : Synthèse des événements historiques majeurs liés à la Roize

Date	Nature de l'événement, Zone de départ et d'arrivée	Cause et durée du phénomène	Informations
1680	Construction pont de Voreppe		"Ce pont, construit en 1680, est indiqué comme il suit dans le toisé général de la grande route de Lyon à Grenoble, dressé en 1753 : Le pont de Voreppe, sur le torrent de la Roize, est d'une seule arche de 32 pieds de diamètre et de 24 pieds d'une tête à l'autre, avec murs en ailes, parapets et murs d'avenues ; le bandeau de cette arche et les bahuts sont en pierre de taille, le surplus en maçonnerie de moellons et libages, et le tout en bon état. (Anciennes archives de l'Intendance, n° 180.)" (Pilot 1857)
6/8, 25/10 & 16/11/1690	Crues torrentielles		Destruction de tous les chemins construits en 1680 en amont du pont de Voreppe. Lit comblé. Pont de Voreppe obstrué (Pilot 1857)
06/08/1692	Laves torrentielles de La Roize		Lit comblé. Propriétés riveraines envahies. Pont de Voreppe obstrué (par l'un, au moins, des épisodes de 1692). (Pilot 1857)
29/10/1692	Laves torrentielles de La Roize		Lit comblé. Propriétés riveraines envahies. Pont de Voreppe obstrué (par l'un, au moins, des épisodes de 1692). (Pilot 1857)
16/11/1692	Laves torrentielles de La Roize		Lit comblé. Propriétés riveraines envahies. Pont de Voreppe obstrué (par l'un, au moins, des épisodes de 1692) (Pilot 1857)
1695	Crue torrentielle		VOREPPE - quelques bâtiments détruits par la "rapidité" du torrent. Le torrent a rompu son canal du côté de Moirans et s'est répandu dans les fonds en les couvrant de pierres (rtm-onf.ifn.fr)
02/09/1703	Crue torrentielle du torrent de La Roize	Probablement orage de fin d'été	Lit du torrent comblé. Avenue du Pont couverte de cailloux. Pont de Voreppe dégradé. La crue remplit toute l'avenue du Pont (rtm-onf.ifn.fr)
1747	Crue torrentielle		"Pont fut 'gravement affouillé du côté du bourg" (Pilot 1857)
1747	Travaux de reprise du pont		Equipement du pont d'un radier en arc retournée et de deux ouvrages de chutes: Travaux "adjudés au sieur Claude Badon , entrepreneur de travaux publics , le 21 juin 1748, au prix de 1,900 livres, et à la charge, par les habitants, soit de fournir et de charrier les matériaux, soit de contribuer la dépense par des journées de manœuvres. Cette fourniture et ces journées furent évaluées à 1,836 livres 111 sols" (Pilot 1857)
1750	Inondation, débordement, crue		
1754	Inscription gravée à la mairie		Salle des délibérations de la mairie : "La Roize 1754 - Prenez-y garde"(archives RTM)
3 et 4/6/1757	Crue torrentielle du torrent de La Roize	Pluies diluviennes	Ravages dans la plaine. Hameau de Brandegaudière recouvert d'une masse de pierres. Lit du torrent entièrement comblé en aval et en amont du pont (Pilot 1857)
30/6/1761	Crue torrentielle du torrent de La Roize		Tous les chemins et ouvrages (moulins) en amont du pont de Voreppe, construit en 1680, ont été anéantis. Lit comblé. Pont de Voreppe obstrué. Les citernes de Voreppe furent emportées. L'eau est sortie entre le rocher du Prieuré et la maison Magnin et a inondé le bourg (rtm-onf.ifn.fr)
1761	Projet et construction des digues de Voreppe		"Ingénieur Bouchet, pour préserver le bourg de Voreppe proposa de faire construire un digue en amont du pont et qui devait se prolonger quelques toises plus bas afin de le soutenir. Quant à l'irruption de la Roize en 1769, elle fut peu sensible; les digues qu'on venait de construire maintinrent le torrent dans son lit. On comprit, dès lors, tout l'avantage qui résultait des travaux, de même que pour protéger le village de Brandegaudière dans la plaine, l'on continua, en 1772, la digue laissée un peu en dessous de la grande route." (Pilot 1857)
1768	Elaboration des cartes de Cassini		Carte de Cassini Grenoble (dates d'élaboration) :1768 -1769 - 1776)
1769	Crue		"Fit reconnaître qu'il fallait prolonger les digues en aval afin de protéger Brandegaudière et les terres voisines d'une destruction complète" (rtm-onf.ifn.fr)
1772	Prolongation digues		Prolongation digues de Voreppe (Pilot 1857)
1776	Crue torrentielle		Voreppe : Mur d'une maison et d'un butoir renversés. Rupture de la digue au-dessous de la route. Terres emportées. Chemin qui va à Saint Laurent du Pont emporté (Pilot 1857)
1849	Elaboration des cartes d'état-major		Carte d'état-major
03/01/1850	Création du Syndicat de Roize		Création du syndicat de Roize. Protection prise en charge par le "Syndicat de Roize". (archives départementales) Protection consistant en de petits ouvrages situés en sortie des gorges, PDD en aval de Voreppe de 2ha environ entourée de digues, engravée à chaque crue. Voreppe toujours pas à l'abri. Palliatifs éphémères.(archives RTM)

Date	Nature de l'événement, Zone de départ et d'arrivée	Cause et durée du phénomène	Informations (suite)
31/7/1851	Crue torrentielle. Montagne des Gourreaux à la plaine. Construction des ouvrages de Gras	Pluies diluviennes pendant 3j (29 juillet pluie intense puis 31 juillet, violent orage). Crue torrentielle de La Roize qui semble avoir perduré 4 jours	Partie du chemin GC n° 3 qui mène à St Laurent-du-Pont détruite. Portion du mur du quai près du pont écroulée en rive gauche. Dignes dans la vallée rompues, d'où inondations dans la plaine. Hôtel du Petit Paris et café VEYRON envahis par les eaux. "le 31 juillet à 9h, la Roize surmontait ses berges en amont du pont de Voreppe et roulait avec un bruit effrayant des masses de terre et des blocs de pierre d'un volume énorme" (rtm-onf.ifn.fr) Post inondation de 1851, création de trois barrages en travers du lit à des distances de 600, 1300 et 1800m de Voreppe afin d'arrêter les gros blocs de pierre, de faire déposer une grande partie des matières charriées et d'empêcher l'érosion du fond du lit jusqu'à une certaine distance. Rajouts de seuils dans le canal pour éviter l'affouillement (Gras 1857) Objectif : forcer l'écoulement à se disperser pour lui enlever sa force d'entraînement, les barrages font aux alentours de 35m de large, calés au niveau du lit du torrent pour le premier et le troisième, le second faisait 2.5 m de haut à la construction (Gras 1857) et (Culmann 1865)
01/08/1852	Crue		Voreppe : Conduites des fontaines communales détruites. Digue neuve construite en aval du rocher sur lequel est la cure emportée (rtm-onf.ifn.fr)
1856	Crue		Crue mentionnée par (Gras 1857), dépôt de 300 m³ sur les barrages, volume ré-érosé par la suite.
1862	Construction ligne de train		Création ligne de train PLM Lyon Grenoble : tunnel sous le cône de déjection de la Roize afin d'éviter le risque de crue (Pinhas 1987)
08/1882	Crue torrentielle du torrent de La Roize		Une partie de la plage de déjection comblée de boues et de graviers. Menaces de destruction du canal de Paluel (rtm-onf.ifn.fr)
1882	Loi de 1882		Loi de 1882 : notion d'utilité publique.
13/06/1883	Etablissement des plans du 6 ^{ème} barrage, date de réalisation ?		Etablissement des plans du "6 ^{ème} barrage en amont de Voreppe et de la prise d'eau des usines à ciment" (Archives départementales)
1901	Rapport ONF		Rapport de l'ONF : mention dans le procès-verbal de reconnaissance général de laves torrentielles dans le lit de la Roize. De plus : "En général les gros matériaux (1m3 et +), lors de crue, ne sont emportés que sur une longueur restreinte et sont déposés en amont de Voreppe. Mais les crues violentes entraînent des masses énormes de matériaux qui traversent Voreppe en le menaçant de destruction et bouleversent les cultures à son aval". "La Roize est peut-être le plus redoutable de tous les torrents de l'Isère étant donné l'accumulation colossale de matériaux de transport déposés dans son lit et celui de ses affluents".(RTM38 2009) Projet d'action dans le haut BV. Acquisition de terrains pour la construction d'ouvrages (59ha Voreppe, 86ha Pommier) pour la plantation d'arbre (saules, peupliers), l'enherbement (36ha d'enherbement), renforcement des berges avec des plantations d'aunes. Des ouvrages furent construits :(ex : 140 barrages convexes amont hauteur :1m50 fondation : 2m50 fondation, avant confluence avec charminelle...) ainsi que quelques digues en gabions. Mise au repos de la forêt, interdiction de pâturage (archives RTM)
16/08/1904	Crue torrentielle du torrent de La Roize		Tous les chemins en amont du pont de Voreppe, construit en 1680, ont été anéantis. Lit comblé. Pont de Voreppe obstrué (rtm-onf.ifn.fr)
21/08/1904	Inondation, débordement et crue du torrent de La Roize au Mas de Brandegaudières		Voreppe : Quelques bâtiments détruits par la "rapidité" du torrent (sans précision). Le torrent a rompu son canal du côté de Moirans et s'est répandu dans les fonds en les couvrant de pierres (rtm-onf.ifn.fr)
15/10/1904	Inondation, débordement et crue de l'Isère et torrents de La Roize et Rivachet		Dégâts sur les fonds de CHARVET, SIBILLAT, GERLAT, VIEUX et CHEVALIER, DESMARET, BILLON, MOUTON (rtm-onf.ifn.fr)
03/11/1904	Crue torrentielle de La Roize		Tous les moulins en amont du pont de Voreppe détruits. Les citernes de la commune furent emportées. L'eau est sortie entre le rocher du Prieuré et la maison MAGNIN et a inondé le bourg (rtm-onf.ifn.fr)
10/11/1904	Crue torrentielle de La Roize		Voreppe : Mur d'une maison et un butoir renversés. Rupture de la digue au-dessous de la route. Terres emportées. Chemin qui va à St Laurent-du-Pont emporté (rtm-onf.ifn.fr)
			Aucun évènement particulier – absence de crues reportée dans les archives. Les protections semblent efficaces (Pinhas 1987), défaut de prise de notes par les services compétents?
1967	Travaux		Décision de travaux. Restaurer correction initiale : création piste forestière de Chalais et construction de deux barrages en béton au niveau du verrou et de cinq autres barrages en vue de conforter le chemin (archives RTM)
01/06/1970	Photo aérienne		Lit et rivage avec beaucoup de végétation.

Date de l'événement	Nature de l'événement, Zone de départ et d'arrivée	Cause et durée du phénomène	Informations (suite)
05/07/1971	Crue torrentielle de La Roize. Classé centennale ou plus	Pluies intenses (17h à 21h). Plus de 150mm d'eau sont tombés. L'intensité atteint 50mm/h à partir de 18h. Phénomène résolument local : secteurs de Chabeuil, de Saint-Marcellin et de Saint-Gervais à Voreppe. (revue géographie alpine)	Voreppe : Rues du village envahies par l'eau, la boue, les arbres. Culée rive droite du pont détruite. Affouillements très importants, à Malossanne notamment. Réseau d'eau endommagé. Pont de la RN 75 obstrué, d'où débordement. RN 520 coupée. Quantité de dépôt dans la Roize évaluée à 100 000 m ³ (revue géographie Alpine). Apport de la crue de juillet 1971 estimé à 50 000 m ³ (info issu d'un courrier du service RTM à la mairie de Voreppe sur les capacités de la PDD) (archives RTM)
1973	Photo aérienne		Impact de la crue très flagrant. Roize et Roizette très engravées avec un lit élargit.
01/10/1975	Photo aérienne		Constata un net reboisement des berges
01/10/1984	Photo aérienne		Pas encore de PDD. Reboisement encore plus présent
1985	Construction de la plage de dépôt		Construction plage de dépôt avec barrage effectué par l'entreprise PELISSARD (montant 800 000fr) 170m ³ de béton armé au pied du dispositif de protection existant dont il vient constituer un niveau de base inaffouillable (l'ouvrage de protection en question est-il le deuxième ouvrage de Gras ? voir 3.4.1). Capacité 2 500m ³ (archives RTM), probablement sous-estimée
01/08/1987	Photo aérienne		Visualisation très nette de la PDD
1987	Etude de M. Pinhas		Etude de Michel PINHAS
1990	Curage		Curage dans la plage de dépôt 700m ³ (RTM38 2009)
1994	Curage		Volume extrait plage de dépôt (m ³): 1100 (RTM38 2009)
1996	Curage		Volume extrait plage de dépôt (m ³): 2000 (RTM38 2009); Entreprise Levebvre 1000m ³ ?? (recensement 1997/Sommier de la forêt)
01/03/1996	Photo aérienne		Pré crue
01/05/1997	Crue torrentielle de La Roize avec transport solide important	Pluviométrie importante et matériaux mobilisables	VOREPPE (lieu-dit : La Roize): 15 m de chemin forestier emportés. Dépôts importants. PDD remplie (rtm-onf.ifn.fr)
1997	Curage		Volume extrait plage de dépôt (m ³): 2000 (RTM38 2009)
01/07/1998	Photo aérienne		On ne voit pas d'impact significatif de la crue. Il s'est passé 1 an depuis celle-ci.
1998	Curage		Volume extrait plage de dépôt (m ³): 440 (RTM38 2009)
1999	Curage		Volume curé dans l'étang de l'AD (m ³): 250 (archives AD)
01/06/2000	Photo aérienne		Pré crue
2000	Curage		Volume curé dans l'étang de l'AD (m ³): 220 (archives AD)
2001	Curage		Volume curage divers sur le BV Roize 600m ³ (RTM38 2009) Volume curé dans l'étang de l'AD (m ³): 629 (archives AD)
06/06/2002	Crue de la Roize	Orages exceptionnels ayant entraîné une nouvelle crue de la Roize.	Voreppe : Chemin du Gigot à l'amont du barrage emporté sur 100 m. De nombreux embâcles dans l'ensemble du lit de la Roize. La plage de dépôt s'est remplie et l'eau (et les matériaux) passaient sur le déversoir du barrage (rtm-onf.ifn.fr) Service RTM : "Il serait urgent de reconsidérer le projet de création d'une deuxième plage de dépôt à l'amont car celle-ci est insuffisante. Travaux à la charge de la commune de Voreppe." (archives RTM)
2002	Curage		Curage dans la plage de dépôt : 3500m ³ Entreprise Lefebvre (RTM38 2009) Volume curé dans l'étang de l'AD (m ³): 9 128 (archives AD)
01/08/2003	Photo aérienne		On ne voit pas forcément l'impact de la crue. Il s'est passé 2 ans depuis celle-ci.
2003	Curage		Curage dans la plage de dépôt 986m ³ . Entreprise Converso (RTM38 2009) Volume curé dans l'étang de l'AD (m ³): 1 476 (archives AD)
2004	Curage		Curage 350m ³ . (Volume déclaré par l'entreprise) Entreprise Converso (RTM38 2009)
22/08/2005	Crue du torrent de la Roize remplissant la plage de dépôts à l'amont du village. Autres phénomènes : -débordement du canal de Volouise provoquant l'inondation du quartier vers la rue de Chassotière, -débordement du canal du Paluel et inondation des champs et maisons riverains.	Fortes pluies les jours précédents dans le haut bassin. Durée : 12 H environ - Les 22 et 23 Août 2005	Voreppe : Quelques habitations inondées (garage, cave) au bas de Voreppe. Plage de dépôts domaniale (FD RTM). Remplissage de la plage de dépôts avec débordement sur le déversoir. Légère attaque de la digue rive gauche. Légère érosion de la route à l'amont. Reprise de matériaux dans l'ensemble du cours d'eau (rtm-onf.ifn.fr)
2005	Curage		Volume extrait plage de dépôt (m ³): 4000 (RTM38 2009) Volume curé dans l'étang de l'AD (m ³): 4 000 (archives AD)
2006	Réunion de service RTM		Réunion de service RTM en fin d'année : une PDD de plus grande capacité devra être construite en amont (archives RTM)
2000	Curage		Volume curé dans l'étang de l'AD (m ³): 695 (archives AD)
2007	Curage		Volume extrait plage de dépôt (m ³): 2000 Converso (RTM38 2009) Volume curé dans l'étang de l'AD (m ³): 945 (archives AD)
2008	Curage		Volume extrait plage de dépôt (m ³): 1400 Converso (Curage sans autorisation)(RTM n.d.) Volume curé dans l'étang de l'AD (m ³): 2452 (archives AD)
01/08/2013	Curage		Volume extrait plage de dépôt (m ³): 1400 (RTM38 2009)
2014	Curage		Volume extrait plage de dépôt (m ³): 1700 (RTM38 2009) Volume curé dans l'étang de l'AD (m ³): 2 985 (archives AD)

Les barrages de correction torrentielle construits par Scipion Gras en amont de Voreppe sont ainsi, à notre connaissance, **les premiers barrages de correction torrentielle construits en France**, une dizaine d'années avant les lois de Reboisement de 1860. En complément du long historique de travaux de protection et de l'encore plus long historique de dégâts laissés par le torrent, on peut tirer à partir de ce tableau des informations concernant :

- La saisonnalité des crues recensées qui sera effectuée en 4.1 dans la partie hydrologique.
- Le lien de cause à effet entre les crues amenant des matériaux dans la plage de dépôt et les curages effectués et les volumes curés lors des crues fortes et des années « normales » illustré Figure 37.

Dans la partie suivante, on étudiera un peu plus précisément une des crues emblématiques de la Roize

3.3 Crue de 1971

3.3.1 Informations issues de la littérature

La crue du 5 juillet 1971, date à laquelle la plage de dépôt n'était pas encore construite, fût l'une des crues majeures recensées sur la Roize et celle-ci étant relativement récente, de nombreuses informations sont disponibles.

Voici les informations les plus importantes tirées de la revue géographie alpine (Jail and Martin 1971) (la description complète est fournie en annexe) :

- La cause météorologique du phénomène est l'ascendance de masses humides et très chaudes sur l'éperon ouest de la Chartreuse.
- Le phénomène reste local et a été dévastateur dans un périmètre réduit allant de Chabeuil, Saint Marcellin, Saint Gervais à Voreppe. Ailleurs, par exemple à Grenoble, moins de 20mm d'eau sont tombés.
- Entre 17h et 21h, il est tombé 150mm d'eau avec à partir de 18h une intensité des précipitations allant de 30 à 50mm/h et les pluies ont cessé vers 21h.
- L'intensité des pluies a été plus forte en dessous de 700m (Figure 6 : Courbe hypsométrique calculée à partir du MNT, environ 50% du bassin versant dont la majorité du bassin versant de la Roizette).
- A l'amont de Voreppe, vers Malossane, le lit a quintuplé de largeur par endroit (voir 3.3.2 Analyse des photos aériennes).
- Le pont de la D75 **encombré d'arbres** à servit de barrage et les eaux se sont déversées sur la route au nord et au sud.
- Les dépôts solides accumulés dans la Roize dépassent vraisemblablement les 100 000m³ sans savoir sur quelle longueur cela a été évalué.
- Le ruisseau du Bourget (en contrebas de Roche Brune sur le versant ouest), habituellement à sec, a creusé un lit de 3 à 5m de profondeur.

Voici en plus une liste des points importants concernant les effets de la crue tiré du rapport (Pinhas 1987):

- Il faut d'abord noter les innombrables glissements dus à la nature alluviale des terrains environnant le village (Voreppe) ;
- Les ruisseaux de Pierrefit et du Buissert sont devenus énormes et ont creusé des entonnements jusqu'à 15m, emportés la route, charriés boue, blocs, arbres. Le flot est monté jusqu'à 1 mètre au-dessus de la route (route des Fayolles) ;
- En amont de Malossane, un affouillement général de la rive gauche emporte jusqu'au chemin du Gigot ;
- La route montant à la Placette est déstabilisée par l'affouillement des berges au virage du pont du Gigot ;
- La culée rive droite du pont des Abattoirs est détruite ;
- Les jardins rive gauche sont emportés (après le pont des Abattoirs) ;
- L'eau passe sur les quais en ville ;
- Le pont de la RN75 (D75 aujourd'hui) est bouché par des arbres et l'eau emprunte la route (Figure 17 : Ouvrages en travers du lit de la Roize à Voreppe) ;
- En aval du pont de Voreppe, la digue rive gauche est endommagée.

3.3.2 Analyse des photos aériennes

3.3.2.1 Analyse comparative des photos avant et après la crue

Une large gamme de photos aériennes est disponible sur le site internet du Géoportail³. En ce qui concerne spécifiquement le bassin versant de la Roize, celles-ci sont mises à disposition depuis 1948 jusqu'à 2003 (en 2015). Les photos les plus remarquables avant et après la crue de 1971 datent du 13 juin 1970, 19 juillet 1970 puis de 1973 (date exacte non précisée).

L'analyse comparative des états avant et après 1971 montre les éléments suivants (Figure 26 et suivantes).

Sur la Roizette (voir carte IGN Figure 5):

- En amont de Pierrefit, aucune activité d'érosion notable n'est visible (Figure 26)
- Les ruisseaux de Pierrefit et de Buissert semblent s'être considérablement élargis et engravés. L'étude de Pinhas suggère la présence d'instabilité et de glissements de terrains dans ces zones (en rouge)
- La Roizette à partir du ruisseau de Pierrefit, est bien plus large qu'avant la crue (en jaune)



Figure 26 : zoom sur les ruisseaux de Pierrefit à gauche et du Buissert à droite a) 1970 b) 1973

Sur la Roize :

- Le pont submersible juste à l'amont de la confluence avec la Roizette semble avoir résisté (Figure 27).
- Le lit de la Roizette a énormément augmenté à proximité de la confluence.
- Le lit de la Roize s'est particulièrement élargi et atteint parfois 5 fois sa largeur initiale (Jail and Martin 1971) (Figure 28)
- La quantité de matériaux accumulés semble encore très importante jusqu'à l'amont du pont de Voreppe (la photo ne couvre pas Voreppe plus à l'aval)
- On constate la présence d'endroits privilégiés pour le dépôt, notamment à l'emplacement de la future plage de dépôt (en rouge sur la Figure 28)
- Le chemin longeant la Roize rive gauche depuis Voreppe semble déjà reconstruit.
- Les ouvrages construits par Gras en 1851 à 600, 1300 et 1800m semblent constituer des zones de dépôts préférentiels mais on ne sait si ils ont été éventrés par cette crue ou par une plus ancienne (c.f. 3.4.1 Les ouvrages de Scipion Gras (1851))

³ <http://www.geoportail.gouv.fr>

Par la suite, sur les photos plus récentes, on constate un reboisement progressif du lit. (Figure 27)

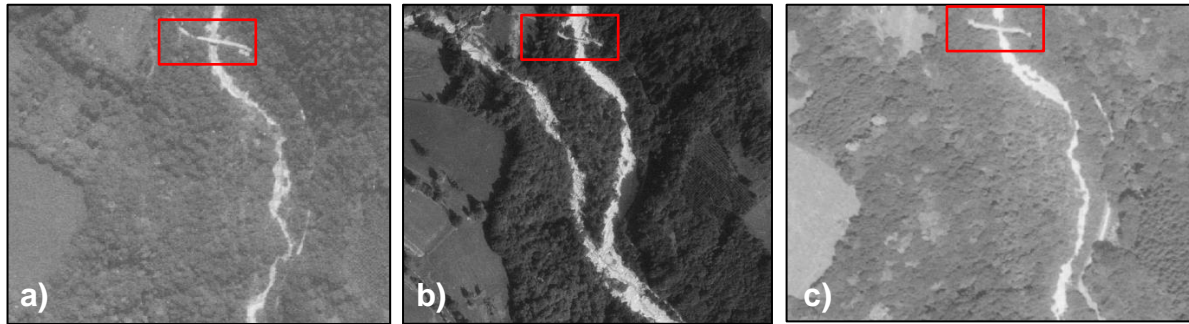


Figure 27 : zoom sur la confluence, photos aériennes de a) 1970 b) 1973 c) 2000

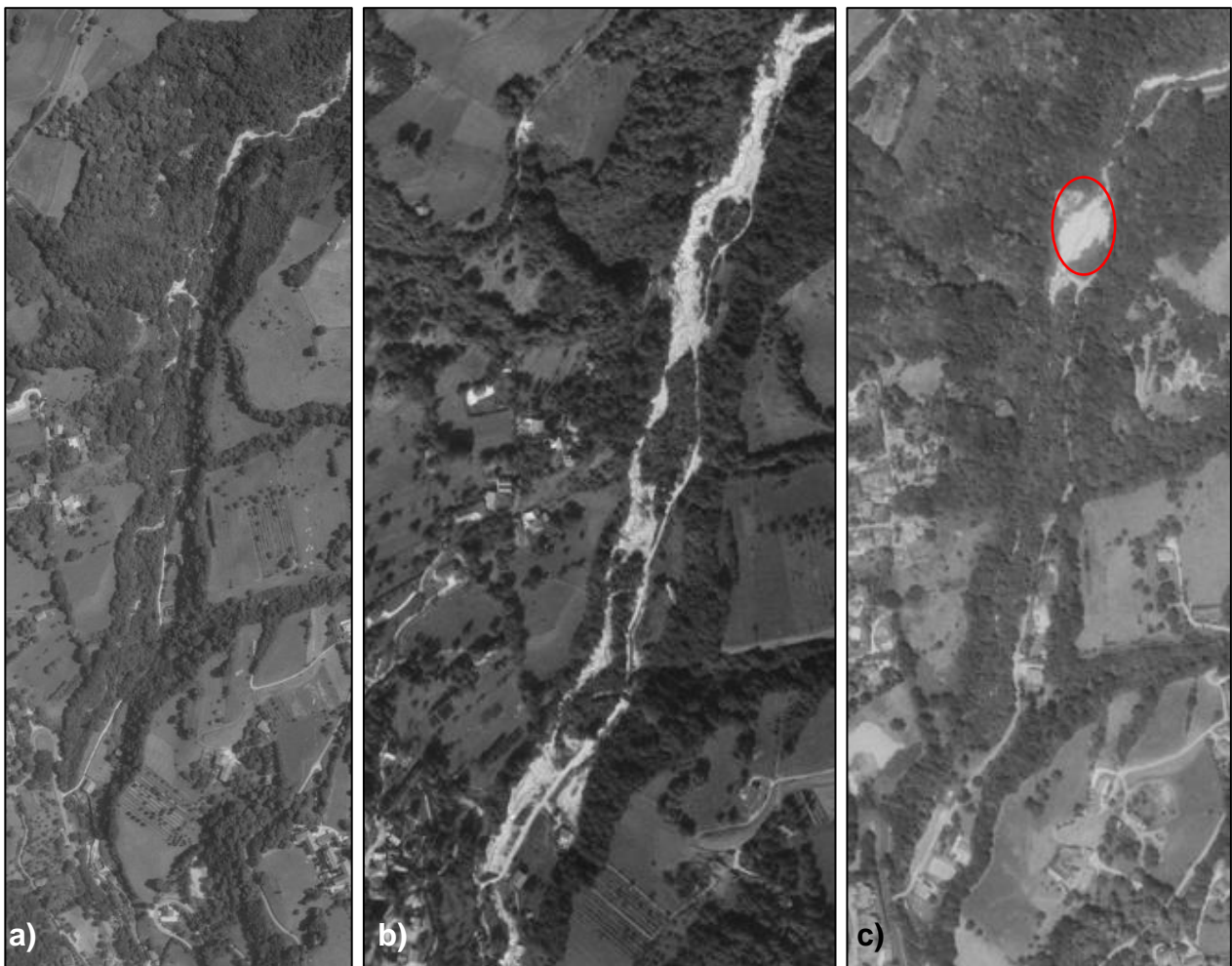


Figure 28 : zoom sur la partie aval depuis la confluence jusqu'au pont de Gigot, a) 1970 b) 1973 c) 2000

3.3.2.2 Analyse du volume de 100 000m³ de dépôts dans le lit de la Roize avancés dans la revue *Géographie Alpine*

A partir de mesures sommaires de largeurs du cours d'eau en 1973 par photo aérienne (la Roize supérieure et la Roize à l'aval de la future PDD) on a pu estimer à 17 mètres la largeur moyenne dans le secteur aval après la crue de 1971. En amont cette largeur est moindre, peut-être de l'ordre de 10 m en moyenne.

La longueur du cours d'eau à partir du pont de Voreppe étant de 5.8km. En majorant la largeur moyenne du cours d'eau à 17 m moyen pour prendre en compte les affluents et ravins latéraux, un volume de matériau de 100 000m³ nous donne une hauteur de respiration moyenne de 1 mètre : $100\,000\text{m}^3 * \frac{1}{17\text{m}} * \frac{1}{5800\text{m}} \approx 1\text{m}$.

En maintenant une largeur de 10 m moyen, $100\,000\text{m}^3 * \frac{1}{10\text{m}} * \frac{1}{5800\text{m}} \approx 1.7\text{m}$, ce chiffre passe à 1.7 m.

Au cours des mesures effectuées sur le torrent, nous avons à de nombreuses reprises pu confirmer que le lit du torrent est à même de respirer sur des hauteurs de 1 à 1.5 m, localement plus. La production de $100\,000\text{m}^3$ à l'échelle d'une crue sous-entend toutefois que c'est l'ensemble du lit qui est remobilisé sur une forte hauteur de respiration compte tenu de l'absence de source extérieure majeure de sédiment (grand glissement de terrain, etc.). Ce scénario ne peut pas être écarté mais semble tout de même être peu probable. On considérera que les $100\,000\text{m}^3$ constituent une enveloppe haute de l'intervalle d'incertitude et ne peuvent être considérés comme une production événementielle "normale".

3.3.2.3 Bilan

A partir de toutes ces informations on constate à quel point un simple ruisseau tel que la Roizette peut rapidement se transformer en torrent charriant de grosses quantités de matériaux issus de glissement de terrain ou de falaise en érosion marquée. La combinaison de son débit avec celui de la Roize charriant également de très importantes quantités de sédiments issus du stockage effectué dans son lit et du haut bassin versant semble s'être révélé dévastatrice. Ces matériaux viennent ensuite créer des embâcles dans les ouvrages à l'aval ou alors font hausser le niveau de l'eau ce qui peut causer des débordements importants et faire ainsi de nombreux dégâts. A noter que cet épisode de crue a été la conséquence de précipitations intenses et courtes (4h) ce qui est différent des crues engendrées par de long épisodes pluvieux.

Cette analyse historique démontre le caractère parfois destructeur du cours d'eau, ce qui a justifié la création des ouvrages de correction torrentielle qui équipe le bassin versant. Dans la partie suivante, on se concentre sur quelques ouvrages particuliers qui ont été construits sur le lit de la Roize

3.4 Analyse historiques des principaux ouvrages

3.4.1 Les ouvrages de Scipion Gras (1851)

Ces ouvrages ont été construits en 1851 à 600, 1300 et 1800 mètres de Voreppe et furent les tout premiers élaborés en France dans le but spécifique de faire de la correction torrentielle, ceci avant même les lois de 1860 sur le reboisement des montagnes. Leur l'objectif était de forcer l'écoulement à se disperser pour lui enlever sa force d'entraînement : ce sont des ancêtres des plages de dépôt (Gras 1857, Culmann 1865).

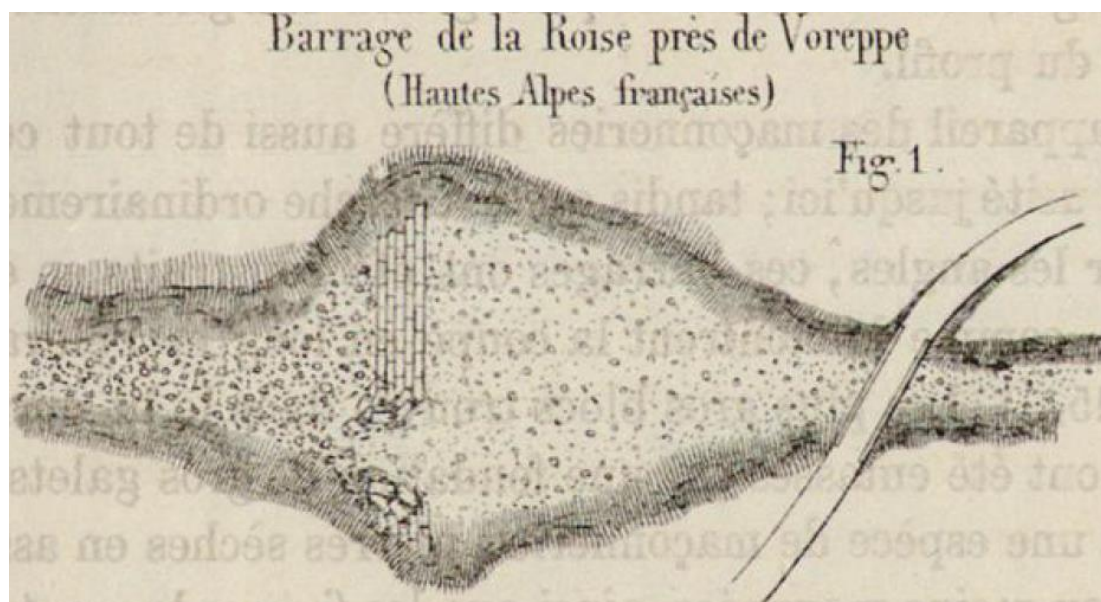


Figure 29 : Schéma type d'un ouvrage de Scipion Gras (Culmann 1865)

Le premier et le troisième de ces ouvrages ont été établis à peu près au niveau des graviers, et le second n'a au-dessus d'eux qu'une hauteur de 2m50. Ils étaient par conséquent sans influence sensible pour diminuer la pente qui était dans cette partie du torrent de 8 à 10 %. Leur destination unique était de disperser les eaux lorsqu'elles étaient très grosses. Leur largeur était de 35m au moins.

Au court de l'été 2015, en parcourant le linéaire de la Roize, nous avons trouvé les restes du premier ouvrage (un élargissement conséquent des rives se trouve juste à l'amont de celui-ci, ce qui est cohérent avec les explications de Gras). Il est probable que le deuxième était à l'emplacement du barrage de la PDD. Le troisième ouvrage a également été trouvé entre le pont submersible et la confluence avec la Roizette.



Figure 30 : Restes probables du barrage 1 de 1851

Leurs localisations sont indiquées sur la Figure 9.

Le rapport de (Culman 1865) donne des éléments de détails sur la conception de l'ouvrage (Figure 31 a et b). Il était constitué de gros blocs reliés entre eux par des maillons métalliques. Le concept de barrage de dépôt est jugé intéressant par l'auteur, les dispositions constructives et en particulier l'utilisation des épingles métallique sont par contre jugées insuffisantes. Des blocs encore équipés de ces épingles sont toujours visibles dans le lit du torrent (Figure 31 c).

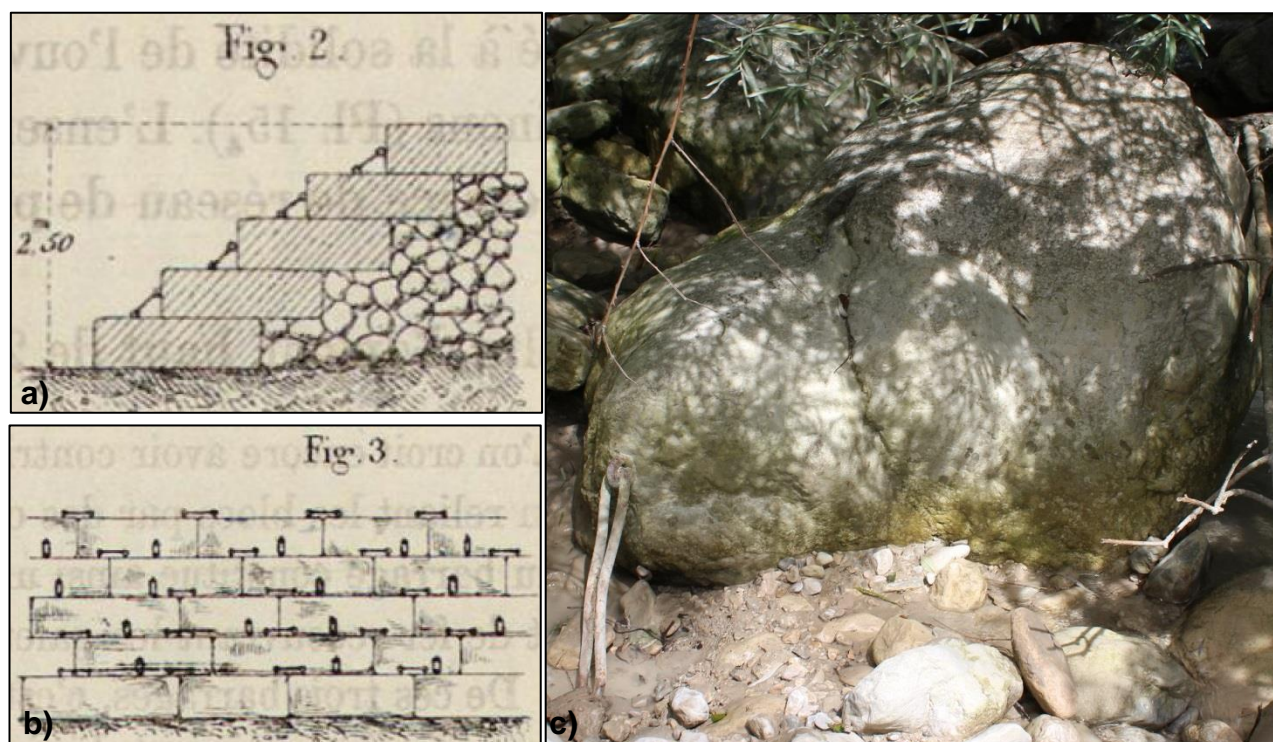


Figure 31: Schéma des ouvrages conçu par Scipion Gras pour réguler le transport solide sur la Roize: a) Coupe en long (Culmann 1865), b) vue d'aval (Culmann 1865) et c) bloc équipé d'une épingle métallique retrouvé en 2015 entre la confluence avec Roizette et la PDD

Le rôle régulateur du transport solide des barrages de correction torrentiel a par la suite fait l'objet de controverses: Cézanne (1870) combat cette théorie. Costa de Bastelica (1874) défend la théorie de Gras (1857). Les ouvrages généralistes de Demontzey (1882) et de Thiéry (1891) n'y font pas référence. Il faut attendre la synthèse de Bernard (1927) pour retrouver des descriptions du rôle régulateur des barrages. Les ouvrages de la Roize sont toutefois les premiers barrages réalisés en France dans un objectif réfléchi de correction torrentielle et dont les archives gardent des traces.

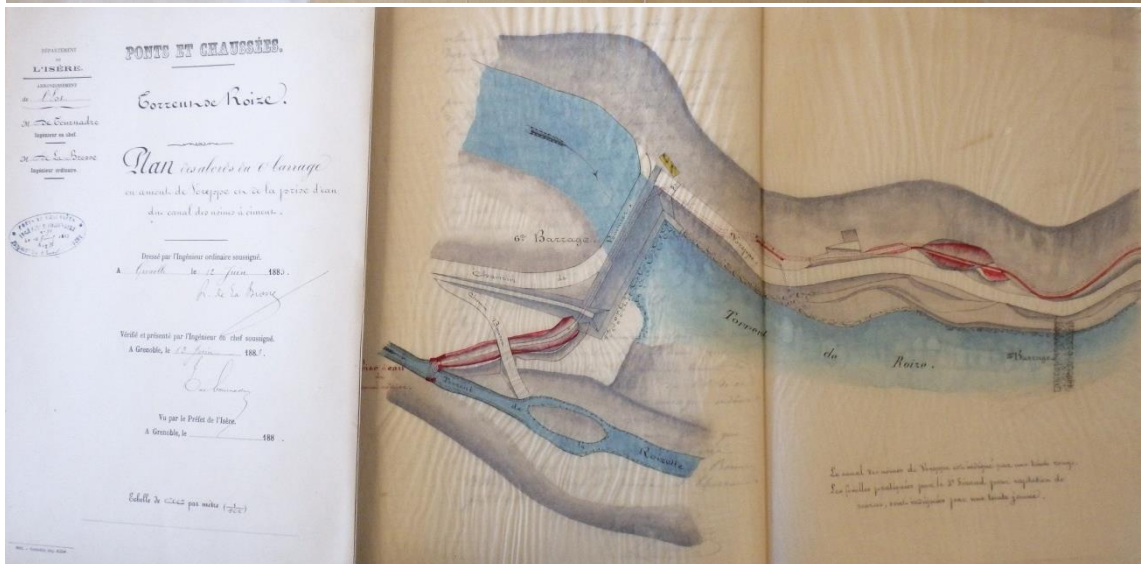
3.4.2 Données d'archives complémentaires

On relève des documents anciens aux archives départementales de l'Isère, notamment des documents des Ponts et Chaussées, par exemple :

Figure 32 : Plan général de 1867 de « Réglementation d'office des prises d'eau d'arrosage » : canal de dérivation de la Roize au niveau du vieux village de Voreppe

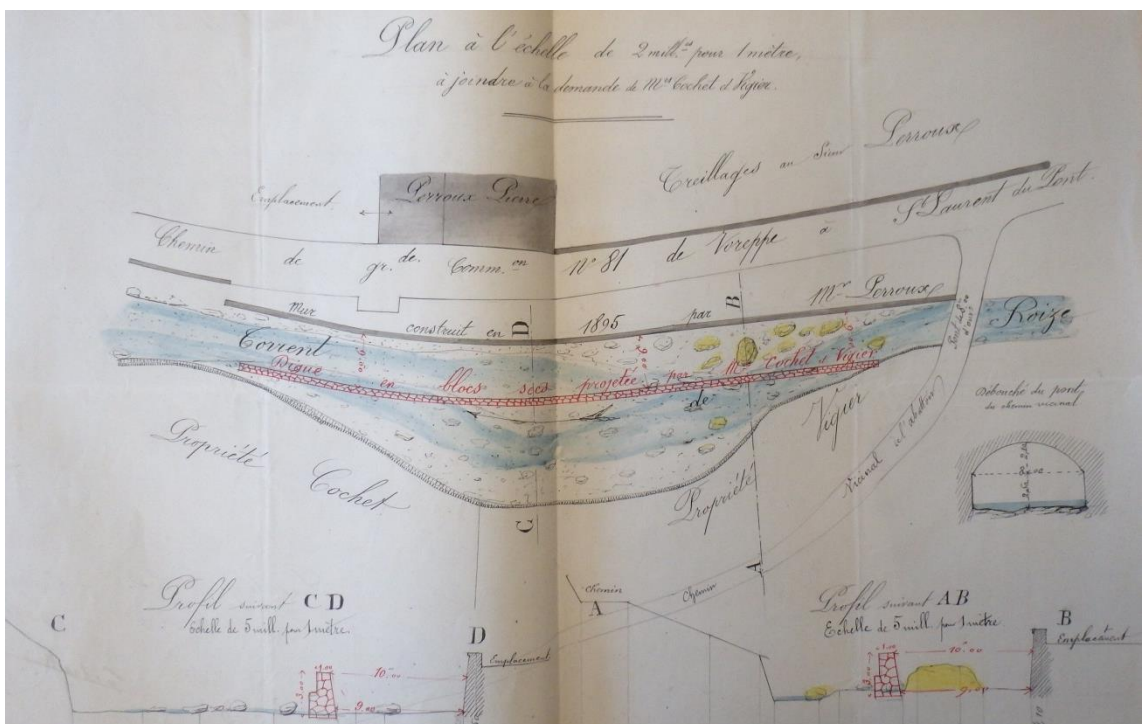


Figure 33 : « Plan des abords du barrage en amont de Voreppe et de la prise d'eau du canal des usines à ciment » de 1883, dont on peut observé les restes en amont de la confluence Roize – Roizette



On ne sait pas si cet ouvrage a été construit sur les barrages de correction torrentielle construits par Scipion Gras en 1851.

Figure 34 Plan non daté (post 1895) du confortement de la berge rive droite de la Roize en amont du Pont (du vieux village ?)



3.4.3 La plage de dépôt (1985)

3.4.3.1 Caractéristiques de l'ouvrage

La décision de construire cette plage de dépôt a vraisemblablement été motivée par la crue de 1971. Nous n'avons pas eu accès à l'étude de conception. Nous supposons que son objectif premier est de réguler le transport solide de la Roize en empêchant les blocs et les flottants d'arriver jusqu'à Voreppe en les bloquant à l'aide d'un barrage à pertuis. L'étalement et la réduction de pente de la plage de dépôt permettent également aux matériaux de se déposer plus facilement. Les matériaux sont ensuite curés afin d'éviter la saturation de la PDD.

Tableau 6 : Caractéristiques de la plage de dépôt

Capacité	Longueur	Pente	Barrage
2500 m ³	92m	6%	Structure auto-stable en béton, Hauteur : 3m, 5 pertuis + une grille, Perméabilité : moyenne, empêche le passage des blocs d'un demi-mètre d'envergure ainsi que flottants

Note : le volume de 2500m³ avancé dans la fiche de l'inventaire de 1997 (Gruffaz 1996) semble particulièrement faible. Une mesure de la surface du bassin sur les photos aériennes du Géoportail donne aisément 2 600 m². Un dépôt de 2 m de haut engendrerait donc le piégeage de 5 200 m³. Si on porte la hauteur de dépôt à 3 m (hauteur du barrage) et qu'on compte le volume stockable dans le lit en amont, ce chiffre peut rapidement être doublé.

Dans la figure suivante, on distingue le barrage au fond de la plage de dépôt. Le bassin est partiellement curé.



Figure 35 : Plage de dépôt : a) vue depuis l'aval du bassin b) vue depuis l'amont du bassin en avril 2015

Les archives du RTM contiennent des photos de l'ouvrage pendant et après les crues :



Figure 36 : Plage de dépôt : a) vue d'aval du barrage terminal durant la crue de décembre 1991 (© RTM 38) b) vue d'amont du barrage avant le curage du 20/08/2013 (© RTM 38)

Sa conception est classique : de tels barrages à pertuis équipés de grilles amovibles à la structure autostable en béton armé sont rencontrés dans l'ensemble du département de l'Isère. On notera que tant que le barrage ne surverse pas, ce type de conception constitue un piège efficace des flottants. **En cas de saturation de la**

structure, une surverse soudaine provoquera vraisemblablement une libération en masse des flottants. Compte tenu de l'expérience passée de la crue de 1971 qui a largement débordé suite à la formation d'un embâcle sur le pont de la RN75, ce type de phénomène est à éviter. Une modification de l'ouvrage pour maintenir un piégeage des flottants malgré une potentielle surverse serait vivement souhaitable (Voir Piton and Recking (2016a, 2016b) pour des détails sur ce type de modification).

On notera par ailleurs que le bief situé à l'aval de la plage de dépôt est particulièrement propice au recrutement de bois mort ou d'arbres sur pied via des érosions de berge (cf. érosion massives de 1971 (§3.3.2.1) qui peuvent se répéter). Ainsi, le rapport du RTM38 (2006) préconise déjà la mise en place d'un piège à flottant en aval de la plage de dépôt. **Nous rejoignons complètement ces conclusions.** La probabilité de l'occurrence d'érosions de berges importantes est d'autant plus marquée que les écoulements issus de la plage de dépôts seront "clairs" jusqu'à la saturation de celle-ci et donc à même de rapidement se recharger en matériaux issus des terrasses alluviales aval.

Le sujet devrait être l'objet d'une étude à part entière qui n'est pas l'objet du présent rapport.

3.4.3.2 Correspondance entre les crues et les curages depuis la construction de plage de dépôt

La Figure 37 retrace les volumes curés à la fois dans la plage de dépôt du RTM depuis la construction de celle-ci et dans l'étang géré par l'AD à la connexion Isère Roize.

Selon notre visite de terrain et les suivis photographiques réalisés sur la plage de dépôt (voir §8), on estime que lors des apports par charriages à la plage de dépôt, la grande majorité des graviers se déposent dans celle-ci. A l'occasion de nouvelles crues sans apports solides, un certain auto-curage a toutefois lieu (Piton et al. 2017). Au droit de l'étang terminal géré par l'AD, on observe ainsi quelques nappes discrètes de graviers. Ils sont probablement issus partiellement de cet auto-curage et partiellement des quelques érosions de berges observées en aval de la plage de dépôt. Compte tenu de la nature des sédiments observés sur le delta de l'étang terminal, on fait l'hypothèse raisonnable qu'une part de ceux-ci est transportée en suspension, le reste l'étant en charriage. On considère donc que les curages réalisés à la plage de dépôt constituent une enveloppe basse de l'estimation du charriage réel de la Roize. Le cumul des données RTM et AD constituent au contraire une enveloppe haute sécuritaire de cette estimation.

Les volumes curés dans

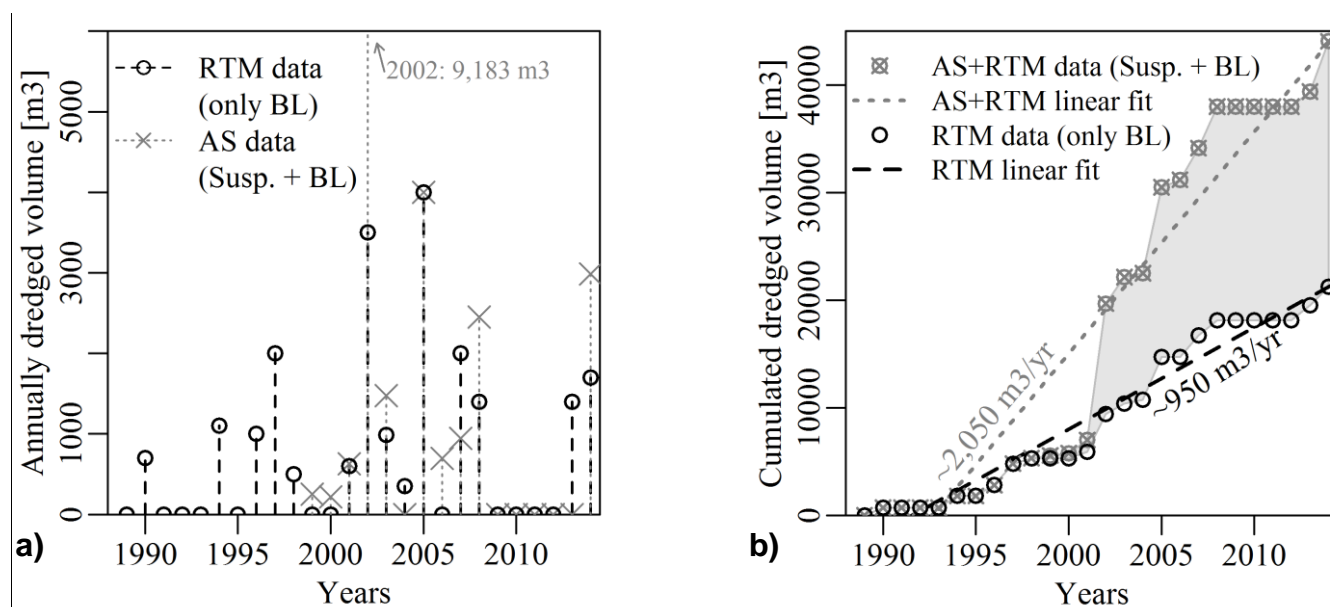


Figure 37 : Historique des curages et crues

La production sédimentaire cumulée est ainsi comprise entre 21 236 m³ et 44 071 m³ en 25 ans, soit entre 950 m³/an et 2 050 m³/an en moyenne, avec une variabilité interannuelle très forte allant de 350 m³ (2004) à 4000 m³ (2005). Ainsi que des années sans aucun curage, à la production sédimentaire plutôt limitée.

3.4.4 Ouvrages de correction dans le haut bassin versant (Pinhas, 1987)

L'étude complète des ouvrages dans le haut bassin versant a été effectuée par M. Pinhas dans son rapport en 1987. Dans les deux figures suivantes, la description détaillée des ouvrages pour le torrent de la Charminelle et pour les branches de la Roize et de la Petite Roize sont disponibles.

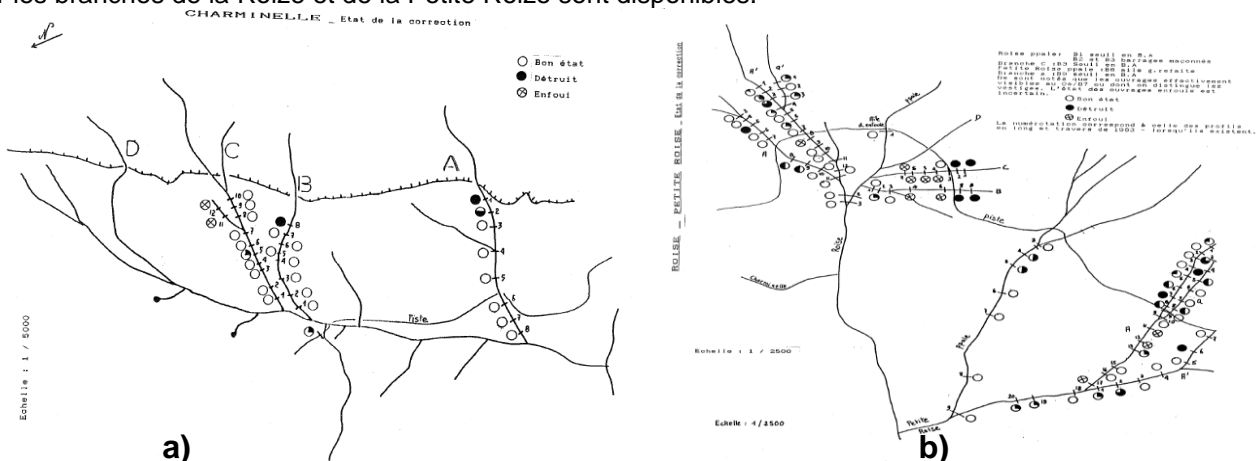


Figure 38 : Correction mise en place a) pour le torrent de Charminelle et b) pour la petite Roize et la Roize (Pinhas 1987)

3.5 Synthèse de l'étude historique

Cette analyse historique, partie clé de toute étude hydraulique a permis de mettre en évidence :

- Un long passif de travaux de correction avec :
 - Les classiques endiguements sur le cône de déjection dès le 18^{ème} siècle ;
 - La mise en œuvre des premiers barrages de correction torrentielles en 1851, conçu par Scipion GRAS et visant à réguler le transport solide ;
 - La réalisation de séries de seuils et barrages de stabilisation des zones de productions dans le haut bassin au cours du 20^{ème} siècle.
 - La réalisation d'une plage de dépôt en 1985 de conception classique suite à la crue très importante de 1971.
- L'existence de données sur la production sédimentaire depuis les curages ayant débutés en 1990 avec un volume annuel moyen compris entre 950 m³/an et 2 050 m³/an, avec une variabilité inter-annuelle forte : entre 350 et 5 000 m³/an.
- L'importance clé de la présence de flottants dans l'aggravation du risque torrentiel, les problèmes d'inondation ayant eu lieu en 1971 étant reliés à la formation d'un embâcle sur le pont de la RD75. Sur ce point, la Roize semble tout autant sensible que par le passé.
- La capacité du lit du torrent à beaucoup s'élargir, surtout dans la partie aval, lors des crues extrêmes type 1971. Le volume transporté lors de celle-ci semble être estimé à plusieurs dizaines de milliers de m³. La valeur de 100 000m³ avancée par Jail and Martin (1971) dans la revue de Géographie Alpine semble par contre douteuse par excès.

4 Analyse hydrologique

L'objectif de cette analyse hydrologique du bassin versant de la Roize est de déterminer les débits qui y transitent pour différentes probabilités d'occurrence ou temps de retour. Ces débits permettront ultérieurement de faire des estimations du transport solide. Deux aspects ont été traités :

- La courbe des débits classés a été estimée dans l'objectif de calculer le transport solide annuel moyen ;
- Les débits de pointes de crues de temps de retour 10, 30 et 100 ans ont été caractérisés dans l'objectif d'estimer le transport solide événementiel.

4.1 Saisonnalité des crues historiques majeures

L'analyse des archives faite dans la partie précédente caractérise les périodes les plus sujettes aux crues occasionnant des dégâts. Dans cette partie, on se focalise uniquement sur les crues historiques recensées à cause de leurs impacts importants et non sur celles qui arrivent régulièrement à l'échelle de l'année. Le Tableau 7 relève les données récupérées dans les archives recensées Tableau 5. La Figure 39 constitue sa représentation graphique.

Tableau 7 : saisonnalité des crues relevées par le BD RTM

Mois	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	?	Total
Nombre de crues recensées	0	0	0	0	1	3	2	6	1	2	3	0	4	22
Pourcentage %	0	0	0	0	4.5	14	9	27	4.5	9	14	0	18	100

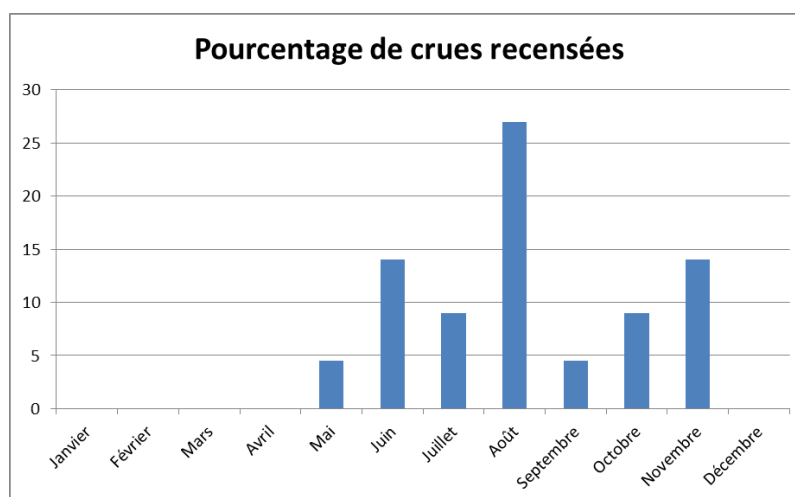


Figure 39 : Diagramme des crues majeures rencontrées suivant la saison

On constate que la majeure partie des crues importantes recensées se concentrent des mois de mai à novembre. Il semble que les orages d'été soient responsables d'une bonne partie de celles-ci. Cela corrobore les notes de M. Pinhas dans son rapport : « Les pluies d'orage sont responsables d'une bonne part des crues de la Roize, sans exclure les pluies de fin d'automne ou de début de printemps » (Pinhas 1987).

4.2 Analyse régionale des bassins versants torrentiels des massifs calcaires des Pré-Alpes du nord

4.2.1 Bassins versants étudiés

Afin d'avoir des valeurs de débits pour la Roize et n'ayant ni pluviomètre ni station hydrologique disponible dans son bassin versant, une analyse régionale d'autres bassins versants sélectionnés de façon appropriée s'impose.

Sur la Figure 40 sont présentés les bassins versants les plus proches (en noir) de celui de la Roize (en rouge) et étant potentiellement soumis à un régime météorologique et à des conditions géologiques comparables. Les massifs du Vercors, de Chartreuse et des Bauges (du Sud au Nord) font partis des Pré-Alpes Calcaires du Nord (voir Figure 2) et les pluies qui y tombent proviennent majoritairement des flux d'Ouest.

Globalement, à chaque bassin versant (BV) représenté en noir correspond une station hydrologique en vert fournissant des débits instantanés (Qix) et journaliers (Qjm). De même, les pluviomètres les plus représentatifs des pluies associées aux bassins versants (en fonction de leur distance et du relief) sont représentés en jaune et fournissent une mesure journalière d'une lame d'eau en millimètres. Certains pluviomètres peuvent être représentatifs pour plusieurs bassins versant.

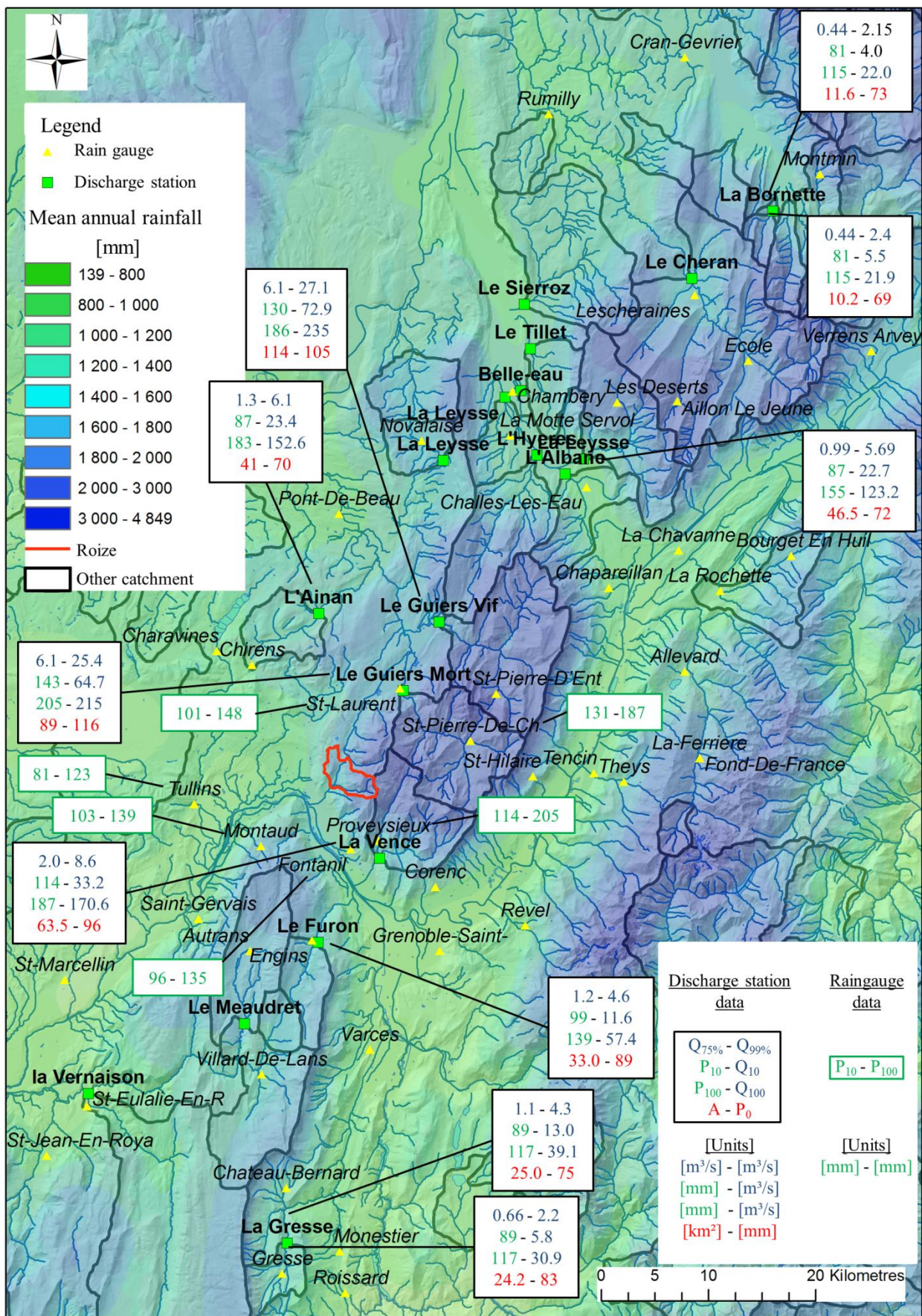


Figure 40 : Cartographie des bassins versants et postes pluviométriques étudiés

Cette première carte permettra ensuite de récupérer les données disponibles à l'aide de la banque de données d'Hydro2 (pour les stations hydrologiques) et de Météo France (pour les pluviomètres). Les stations hydrologiques analysées dans le cadre de ce travail sont listées dans le tableau suivant :

Tableau 8 : liste des stations hydrologiques étudiées

Code	Nom cours d'eau	Commune de la station	Surface BV km ²	Altitude Station m	Date ouverture station	Date fermeture station
V1235410	La Bornette	Doussard	10.23	515	1974	09/1988
V1235420	La Bornette	Lathuile	11.6	459	1987	Ouverte
W2804020	La Gresse	Gresse en Vercors [Pont Jacquet]	24.2	1080	1987	Ouverte
W2804010	La Gresse	Saint Guillaume [Pont des Beaumettes]	25	1040	1982	09/1988
V1315020	La Leysse	Motte-Servolex [Pont du Tremblay]	280	237	1969	Ouverte
W3015010	La Vence	Proveysieux [Pont de l'Ouille]	63.5	257	1963	04/1993
V1525410	L'Ainan	Saint Geoire-en-Valdaine	41	400	1972	09/1988
V1318210	L'Albane	Chambéry [Pont Chevalier]	46.5	219	1986	Ouverte
V1255010	Le Chéran	Allèves [La Charniaz]	249	575	1950	Ouverte
W3005010	Le Furon	Engins	33	835	1969	09/1988
V1504010	Le Guiers mort	Saint Laurent-du-pont	89	413	1970	Ouverte
V1515010	Le Guiers vif	Saint Christophe-sur-Guiers [Pont Saint-Martin]	114	405	1970	Ouverte
W3315010*	Le Meaudret	Méaudre	74	957	1972	Ouverte
V1325020	Le Sierroz	Aix-les-bains [Laffin]	130	245	1978	05/2014
V1315050*	La Leysse	Ravoire	78	300	1991	2015
V1535210*	La Leysse	Nances [Novalaise]	26.6	380	1993	2005
V1315040	La Leysse	Saint Alban-Leysse [Bout du Monde]	75.5	320	1991	1994
V1525420	L'Ainan	Saint Geoire-en-Valdaine [Pont de la Martinette]	45	398	1972	2002
V1305030*	Le Ruisseau de Belle-eau	Voglans	5.02	234	1992	1999
V1305210*	Le Tillet	Aix-les-bains	26	251	1995	2005
V1316440	L'Hyères	Chambéry [Charrière-Neuve]	75.2	260	1996	2005
V1515000*	Le Guiers Vif	St Pierre d'Entremont		865		

Note : les stations marquées d'une * ont finalement été retirées de l'échantillon du fait de leur trop forte influence karstique (Guiers Vif et Meaudret) ou par manque de données (les autres).

4.2.2 Analyse des débits sans corrélations avec les pluies

Ces débits sont fournis par les stations hydrologiques. Certaines données pour des stations peuvent être manquantes. Le traitement des données s'effectue en programmant sous R (Scripts fournis en annexe).

4.2.2.1 Données disponibles

L'ensemble des n débits journaliers (Q_{jm}) ont été extraits des séries temporelles. Les valeurs ont été triées par ordre croissant, leur rang étant noté r . La probabilité empirique journalière d'occurrence est estimée selon la formule:

$$P = \frac{r}{n + 1}$$

, selon la formulation dite de Weibull (Carré and Fretti 2010). La probabilité P peut être déduite d'une probabilité empirique tel que décrit plus haut ou directement via la formule:

$$P = 1 + \frac{1}{T}$$

, avec T le temps de retour de l'évènement (exprimé en jours T_j ou en années T_A). Les N valeurs maximum des séries de Qjm (notées Qjx), N étant le nombre d'année disponibles et les débits maximum annuels instantanés (Qix) ont été par ailleurs extraits. Dans le cas de ces séries au faible nombre de valeurs (environ 365 fois moins que celles de Qjm), l'unité de temps de retour est l'année; T_A est exprimé en années et la probabilité d'occurrence est une probabilité annuelle notée P_A . Dans le cas des séries temporelles aux nombreuses observations annuelles, on peut s'intéresser au temps de retour exprimé en jours T_j et estimer la probabilité journalière P_j .

Les analyses hydrologiques sont régulièrement réalisées via des graphiques dits de "Gumbel". Ces graphiques consistent à transformer la probabilité d'occurrence P en une variable réduite U avec :

$$U = -\ln(-\ln(P_A)) = -\ln\left(-\ln\left(1 - \frac{1}{T_A}\right)\right)$$

Dans le cas des séries temporelles comprenant un plus grand nombre d'observation que d'années, par exemple les Qjm, une translation de la variable réduite est appliquée suivant le nombre d'observation réalisée dans le même intervalle (Carré and Fretti 2010). Ici nous avons transformé les séries temporelles journalières avec:

$$U = -\ln(-\ln(P_A)) \approx -\ln(-\ln(P_j)) + \ln\left(-\ln\left(1 - \frac{1}{365}\right)\right)$$

L'ensemble des séries de données sont illustrés dans des graphiques fournis en annexe. Seuls les graphiques résultats de la Bornette à Lathuille et de la Vence à Proveysieux sont fournis dans la Figure 41.

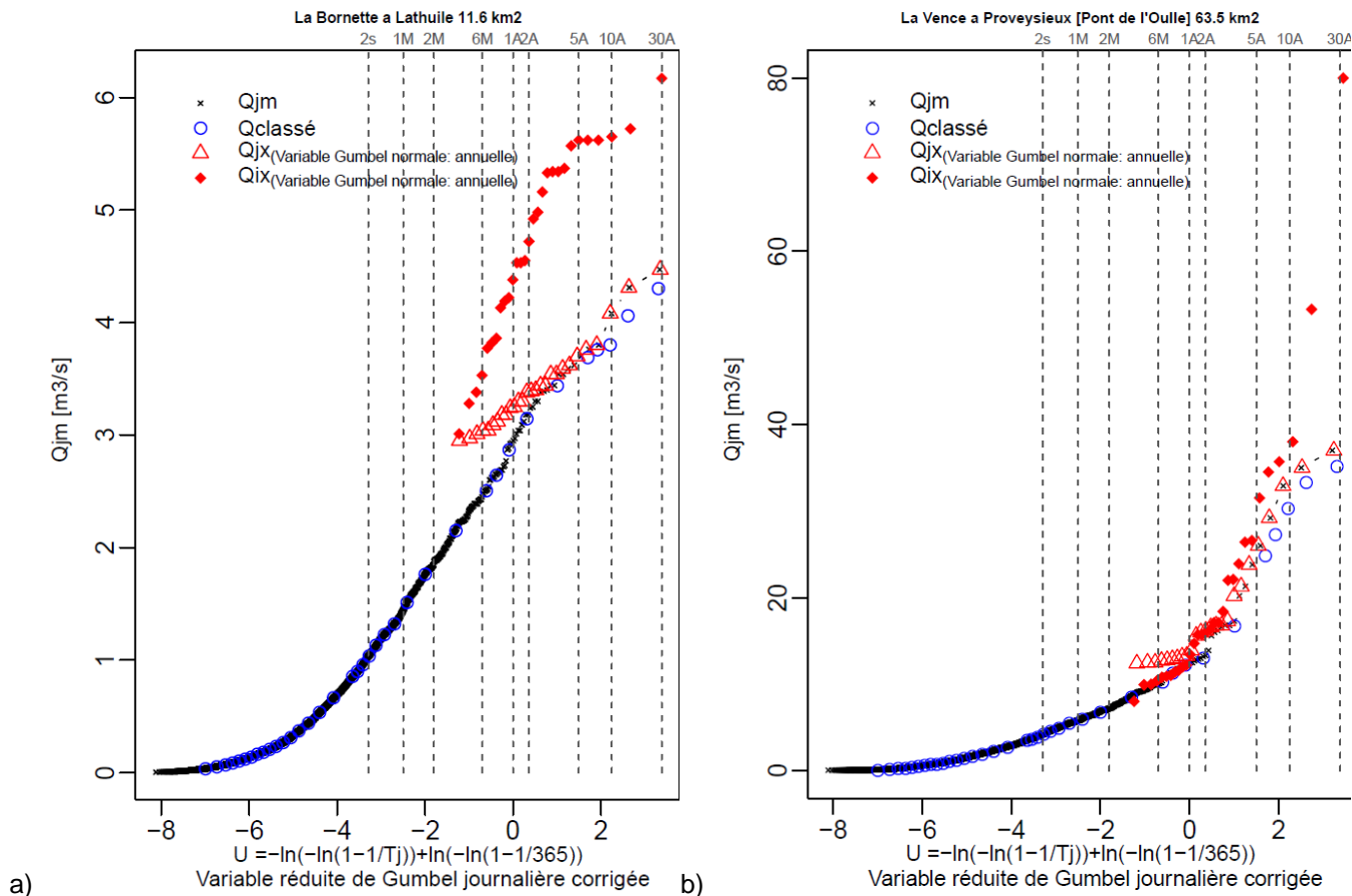
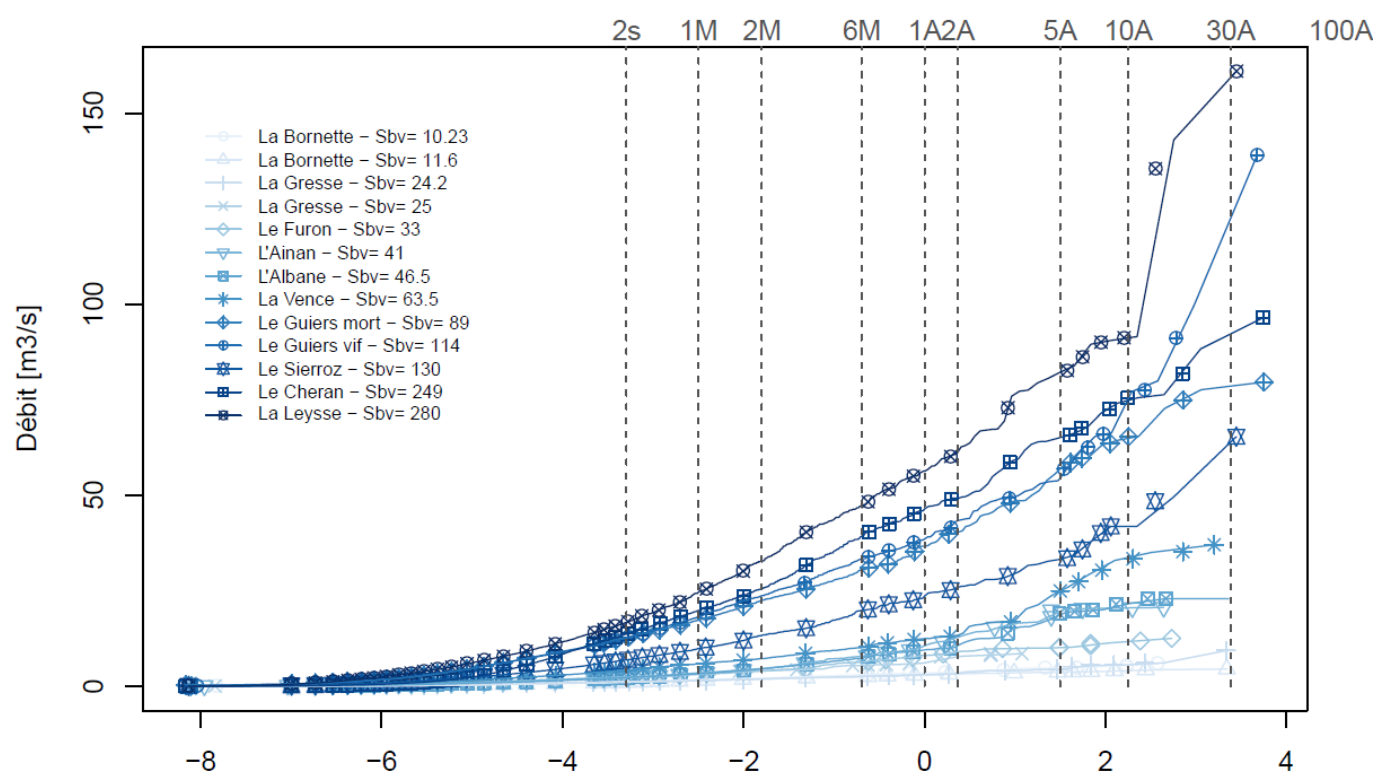


Figure 41: Graphique de Gumbel des débits moyens journaliers (Qjm), maximum annuels instantanés(Qix), N maximum moyens journaliers (Qjmx) de la station a) de la Bornette à Lathuille et b) de la Vence à Proveysieux

On retient de l'analyse de ces graphiques que les valeurs des Qix sont généralement supérieures aux Qjmx ce qui illustre le fait que les débits de fortes crues ont tendances à durer significativement moins qu'une journée complète. Pour l'ensemble des stations, la valeur maximale annuelle instantanée est bien généralement au minimum égale aux valeurs moyennes journalières (sauf pour l'Ainan à St Geoire en Valdaine, dont les Qix semblent douteux).

Les données de Qix sont analysées pour en extraire les valeurs de pic de crue dans l'approche événementielle. Au contraire de l'analyse visant à tirer les valeurs caractéristiques des débits classés, qui est réalisée sur la base des Qjm. La Figure 42 rassemble les données de débits journaliers moyens et leur variable de Gumbel associées sur l'ensemble de l'échantillon.

Graphique de Gumbel des débits moyen journaliers (Qjm)



$U = -\ln(-\ln(1-T_j)) + \ln(-\ln(1-1/365))$: Variable réduite de Gumbel journalière corrigée

Figure 42: Débits moyens journaliers sur graphique de Gumbel

On distingue, comme le prévoit la théorie, que les données s'alignent sensiblement sur une droite pour les débits forts ($T > \sim 2$ mois) et que au-delà de $T=10$ ans, des cassures apparaissent pour un certain nombre de stations.

Pour les débits plus réguliers ($T < 2$ mois), la transformation en variable réduite de Gumbel n'est pas pertinente, elle ne permet pas de dégager des ajustements linéaires. D'autres techniques sont adaptées à l'étude des débits moyens et d'étiage.

4.2.2.2 Courbes des débits classés

On s'intéresse dans un premier temps à la courbe des débits classés. Celle-ci est extraite comme une série des quantiles de probabilité 0 à 1 des Qjm; avec des pas plus serrés dans la partie haute de la courbe puisqu'on va s'intéresser aux valeurs fortes qui provoquent du transport solide (les points représenté sur la Figure 42 constituent les valeurs extraites et analysées par la suite).

Sur la Figure 43 qui rassemble l'ensemble des courbes, on distingue très clairement le gradient naturel des débits faibles vers les débits forts, corrélés avec la surface indiquée dans la légende (de 10km² à 280km²).

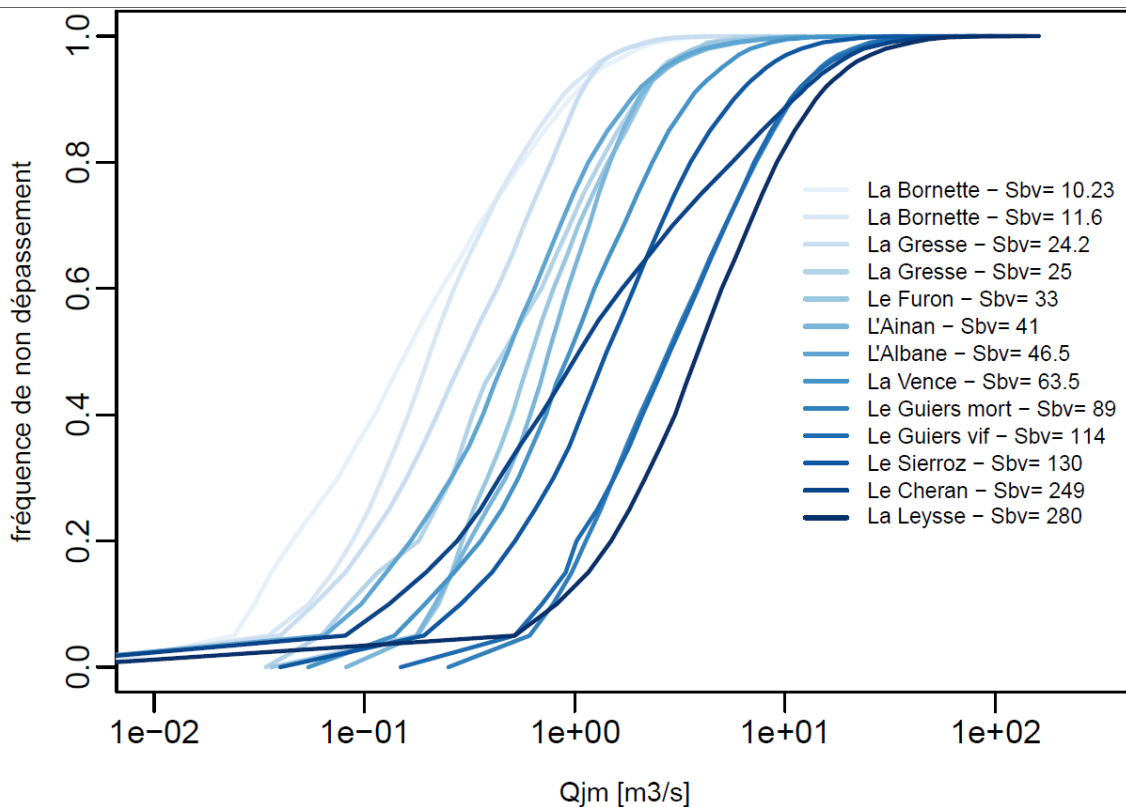


Figure 43 : Courbe des débits classés journaliers (Qjm)

Les débits sont naturellement fortement corrélés à la surface du bassin versant drainé. On peut supposer que le celui-ci obéit à une loi puissance en fonction de la surface :

$$Q_{x\%} = A_{x\%} S_{BV}^{\alpha}$$

- Dans notre étude, on s'intéresse principalement aux épisodes de hautes eaux susceptibles de générer du transport solide. Il est reconnu (Mathys et al. 2013) que pour celles-ci, le α devrait être inférieur à 1 (le débit n'augmente pas aussi vite que l'augmentation de surface) c'est-à-dire que pour un bassin versant quelconque, si sa surface est multipliée par dix, il est peu probable que son débit soit également multiplié par dix mais sera moindre. En effet, l'intensité de la pluie sur toute la surface du bassin versant est de moins en moins uniforme au fur et à mesure que le bassin versant grandit. Là où la pluie est concentrée et homogène sur un petit bassin versant, plus celui-ci grandit, moins l'augmentation de surface est « productive » en terme de débit.
- Le raisonnement inverse peut se faire pour l'étiage : dû à la rétention d'eau dans le bassin versant (marais, étangs, sources, végétation...), pour une surface de bassin versant multipliée par 10 on verra sûrement un débit multiplié par une valeur encore plus importante, c'est-à-dire α supérieur à 1.

On adimensionnalise donc Q en fonction de S^{α} : $(\frac{Q}{S^{\alpha}})$, α variant de 0.5 à 1.5. Dans cette partie, on cherche à trouver α le plus adapté à notre échantillon, c'est-à-dire celui pour lequel toutes les courbes s'entrecroisent : plus les courbes sont entremêlées et moins on distingue de gradient de couleur (qui correspond à la surface du bassin versant), plus le paramètre α adimensionnalise de façon pertinente l'échantillon.

De manière générale, on remarque que trois populations semblent se distinguer pour les $\alpha < 1$ (vers les hautes-eaux). Sur la Figure 44, on choisit $\alpha = 0.7$, à valeur illustrative.

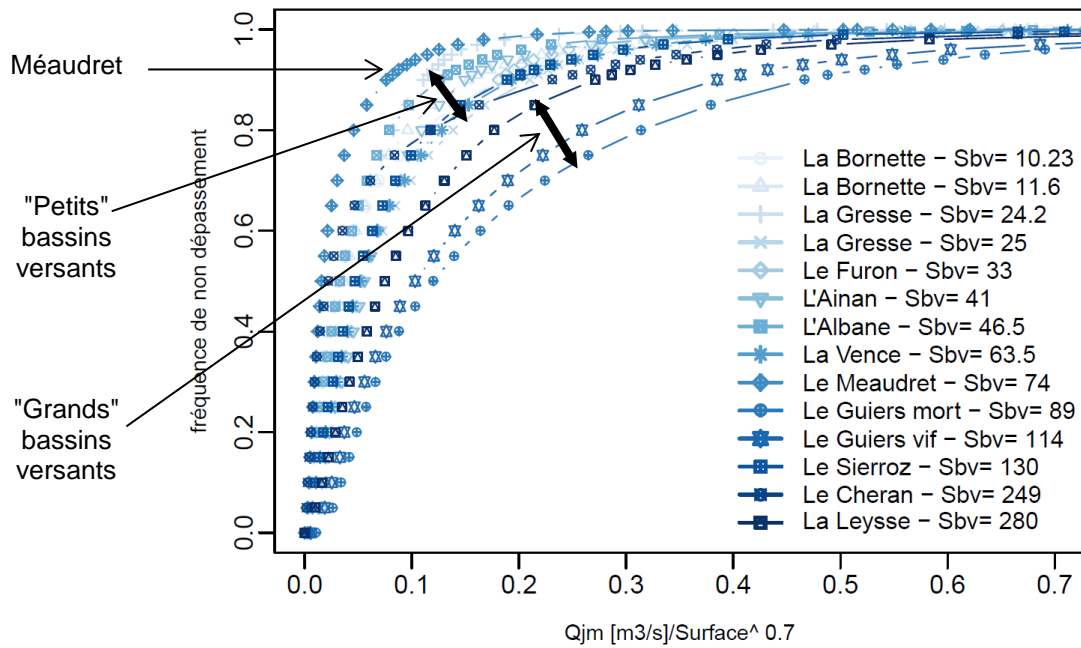


Figure 44 : Courbe des débits classés adimensionnée par $S^{0.7}$

La première population correspond au Meaudret où l'influence karstique des terrains engendre une nette diminution des débits (courbe la plus à gauche). La deuxième regroupe majoritairement les bassins versants de surface inférieure à 60 km² dont l'hydrologie s'apparente le plus celle des torrents et la troisième des bassins versants de surface supérieure à 85km² où l'influence karstique est plus ou moins importante, les stations du Guiers Mort et du Guiers Vif appartiennent à cette population mais ils se distinguent aussi par une pluviométrie plus importante.

La Roize ayant un bassin versant de l'ordre de 16km² (voir Tableau 2), on se propose de retirer les stations ayant un débit pseudo-spécifique (Q/S^α) appartenant à la troisième et la première catégorie afin de choisir au mieux le coefficient α . On réintègrera par la suite ces stations afin de poursuivre l'analyse statistique et vérifier les résultats : cette différence de régime entre "Petits" bassins versants et "Grands" bassins versants était-elle liée à la seule taille du bassin versant ou aussi dans une certaine mesure à des intensités de pluies différentes ?

On effectue la même analyse uniquement sur les "Petits" bassins versants (illustration Figure 45).

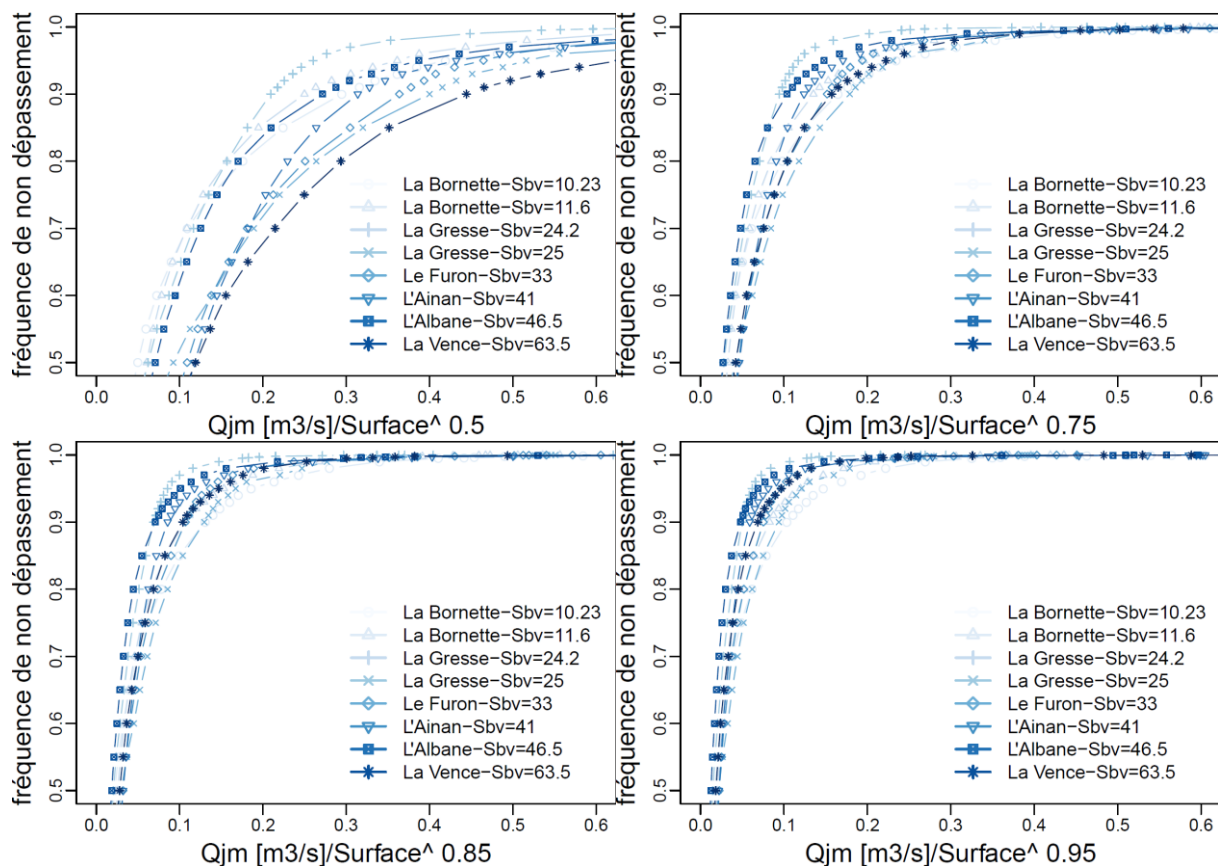


Figure 45 : Courbes des débits classés adimensionnalisées par S^α pour les "Petits" bassins versants

Il est normal que plus α augmente, plus les courbes s'écrasent car le dénominateur est plus élevé.

- Pour un coefficient $\alpha = 0.5$, le gradient des courbes (du plus clair au plus foncé en fonction des surfaces des BV) est encore trop important pour que cette valeur soit pertinente.
- A contrario, pour des coefficients se rapprochant de 1, on constate l'inversion des couleurs (du plus foncé au plus clair) ce qui signifie que le coefficient le plus adapté se situe entre les deux.
- Finalement, c'est avec un coefficient $\alpha = 0.75$ que les courbes des différentes stations semblent être les plus entremêlées et donc que l'adimensionnalisation semble fonctionner le mieux. Pour la suite de l'analyse et en première approximation, nous prendrons donc un coefficient $\alpha = 0.75$, d'autant plus que celui-ci a déjà été éprouvé avec la méthode SPEED (Carré and Fretti 2010) et que des analyses similaires menées en Nouvelle Calédonie et au Colorado ont abouti à exactement la même valeur (Mathys, N & Pitlick, J. pers. com.). Les analyses suivantes portent donc sur les débits pseudo-spécifique définis par:

$$Q^* = \frac{Q}{S_{BV}^{0.75}}$$

4.2.2.3 Courbe débit classée pseudo-spécifique

En analysant plus en détail les débits pseudo-spécifiques, la station de La Gresse à Gresse en Vercors [Pont Jacquet] présentait un déficit dans les débits marqué en comparaison avec les 7 autres stations appartenant au groupe des petits cours d'eau (perte de débits, problème de mesure?). Elle a donc été retirée du groupe. Finalement une première courbe de débit classée pseudo spécifique est définie avec les stations et illustrée Figure 46:

- La Bornette a Doussard 10.23 km²;
- La Bornette a Lathuile 11.6 km²;
- La Gresse a Saint Guillaume [Pont des Beaumettes] 25 km²;
- Le Furon a Engins 33 km²;
- L'Ainan a Saint Geoire-en-Valdaine 41 km²;
- L'Albane a Chambéry [Pont Chevalier] 46.5 km²;
- La Vence a Proveysieux [Pont de l'Oulle] 63.5 km².

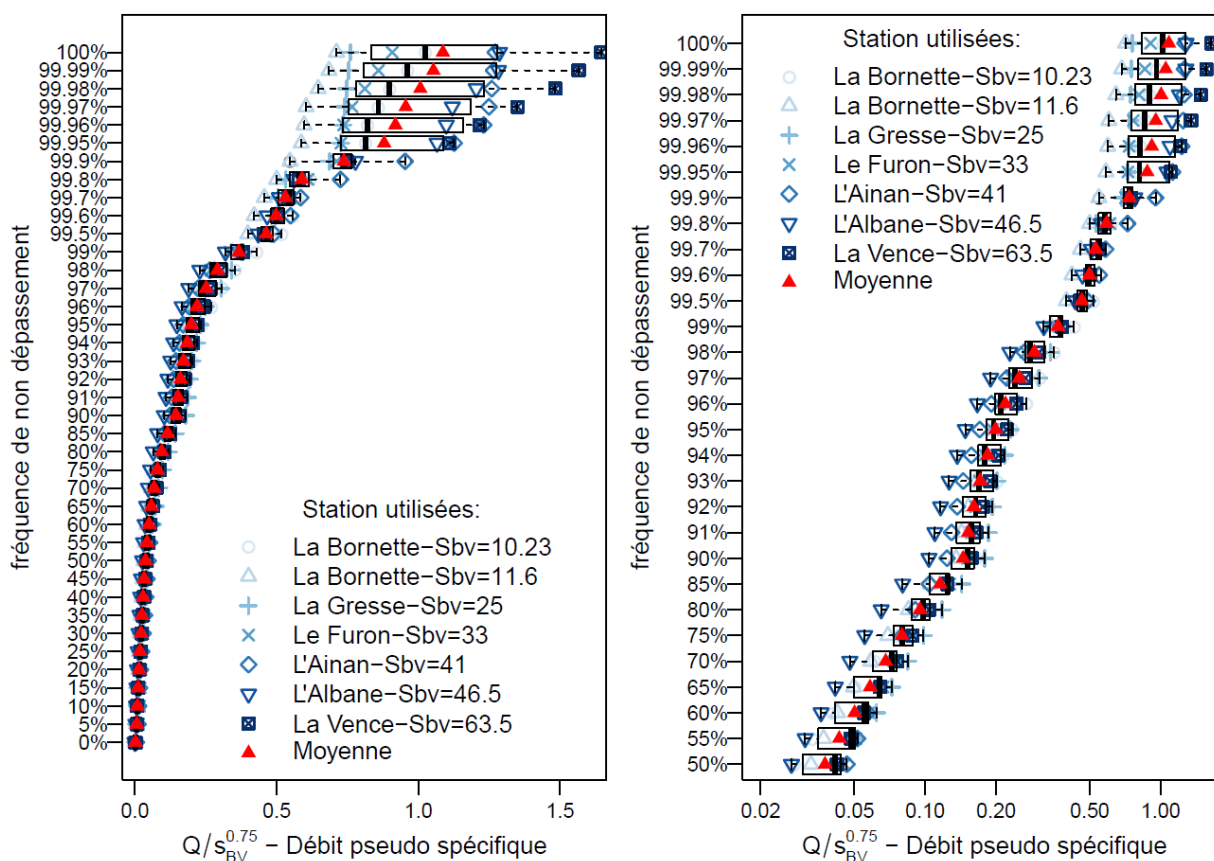


Figure 46: Courbe des débits classés pseudo-spécifiques du groupe des petits cours d'eau sur un axe linéaire et logarithmique (à gauche courbe complète, à droite représentation log pour les fréquences >50%)

On observe sur cette courbe que la variabilité des termes de débits pseudo-spécifique est faible jusqu'au quantile 99.9%. Pour ce dernier et au-delà, l'incertitude grandit fortement et la variabilité inter bassin versant devient forte, on approche des débits de crues forts ($T > 5$ ans), les effets locaux et les changements de tendances (cassures, ruissellement) influencent vraisemblablement plus chaque bassin versant de façon différente.

Le graphique sur un axe linéaire présenté à gauche "écrasant" nécessairement les petites valeurs, nous avons illustrés sur le graphique de droite les mêmes résultats présentés sur un axe logarithmique. On observe bien une dispersion régulière des valeurs malgré l'usage d'une formulation en débit pseudo-spécifique et un coefficient de 0.75. La valeur moyenne de chaque quantile a été estimée et est fournie dans le Tableau 9.

Tableau 9: Débit pseudo spécifiques $Qsp=Q/Sbv^{0.75}$ classés sur l'échantillon des petits cours d'eau

Probabilité de non dépassement	Qsp	Fréquence [j/an]	Fréquence [h/an]	Temps retour [an]	Probabilité de non dépassement	Qsp	Fréquence [j/an]	Fréquence [h/an]	Temps retour [an]
99.99%	1.05	0.04	0.9	27.40	90%	0.15	37	876	0.027
99.98%	1.01	0.07	1.8	13.70	85%	0.12	55	1 314	0.018
99.97%	0.96	0.11	2.6	9.13	80%	0.10	73	1 752	0.014
99.96%	0.92	0.15	3.5	6.85	75%	0.08	91	2 190	0.011
99.95%	0.88	0.18	4.4	5.48	70%	0.07	110	2 628	0.0091
99.90%	0.74	0.37	8.8	2.74	65%	0.06	128	3 066	0.0078
99.80%	0.59	0.73	17.5	1.37	60%	0.05	146	3 504	0.0068
99.70%	0.53	1.1	26	0.91	55%	0.04	164	3 942	0.0061
99.60%	0.50	1.5	35	0.68	50%	0.04	183	4 380	0.0055
99.50%	0.46	1.8	44	0.55	45%	0.03	201	4 818	0.0050
99%	0.37	3.7	88	0.27	40%	0.03	219	5 256	0.0046
98%	0.29	7.3	175	0.14	35%	0.03	237	5 694	0.0042
97%	0.25	11	263	0.091	30%	0.02	256	6 132	0.0039
96%	0.22	15	350	0.068	25%	0.02	274	6 570	0.0037
95%	0.20	18	438	0.055	20%	0.01	292	7 008	0.0034
94%	0.18	22	526	0.046	15%	0.01	310	7 446	0.0032
93%	0.17	26	613	0.039	10%	0.01	329	7 884	0.0030
92%	0.16	29	701	0.034	5%	0.01	347	8 322	0.0029
91%	0.15	33	788	0.030	0%	0.00	365	8 760	0.0027

L'incertitude type est estimée en divisant la moitié de l'écart interquartile (quantile 75%-quantile 25%) par la valeur moyenne. Elle est inférieure à 15% pour les fréquences de débits compris entre 60% et 99.9%, c'est-à-dire qu'on a 50% de chance pour que l'estimation soit correcte à +/-15%.

Si on reprend l'ensemble des stations et qu'on leur applique un traitement d'adimensionnalisation par la $S_{BV}^{0.75}$, on obtient le graphique suivant (à comparer avec la Figure 42).

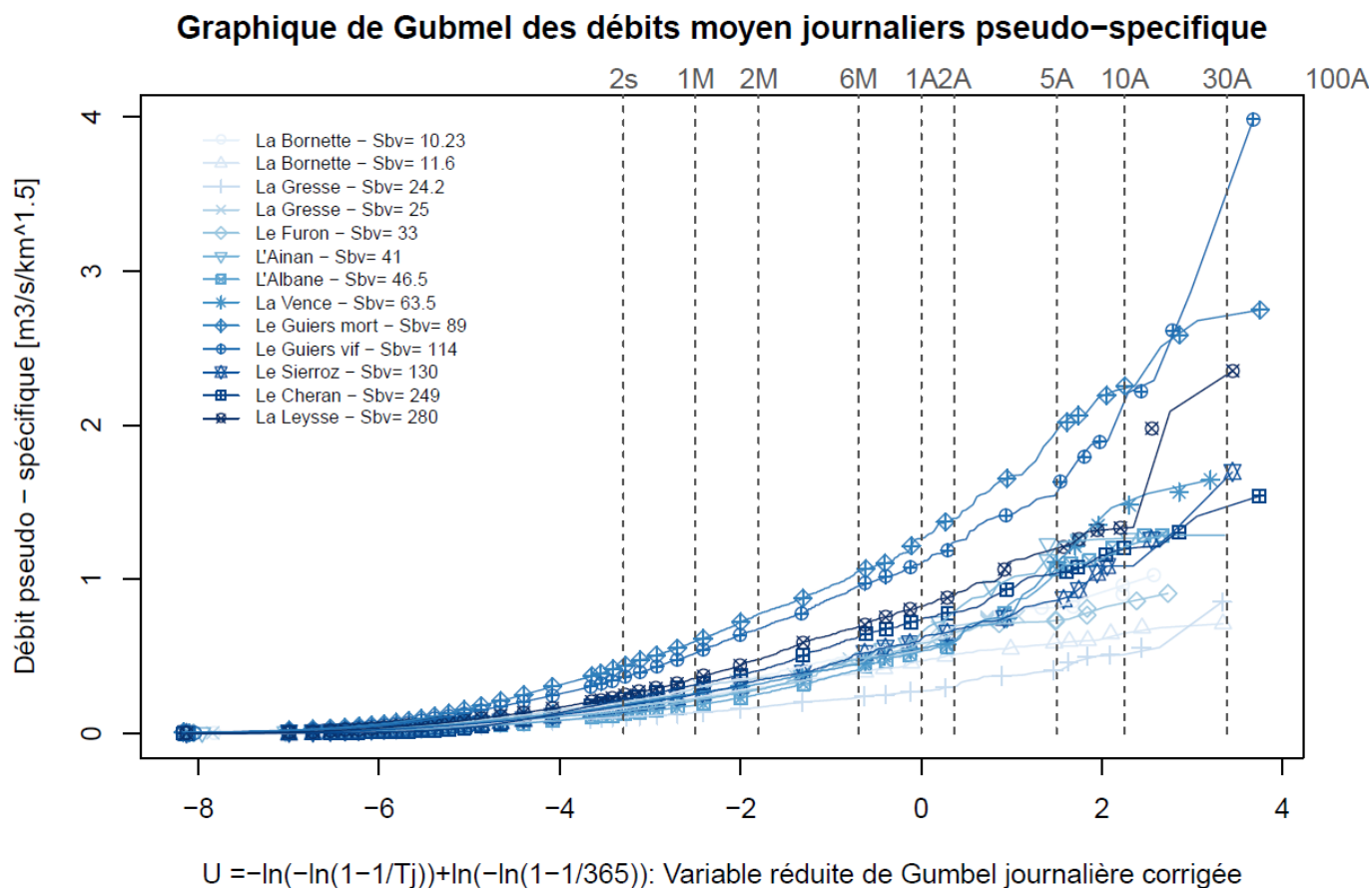


Figure 47 Graphique de Gumbel des débits pseudo-spécifiques. Le gradient naturel de valeurs lié à la superficie du bassin versant s'est effacé. Le Méaudret se dégage par ses valeurs très basses. Le Guiers Mort et le Guiers Vif par leurs valeurs fortes. Les cours de la Leysse, du Chéran et du Sierroz semble cohérent avec les valeurs tirées des petits cours d'eau ($S_{BV} < 60 \text{ km}^2$)

Néanmoins, l'adimensionnalisation par la surface ne paraît pas suffisante et nous allons chercher à améliorer les performances de la méthode par une analyse des pluies.

4.2.3 Analyse des pluies et mise en place d'un modèle

Les pluviomètres analysés dans le cadre de ce travail sont listés dans le tableau suivant :

Tableau 10 : liste des pluviomètres étudiés

Numero	Nom	Altitude	Année ouverture	Année fermeture	Nombre années disponibles	Données manquantes
26302001	ST-EULALIE-EN-R	205	1961	1992	32	0%
26307001	ST-JEAN-EN-ROYA	308	1925	Ouvert	90	14%
38006001	ALLEVARD	495	1949	Ouvert	66	0%
38021001	AUTRANS	1090	1905	Ouvert	110	8%
38075001	CHAPAREILLAN	270	1949	2005	57	2%
38082001	CHARAVINES	510	1893	Ouvert	122	1%
38090001	CHATEAU-BERNARD	800	1948	1990	43	11%
38105001	CHIRENS	463	1949	1999	51	2%
38126001	CORENC LA REVIREE	227	1963	1988	26	11%
38153001	ENGINS	877	1905	Ouvert	110	1%
38163001	FOND-DE-FRANCE	1081	1948	Ouvert	67	2%
38163002	LA-FERRIERE	930	1955	Ouvert	60	1%
38170001	FONTANIL	200	1953	Ouvert	62	0%
38186001	GRESSE	1220	1950	Ouvert	65	10%
38242001	MONESTIER	800	1905	Ouvert	110	2%
38248002	MONTAUD	740	1995	Ouvert	20	60%
38315001	PONT-DE-BEAUVOISIN-TABACS	239	1948	1989	42	10%
38325001	PROVEYSIEUX	600	1961	2005	45	6%
38334001	REVEL	630	1948	2012	65	1%
38342001	ROISSARD	730	1949	Ouvert	66	5%
38390001	SAINTE-GERVAIS PIERRE MOUTON	249	1950	1981	32	4%
38395001	ST-HILAIRE	970	1964	Ouvert	51	28%
38412001	ST-LAURENT-DU-PONT	389	1949	2011	63	6%
38416001	ST-MARCELLIN	281	1948	1986	39	0%
38421001	GRENOBLE - SMH	212	1969	2001	33	0%
38442001	GRANDE-CHARTREUSE	945	1947	Ouvert	68	1%
38446001	ST-PIERRE-D'ENTREMONT	644	1948	2002	55	5%
38501001	TENCIN	236	1950	Ouvert	65	2%
38504001	THEYS	615	1949	Ouvert	66	3%
38517001	TULLINS	190	1950	Ouvert	65	3%
38524001	VARCES	250	1958	Ouvert	57	0%
38548001	VILLARD-DE-LANS	1024	1959	Ouvert	56	1%
73004001	AILLON LE JEUNE	900	1934	Ouvert	81	1%
73052001	BOURGET EN HUIL	890	1934	Ouvert	81	1%
73064001	CHALLES LES EAU	291	1946	Ouvert	69	0%
73082001	LA CHAVANNE	318	1959	Ouvert	56	0%
73098001	LES DESERTS	1030	1947	1999	53	7%
73106001	ECOLE	732	1934	Ouvert	81	4%
73146001	LESCHERAINES	590	1947	Ouvert	68	0%
73179001	LA MOTTE SERVOL	310	1959	2013	55	17%
73191001	NOVALAISE	435	1956	Ouvert	59	1%
73215001	LA ROCHETTE	350	1934	Ouvert	81	1%
73312001	VERRENS ARVEY	530	1959	Ouvert	56	0%
73329001	CHAMBERY-AIX	235	1973	Ouvert	42	1%
74093001	CRAN-GEVRIER	426	1976	Ouvert	39	0%
74187001	MONTMIN	1050	1944	2009	66	7%
74225001	RUMILLY	345	1877	1995	119	53%

4.2.3.1 Tracé des pluies/débits

L'analyse à effectuer va tenter de mettre en évidence l'influence du régime des pluies sur les tendances observées pour chaque station. La surface n'étant pas un facteur explicatif suffisant, le débit doit également être corrélé à la pluie P

$$Q = B * S^{0.75} * f(P)$$

Comme expliqué précédemment, le débit pseudo-spécifique Q_{ps} est analysé suivant la méthode SPEED (Carré and Fretti 2010). Il sera choisi proportionnel au débit pseudo-spécifique, appelé débit réduit et estimé tel que

$Q_{SPEED} = 12 * Q/S^{0.75}$. L'utilisation du coefficient 12 au numérateur permet une confrontation directe des pluies et des débits dans le cadre de la méthode SPEED (Carré and Fretti 2010). On cherche par la suite à déterminer le modèle reliant le débit réduit à la pluie : $Q_{SPEED} = f(P)$.

Pour chaque station hydrologique (carte. Figure 40), nous avons donc une série de pluviomètres associés plus ou moins représentatifs de la pluviométrie sur le bassin versant, et une série temporelle de débits à la station.

Les séries de données sont alors transformées en séries de données triées, leurs fréquences empiriques sont transformées en unité de Gumbel et tracées sur un graphique. La Figure 48 rassemble, à titre d'exemple, les graphiques obtenus après traitement sous R, pour les stations de la Bornette à Lathuille et de la Vence à Proveysieux. Les autres sont disponibles en annexes.

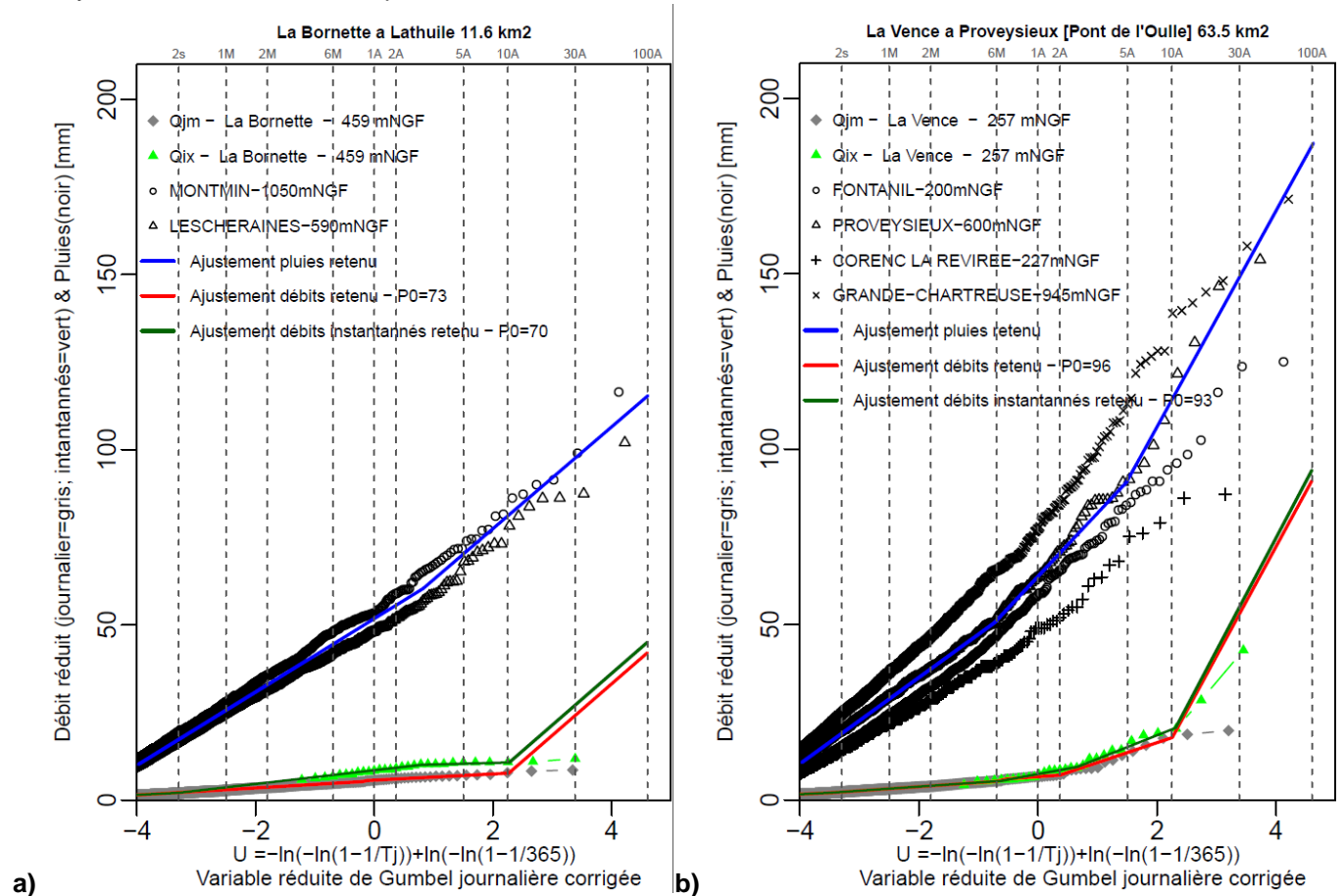


Figure 48 : Graphique de Gumbel pour les stations a) de la Bornette à Lathuille et b) de la Vence à Proveysieux

Sur chaque graphique, nous disposons donc :

- de la série de Gumbel journalière des débits de Speed $Q_{jmSPEED} = \frac{12 * Q_{jm}}{S^{0.75}}$ en gris;
- de la série de Gumbel des maximaux annuels des débits instantanés de Speed $Q_{ixSPEED} = \frac{12 * Q_{ix}}{S^{0.75}}$ en vert;
- des séries de Gumbel des différents pluviomètres associés Pluies[mm] P en noir.

A partir des données pluviométriques est alors tracée la tendance pluviométrique générale du bassin versant (en bleu) correspondant à la station hydrologique étudiée. Cet ajustement est effectué de manière empirique selon la méthode SPEED (Carré and Fretti 2010, Carre and Cayla 2012). **Elle n'est pas un simple ajustement statistique et fait l'objet d'une réflexion importante qui prend en compte des considérations :**

- d'orientation du bassin versant en comparaison avec celle du versant portant le pluviomètre ;
- d'altitude du bassin versant et du pluviomètre ;
- de relief qui les sépare ;
- de pluie annuelle entre le bassin versant et la zone du pluviomètre (Figure 40).

A partir des données de débits journaliers est également tracé l'ajustement des débits (en rouge et vert).

Ne disposant pas de données suffisantes dans le temps, nous n'avons que rarement des points au-delà d'un temps de retour de 10 ans. Cependant, d'après le théorème du Gradex (Carré and Fretti 2010), nous savons qu'au-delà d'un certain seuil (rupture du comportement), toute pluie qui tombe ruisselle et participe au débit : le volume écoulé caractérisé par le débit devient proportionnel au volume de pluie, à une constante près qui représente plus ou moins la capacité d'absorption du bassin versant.

On retient souvent en France, un temps de retour T de l'ordre de 10 ans à 20 ans pour cette transition vers le "ruissellement au sens du Gradex". Nous avons observé à plusieurs reprises des cassures apparaître dans les séries de Q_{ix} aux alentours de $T=10$ ans, plus rarement sur les Q_{jm} . En l'absence de données supplémentaires le choix de tracer un ajustement proportionnel à la pluie à partir de 10 ans a été pris sécuritairement (droites rouge et verte Figure 48). Cette procédure est appliquée à toutes les stations étudiées.

Sachant que $U = f(T)$, nous pouvons ainsi obtenir pour chaque station et différents temps de retour T , le Tableau 11 avec la pluie de temps de retour T : $P(T)$, et le débit de Speed T correspondant : $Q_{jmSPEED}(T)$.

Tableau 11 : valeurs de $P(T)$ et $Q_{jmSPEED}(T)$ pour toutes les stations

Pluie ou débit	V1235 410	V1235 420	W2804 020	W2804 010	W3005 010	V1525 410	V1318 210	W3015 010	V1504 010	V1515 010	V1325 020	V1255 010	V1315 020
P2sem	17	17	16	16	18	16	17	19	27	24	15	19	17
P1mois	26	26	26	26	27	25	26	29	40	36	24	29	27
P2mois	33	33	34	34	35	33	33	37	51	47	32	37	35
P6mois	45	45	46	46	48	45	44	51	68	64	43	49	48
P1an	31	31	31	31	33	30	31	35	48	44	29	34	33
P2ans	56	56	58	58	66	58	55	70	93	85	55	62	61
P5ans	70	70	78	78	86	75	67	91	123	112	67	77	74
P10ans	81	81	89	89	99	87	87	114	143	130	81	89	86
P30ans	98	98	103	103	118	113	120	149	173	157	104	105	107
P100ans	115	115	117	117	139	183	155	187	205	186	129	123	130
Qps2sem	2.36	2.1	1.35	2.42	2.01	1.78	1.56	2.21	5.32	4.31	2.16	2.62	2.96
QPS1mois	3.53	2.91	1.69	3.53	2.67	2.58	2.35	3.15	7.4	6.44	3.21	3.78	4.2
QPS2mois	4.56	3.62	2.06	4.3	3.43	3.49	3.27	3.98	9.4	8.32	4.13	4.8	5.88
QPS6mois	6.19	4.74	2.74	5.49	5.61	5.87	5.13	5.29	12.53	11.29	6.21	7.15	8.44
QPS1an	4.28	3.43	1.95	4.1	3.22	3.25	2.95	3.76	8.86	7.81	3.87	4.52	5.43
QPS2ans	7.96	5.97	3.55	7.45	7.22	9.12	7.01	7.06	17.17	14.59	8.22	9.43	10.81
QPS5ans	10.11	6.97	5.25	11.34	8.95	14.07	11.99	13.48	22.96	18.92	10.36	12.35	14.47
QPS10ans	11.52	7.63	6.38	13.91	10.09	17.33	15.27	17.73	26.79	25.08	12.95	14.37	15.96
QPS30ans	29	25	20	28	29	43	48	53	57	52	36	30	37
QPS100ans	46	42	34	42	50	113	83	91	89	81	61	48	60

4.2.3.2 Elaboration de modèles

Tous les couples $(P(T); Q_{jmSPEED}(T))$ de toutes les stations de l'étude régionale sont ensuite tracés sur le même graphique: Figure 49.

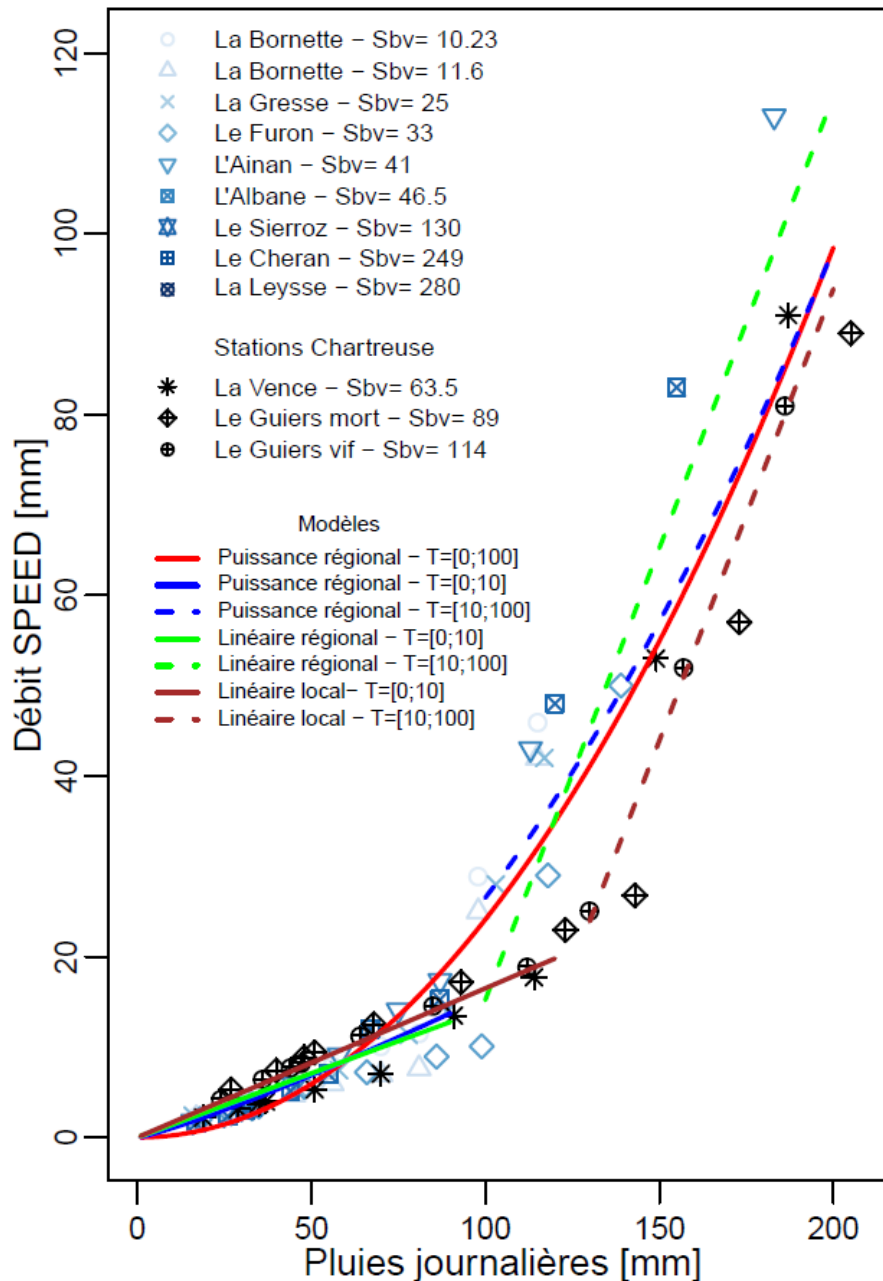


Figure 49 : Modèles des pluies-débits

La rupture proposée un peu plus haut en 4.2.3.1 pour un temps de retour de 10 ans correspond sur notre graphique à des pluies de l'ordre de 97mm en moyenne (voir Tableau 11). Nous proposons donc les modèles suivants qui sont obtenus via des ajustements aux moindres carrés des données :

- modèle 1 régional (rouge) :
 $\forall T \in [0, 100\text{ans}], Q_{jmSPEED}(T) = a * P(T)^\alpha$ avec $\alpha = 2.03$ et $a = 0.0021$
- modèle 2 régional (bleu) :
 1/ $\forall T \in [0, 10\text{ans}[, Q_{jmSPEED}(T) = b * P(T)^\beta$ avec $\beta = 0.068$ et $b = 1.18$
 2/ $\forall T \in [10, 100\text{ans}] , Q_{jmSPEED}(T) = c * P(T)^\gamma$ avec $\gamma = 1.89$ et $c = 0.0044$
- modèle 3 régional (vert) :
 1/ $\forall T \in [0, 10\text{ans}], Q_{jmSPEED}(T) = d * P(T)$ avec $d = 0.142$
 2/ $\forall T \in]10, 100\text{ans}], Q_{jmSPEED}(T) = P(T) - P0$ avec $P0 = 84.8$
- modèle 4 local (marron) : (cf. remarques à la suite)
- $\forall T \in [0, 10\text{ans}], Q_{jmSPEED}(T) = d * P(T)$ avec $d = 0.165$
- $\forall T \in]10, 100\text{ans}], Q_{jmSPEED}(T) = P(T) - P0$ avec $P0 = 106.1$

Remarques :

- On note que la formule de Crupedix qui permet de calculer approximativement le débit décennal est de la forme : $Q(10ans) = A * S^{0.8} * P(10ans)^2$. On retrouve bien la puissance au carré de la pluie pour nos modèle 1 et 2.2
- De plus, dans le modèle 2.1 la puissance est très voisine de 1 ce qui laisse entendre que celui-ci est quasi-linéaire comme le 3.1.
- Dans le modèle 3.2, le P0 trouvé vaut 84mm pour les Qjm. Il vaut 82 en moyenne et 75 mm en moyenne pour les Qix. Cette seconde valeur est cohérente dans la mesure où en France, les valeurs sont en moyenne de 60 mm; et qu'il est probable que sur la région étudiée, des influences karstiques viennent augmenter un peu cette valeur.
- On notera que les stations les plus proches de la Roize, des points de vues du relief et de la géologie, se démarquent des autres (point noirs sur la Figure 49). Ainsi une approche complémentaire à l'analyse régionale menée jusqu'ici consiste à appliquer la même méthode mais en considérant uniquement les stations les plus proches de notre bassin versant c'est-à-dire celles du Guiers Vif (V1515010), du Guiers Mort (V1504010) et de la Vence (W3015010). Ces stations sont toutes situées sur le massif de la Chartreuse dont le régime de pluie particulier, les reliefs marqués en comparaison du Vercors et des Bauges et la géologie karstique pourraient créer une spécificité locale, non saisie ou "gommée" dans le modèle régional.

Dans ce second modèle, la rupture proposée pour un temps de retour de 10 ans correspond sur notre graphique à des pluies de l'ordre de 130mm en moyenne. Il y a donc bien une spécificité dans les stations de Chartreuse avec une tendance à des pluies plus fortes mais aussi avec une tendance à ruisseler au sens du Gradex pour des lames d'eau plus fortes, de l'ordre de 110 à 140 mm.

Sachant qu'il est difficile d'estimer véritablement quel modèle est le plus représentatif, par simplicité et cohérence avec le tracé de la tendance des débits Figure 48, nous adopterons un modèle type linéaire (3 ou 4) qui se base sur la méthode SPEED pour la suite de l'étude.

4.2.3.3 Analyse des débits maximums instantanés

On restera prudent quant à l'usage direct des valeurs de Qps pour réaliser des estimations des débits de pointe de crue : ces données sont tirées d'analyse des Qjm qui ne prennent pas en compte la nature très transitoire des débits de crues. Une analyse plus classique des Qix a été menée en parallèle. Elle conclue aux valeurs suivantes de P₀:

Tableau 12: Valeurs P₀ = P_{10ANS} – Q_{SPEED,10ANS}

Pluie ou débit	V1235 410	V1235 420	W2804 020	W2804 010	W3005 010	V1525 410	V1318 210	W30150 10*	V15040 10*	V15150 10*	V1325 020	V1255 010	V1315 020
P10ans	81	81	89	89	99	87	87	114	143	130	81	89	86
Qix10ans	16.7	10.7	9.4	24.9	12.4	15.3	21	20.5	41.5	32.6	22.4	28.8	24.8
P0	64.2	70.3	79.6	64.1	86.6	71.6	66	93.5	101.5	97.4	58.6	60.2	61.2

Note: les 3 stations marquées d'une * correspondent aux stations de Chartreuse.

La valeur moyenne du P₀ obtenue sur l'analyse régionale est de 75 mm. Elle monte à 97 mm sur la zone de la Chartreuse à laquelle appartient la Roize.

4.2.3.4 Analyse des incertitudes

Afin de mieux appréhender les incertitudes qui existent sur le modèle et compte tenu de la nature sensiblement linéaire des grandeurs Q_{SPEED} - P, le graphique suivant retrace les valeurs prises par le ratio Q_{SPEED}/P pour les 10 temps de retour caractéristiques qui ont été extraits des données.

Pour mémoire, les coefficients de régression des modèles linéaires régional et local ont aussi été tracés.

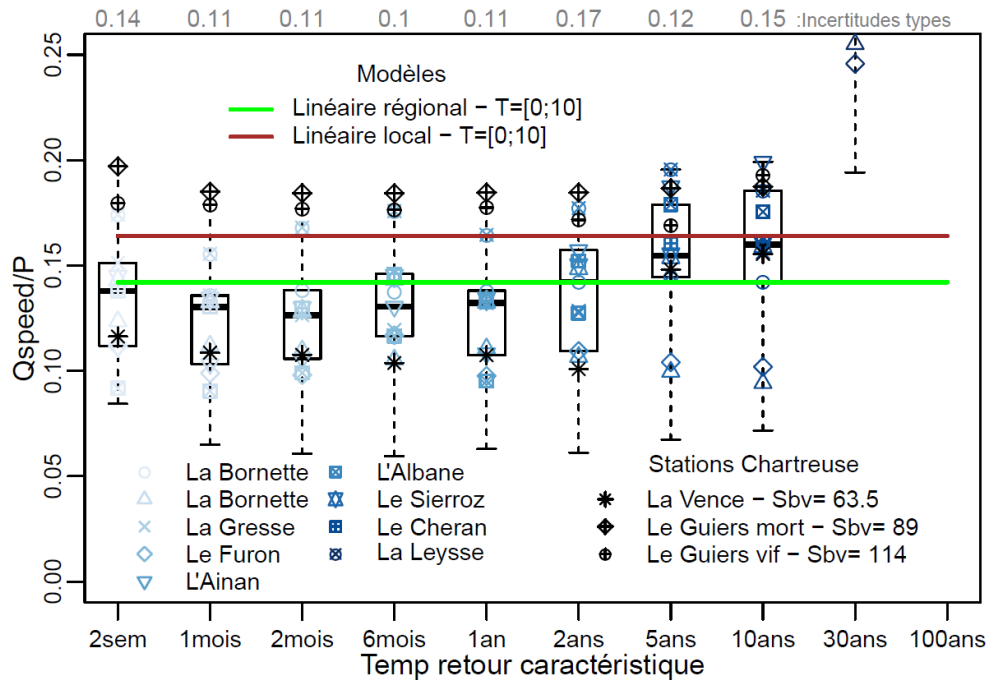


Figure 50 Analyse critique du coefficient de régression de la droite $Q_{SPEED} = f(P)$

On constate d'abord que le nuage de point n'est pas parfaitement linéaire et qu'une tendance légère à la hausse semble apparaître. Celle-ci est probablement liée à la saturation progressive du bassin versant en corrélations avec des pluies de plus en plus fortes, on sait par ailleurs que la prise en compte des pluies rares ($T=[10;100]$ ans) amenait à une relation en loi puissance carré plutôt qu'une loi linéaire. L'échantillon semble trop limité pour pousser cette analyse plus en avant.

L'incertitude type est ici aussi estimée en divisant la moitié de l'écart interquartile (quantile 75%-quantile 25%) par la valeur retenue qui est celle du modèle régional (0.142). Elle est inférieure ou égale à 17% pour les débits de temps de retour 2 semaines à 10 ans, c'est-à-dire qu'on a 50% de chance pour que l'estimation soit correcte à $\pm 17\%$. En comparaison avec les valeurs obtenues avec la simple analyse en débit pseudo-spécifique, les performances du modèle ne sont pas améliorées significativement.

Afin d'illustrer ce résultat sous une autre forme, le graphique suivant fourni 2 nuages de valeurs de débits classés pseudo-spécifiques (quantiles 75% et 90%) comparés avec la pluie de temps de retour 2 mois.

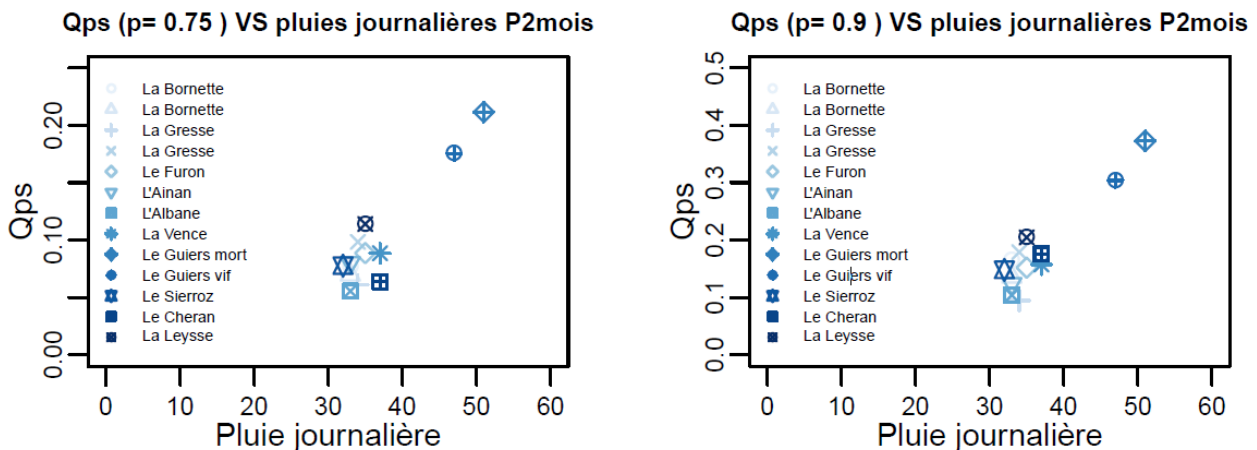


Figure 51: Comparaison entre 4 valeurs caractéristiques des débits classés et la pluie journalière de temps de retour 2 mois.

Si une corrélation semble apparaître, la dispersion reste forte et par conséquent l'incertitude du modèle aussi. Une alternative serait de développer un modèle $Q_{ps}=a(P_T - P_{sat})$, avec P_{sat} lame d'eau nécessaire à la présaturation du milieu. Selon le graphique ci-dessus, P_{sat} serait de l'ordre de 20 mm sur la zone d'étude (et serait probablement plus faible dans des zones non karstiques, résultat à vérifier). Le développement de ce modèle n'a pas été étudié plus loin dans ce travail.

4.2.3.5 Modèle empirique

A partir du traitement de données effectué en partie dans l'analyse des débits 4.2.2, nous avons pu faire le lien entre la relation $T = 1/(1 - F)$, la courbe des débits classés, $F = f(Q)$, et la courbe de Gumbel, $Q = f(U)$. Appliqué à toutes les stations étudiées et après vérification de la stabilité, cela nous permet d'établir une relation empirique entre la fréquence de non dépassement F et la variable réduite U (voir Figure 52). Cette relation permet ensuite une interpolation entre les valeurs déterminées par le modèle $Q_T=f(P_T)$ pour déterminer $Q_{cla}=f(Q_T)$.

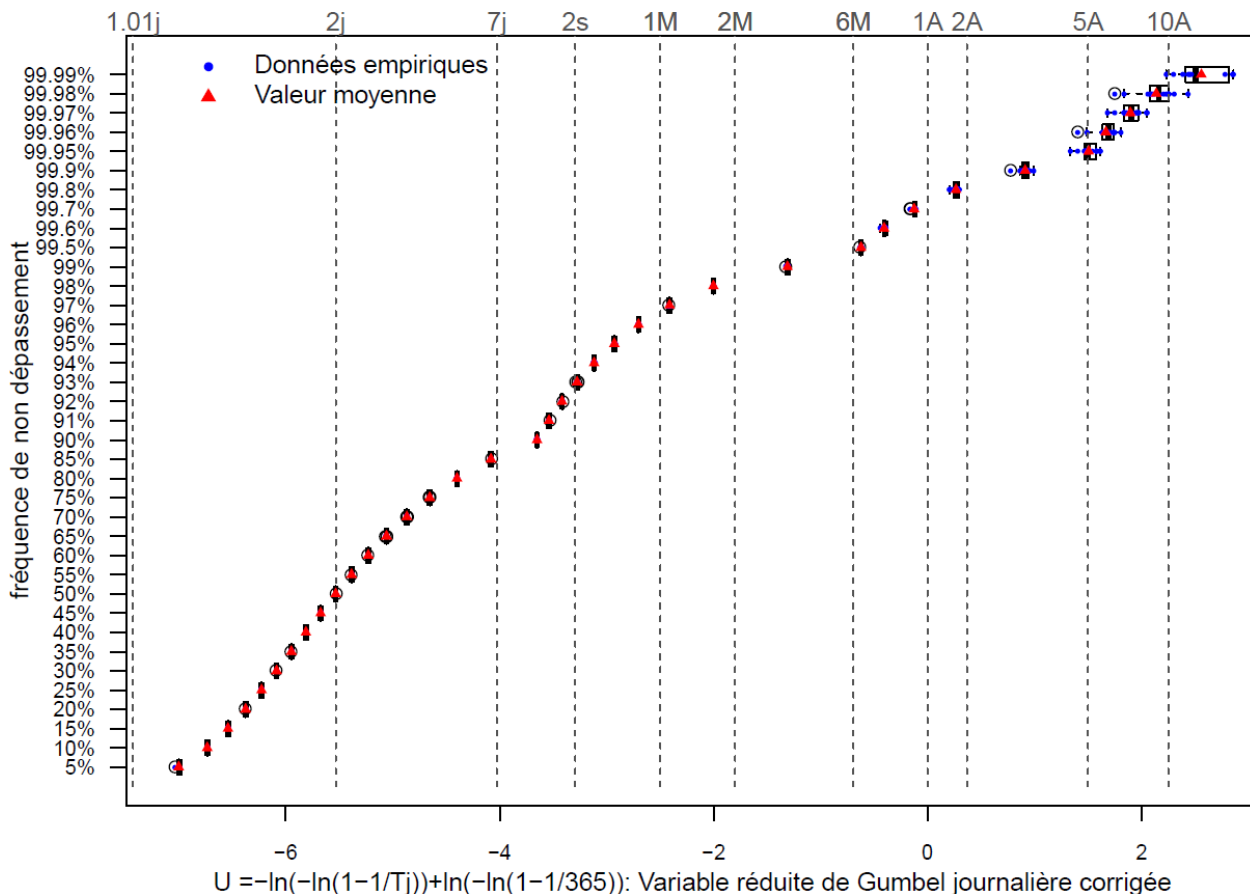


Figure 52: Définition empirique des valeurs équivalentes entre U variable réduite de Gumbel et f fréquence annuelle de non dépassement

On notera que la partie supérieure extrême ($F > 99.9\%$) est entachée d'une incertitude plus importante que le reste de la courbe, incertitude liée au faible nombre de valeurs pour ces débits rares. On notera que la station de La Gresse à Saint Guillaume [Pont des Beaumettes] ($S_{bv}=25 \text{ km}^2$) a été retiré de l'échantillon car ne comprenant que 2 ans de données de Q_{jm} .

4.2.3.6 Synthèse

A Courbe des débits classés

On pouvait simplement espérer que via la régionalisation de la formule et des estimations de $U(F)$, le modèle obtenu soit plus précis et moins dépendant de l'échantillonnage qu'une simple analyse par transfert de bassin entre une station jaugée et un site d'étude. Toutefois, dans la mesure où une seconde étape d'interpolation existe entre nos données estimées à pas de temps définis (10 données pour T variant entre 2 semaines et 100 ans) et la courbe des débits classés définie pour les fréquences de non dépassement illustrées sur la figure précédentes, le modèle de courbe des débits classés corrigée par la pluie est moins précis que celui par analyse directe des débits pseudo-spécifique. En conclusion, notre analyse du régime hydrologique des petits cours d'eau des Pré-Alpes du Nord ne permet pas d'améliorer l'estimation des débits classés par une corrélation avec les pluies estimées sur le bassin versant au pas de temps journalier. Afin de déterminer la courbe des débits classés de la Roize, c'est donc directement l'analyse par débits pseudo-spécifiques qui sera utilisée.

B Débits évènementiels

Pour les crues de temps de retour 10, 30 et 100 ans, il est proposé de retenir l'analyse SPEED menée sur les Qix. On déduira le débit directement par application du P_0 régional ou local, estimé à 75 et 97 mm.

4.3 Application à la Roize

Selon les connaissances actuelles, il n'y a ni perte ni résurgence dans le régime de la Roize, seulement quelques infiltrations vers le Fontanil plus au sud mais cela reste marginal en cas de crue (Pinhas 1987).

4.3.1 Données tirées des études antérieures

Dans son étude, Pinhas utilise les pluviomètres du Fontanil, de Proveysieux et de St Pierre de Chartreuse dont l'analyse abouti aux valeurs caractéristiques suivantes :

Tableau 13 : P(T) estimés par Pinhas (1983) pour les plus proches stations

Temps de retour	Fontanil	Proveysieux	St Pierre de Chartreuse
5 ans	78	87	105
10 ans	92	102	120
30 ans	110	125	145

En tenant compte de la répartition hypsométrique du BV, et notamment du fait que les orages estivaux se bloquent contre les reliefs, Pinhas propose de prendre une valeur intermédiaire entre Proveysieux et St Pierre de Chartreuse, ce qui lui donne :

- $P(5\text{ans}) = 109\text{mm}$
- $P(10\text{ans}) = 126\text{mm}$
- $P(30\text{ans}) = 153\text{mm}$

Ces valeurs de pluies sont basées sur des pluviomètres extérieurs au bassin versant de la Roize. En l'absence de données sur le site, il faut travailler avec ces derniers. A noter que lors de la crue de 1971, ceux-ci n'avaient reçu que bien moins d'eau. A noter également que ces valeurs des pluies sont journalières ce qui ne reflète pas les intensités maximales (Informations issues de la littérature : cf. § 3.3.1).

Ensuite à partir des méthodes SOCOSE pour les temps de retour inférieurs à 20 ans et du GRADEX pour ceux supérieurs, le rapport propose les valeurs suivantes pour les débits de la Roize au sommet du cône de déjection:

- $Q(10\text{ans}) = 17\text{m}^3/\text{s}$
- $Q(50\text{ans}) = 27\text{m}^3/\text{s}$
- $Q(100\text{ans}) = 31\text{m}^3/\text{s}$

Ces valeurs seront par la suite comparées aux valeurs que l'on calculera par le biais de notre modèle régional.

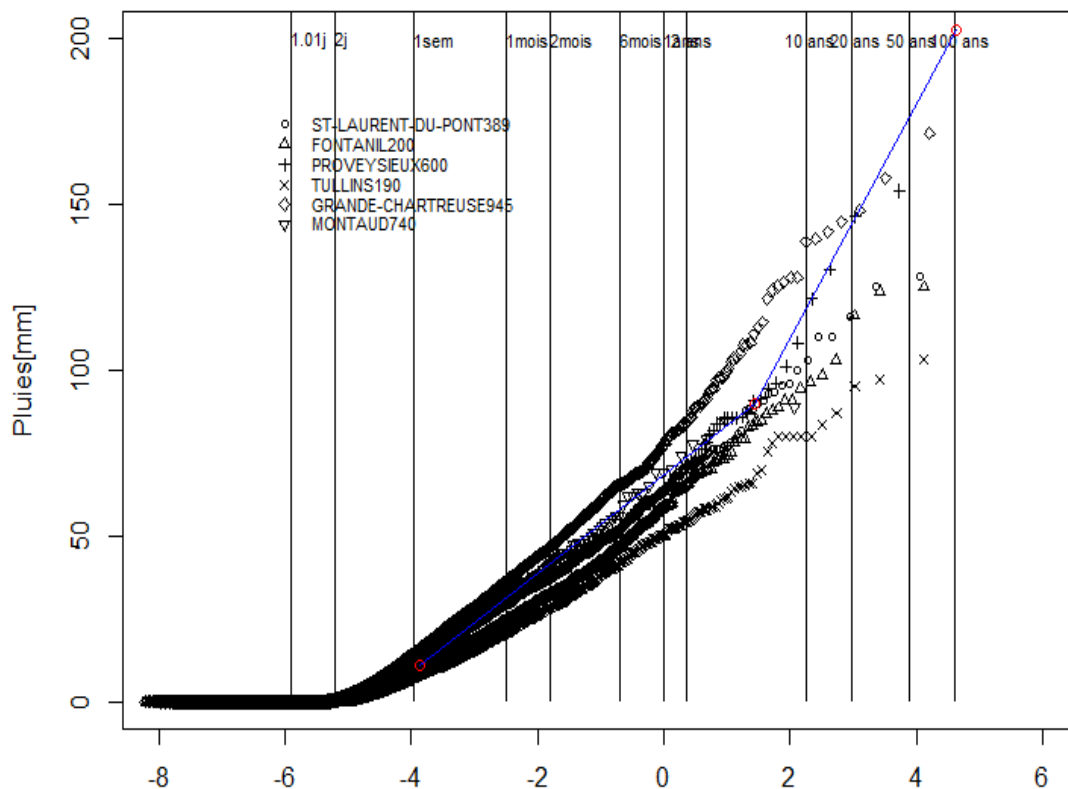
4.3.2 Analyse des pluies de la Roize

Les pluviomètres les plus significatifs choisis aux alentours du bassin versant de la Roize sont les suivants :

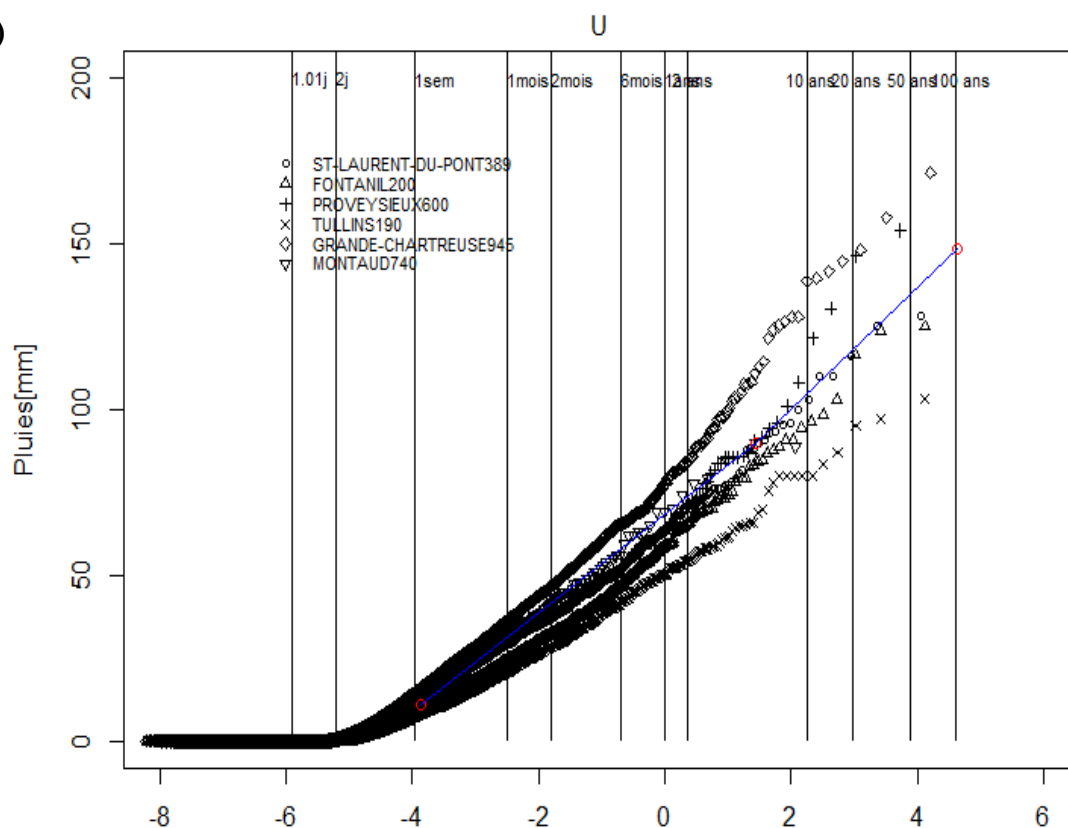
- St Laurent du Pont
- Fontanil
- Proveysieux
- Tullins
- Grande Chartreuse
- Montaud

Leurs tracés de Gumbel ainsi que la tendance pluviométrique pour la Roize, ajustés arbitrairement en fonction des mêmes paramètres que précédemment, sont représentés Figure 53. Il est à noter que les ajustements semblent montrer l'apparition de cassures dans les droites décrivant l'échantillon, en particulier au niveau de la station de Proveysieux qui est situé très proche du bassin versant de la Roize. Ces cassures sont expliquées par les influences du relief selon (Carré and Fretti 2010) et son régulièrement retrouvées dans ce secteur des Alpes. Une description sommaire du phénomène est fournie en annexe. Selon que l'on prenne en compte ou non ces cassures, l'ajustement de la tendance retenue change comme illustré dans les figures suivantes :

Pluviométrie Roize



a)



b)

Figure 53 : Ajustement sur graphique de Gumbel des pluviomètres aux alentours du bassin versant de la Roize, a) tendance avec cassure b) tendance sans cassure

On retient donc que les pluies sont comprises entre les deux tendances ce qui nous donne les pluies de temps de retour suivants :

Tableau 14 : P(T) [mm] pour la Roize

Temps de retour	Pluie avec cassure [mm]	Pluie sans cassure [mm]
2sem	19	19
1mois	31	31
2mois	42	42
6mois	58	58
1an	68	68
2ans	79	79
5ans	96	93
10ans	120	106
30ans	159	126
100ans	201	148

A noter qu'il semble que les valeurs de pluies obtenues avec notre analyse soient cohérentes avec celles calculées par Pinhas (1987) dans le cas où l'on considère une cassure.

4.3.3 Estimation des débits classés

On applique directement la transformation inverse entre débit pseudo-spécifique et débit absolu (cf. §4.2.2.3)

: $Q_{x\%} = Q_{x\%} * S_{BV}^{0.75}$ et on obtient ainsi le tableau suivant:

Tableau 15: Valeurs des débits classés pour la Roize

Quantile	Probabilité de non dépassement	Superficie BV: Débit [m³/s/km ^{1.5}]	Roize	Roize à la	Roize	Fréquence [j/an]	Fréquence [h/an]	Temps retour [an]
			au cône 16.06 Débit [m³/s]	PDD 12.2 Débit [m³/s]	supérieure 4.7 Débit [m³/s]			
0%	0	0.00209	0.02	0.01	0.01	365	8 760	0.0027
5%	0.05	0.00701	0.06	0.05	0.02	347	8 322	0.0029
10%	0.1	0.00931	0.07	0.06	0.03	329	7 884	0.0030
15%	0.15	0.0117	0.09	0.08	0.04	310	7 446	0.0032
20%	0.2	0.0149	0.12	0.10	0.05	292	7 008	0.0034
25%	0.25	0.0179	0.14	0.12	0.06	274	6 570	0.0037
30%	0.3	0.0216	0.17	0.14	0.07	256	6 132	0.0039
35%	0.35	0.0251	0.20	0.16	0.08	237	5 694	0.0042
40%	0.4	0.0289	0.23	0.19	0.09	219	5 256	0.0046
45%	0.45	0.0327	0.26	0.21	0.10	201	4 818	0.0050
50%	0.5	0.0376	0.30	0.25	0.12	183	4 380	0.0055
55%	0.55	0.0432	0.35	0.28	0.14	164	3 942	0.0061
60%	0.6	0.0502	0.40	0.33	0.16	146	3 504	0.0068
65%	0.65	0.0584	0.47	0.38	0.19	128	3 066	0.0078
70%	0.7	0.0680	0.55	0.44	0.22	110	2 628	0.0091
75%	0.75	0.0797	0.64	0.52	0.25	91.3	2 190	0.011
80%	0.8	0.0951	0.76	0.62	0.30	73.0	1 752	0.014
85%	0.85	0.116	0.93	0.76	0.37	54.8	1 314	0.018
90%	0.9	0.145	1.16	0.95	0.46	36.5	876	0.027
91%	0.91	0.152	1.22	1.00	0.49	32.9	788	0.030
92%	0.92	0.161	1.29	1.05	0.51	29.2	701	0.034
93%	0.93	0.171	1.37	1.12	0.55	25.6	613	0.039
94%	0.94	0.185	1.48	1.21	0.59	21.9	526	0.046
95%	0.95	0.199	1.60	1.30	0.64	18.3	438	0.055
96%	0.96	0.220	1.76	1.43	0.70	14.6	350	0.068
97%	0.97	0.252	2.02	1.64	0.80	11.0	263	0.091
98%	0.98	0.291	2.34	1.90	0.93	7.30	175	0.14
99%	0.99	0.367	2.94	2.39	1.17	3.65	88	0.27
99.50%	0.995	0.464	3.72	3.03	1.48	1.83	44	0.55
99.60%	0.996	0.499	4.00	3.26	1.59	1.46	35	0.68
99.70%	0.997	0.531	4.26	3.47	1.70	1.10	26	0.91
99.80%	0.998	0.589	4.73	3.85	1.88	0.730	18	1.4
99.90%	0.999	0.737	5.92	4.81	2.35	0.365	8.8	2.7
99.95%	0.9995	0.879	7.05	5.74	2.81	0.182	4.4	5.5
99.96%	0.9996	0.919	7.37	6.00	2.93	0.146	3.5	6.8
99.97%	0.9997	0.955	7.66	6.24	3.05	0.109	2.6	9.1
99.98%	0.9998	1.01	8.08	6.57	3.21	0.0730	1.8	13.7
99.99%	0.9999	1.05	8.45	6.87	3.36	0.0365	0.9	27.4

4.3.4 Estimation des hydrogrammes de crues

4.3.4.1 Estimation des débits de pointes crue

A Résultats selon les approches

Le Tableau 16 contient les estimations des débits réduits ($Q_{SPEED} = P_T - P_0$) selon les deux ajustements de pluies et les deux valeurs de P_0 , estimés sur l'échantillon local et sur le régional.

Tableau 16 : Débits réduits de points [mm] selon analyse SPEED pour la Roize selon les différents modèles hydrologiques (§4.2.3.6) et les différents ajustements de valeurs de pluies (Tableau 14)

Q[mm](T)	Pluie avec cassure, & P ₀ modèle régional	Pluie avec cassure, & P ₀ modèle local	Pluie sans cassure, & P ₀ modèle régional	Pluie sans cassure, & P ₀ modèle local
P ₀	75	97	75	97
10ans	45	23	31	9
30ans	84	62	51	29
100ans	126	104	73	51

Ces valeurs ne sont parlantes, on les rapporte en m³/s en appliquant la transformation inverse de SPEED: $Q = Q_{SPEED} * S^{0.75}/12$. On obtient alors les débits suivants au sommet du cône de déjection:

Tableau 17 : Débits de points [m³/s] selon analyse SPEED pour la Roize selon les différents modèles hydrologiques (§4.2.3.6) et les différents ajustements de valeurs de pluies (Tableau 14)

Q[m ³ /s](T)	Pluie avec cassure, & P ₀ modèle régional	Pluie avec cassure, & P ₀ modèle local	Pluie sans cassure, & P ₀ modèle régional	Pluie sans cassure, & P ₀ modèle local
10ans	30.1	15.4	20.7	6.0
30ans	56.2	41.4	34.1	19.4
100ans	84.2	69.5	48.8	34.1

En comparaison avec les données de la littérature (17-27-31 m³/s - Pinhas (1987)), nous obtenons des valeurs relativement différentes:

- La prise en compte de la cassure dans les pluies et d'un P₀ tiré de l'ensemble de l'analyse régionale semble très sécuritaire: on a alors pris en compte les pluies maximales et les taux d'absorption minimaux.
- La prise en compte de la cassure dans les pluies et de l'absorption particulière des bassins versants de la Chartreuse donne un ordre de grandeur équivalent pour la crue décennale mais une augmentation très marquée des débits rares. Ceci est lié au gradex particulièrement important.
- Le scénario d'inexistence de cassure dans les pluies et de saturation faible du bassin versant (P₀ régional) fournit des valeurs fortes de débits de crue décennale et une augmentation classique de l'ordre de 2 à 2.5 entre débit de pointe décennal et débit de pointe centennal.
- Le scénario de faible pluviométrie et de forte capacité d'absorption fourni un ordre de grandeur de débit décennal qui semble anormalement faible (0.5 m³/s/km²) mais permet de retrouver l'ordre de grandeur de Q100 retenu en 1987.

Ces réflexions nous poussent à écarter les scénarios 1 et 4 qui semblent trop sécuritaire (1) et trop optimiste (4). L'hydrologie de la Roize doit vraisemblablement se trouver entre ces deux tendances qui illustrent bien l'incertitude forte qui persiste sur ce type d'étude.

B Bilan

On constate à quel point les valeurs de débits peuvent évoluer en fonction des choix effectués, et ceci en particulier pour les grands temps de retour pour lesquels nous manquons cruellement de données. La valeur de débit centennal se trouve probablement du côté pluie avec cassure, là où une étude classique (pluie sans cassure) aurait minimisé les débits de forts temps de retour.

Dans la mesure où les enjeux pour la ville de Voreppe sont élevés, nous choisirons de retenir les estimations où la pluviométrie comporte une cassure (Figure 53) et où les estimations sont faites à partir du modèle local. Nous pensons ainsi nous placer dans la partie haute de l'intervalle d'incertitude des débits (choix sécuritaire).

4.3.4.2 Estimation des formes d'hydrogrammes

Les hydrogrammes sont estimés via la méthode proposée par le Ministère de l'Agriculture in (RTM 2014).

$$Q(t) = Q_p \frac{2 \left(\frac{2t}{3D} \right)^4}{1 + \left(\frac{2t}{3D} \right)^8}$$

Avec, Q_p , débit de pointe [m^3/s]; D , durée caractéristique de crue tel que $Q > 0.5Q_p$ [h] et t temps [h].

Le RTM38 (2006) avait retenu 3 scénarii de crues avec les durées caractéristiques suivantes:

Tableau 18: durées caractéristiques des crues de la Roize supérieure RTM38 (2006)

Scénario	Crue courte	Crue moyenne	Crue longue
Temps de concentration (h)	1,0	3,5	6,7
Durée totale de la crue (h)	3	11	21

En considérant prenant D égal au temps de concentration, les hydrogrammes ainsi obtenus sont les suivants:

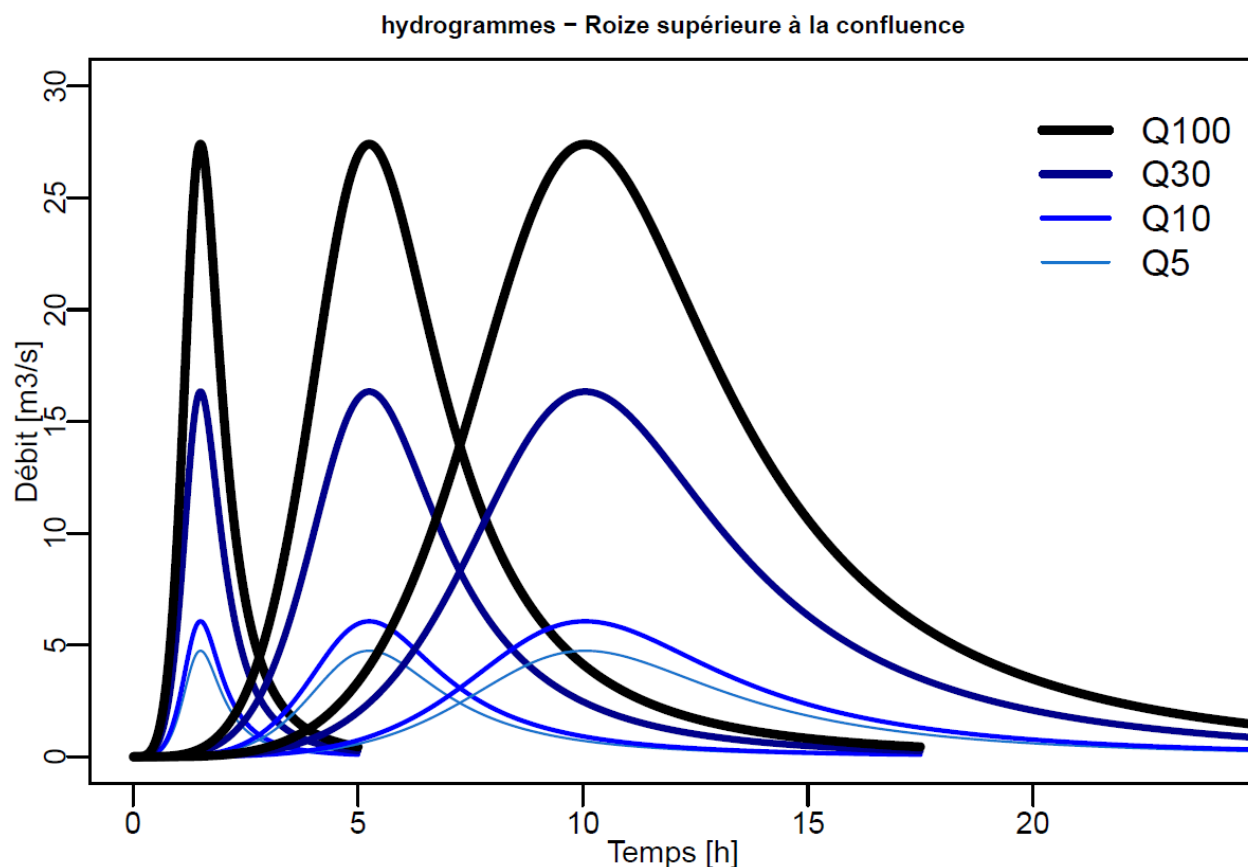


Figure 54: Exemples d'hydrogrammes de crues

Ces derniers ne visent pas à représenter un hydrogramme type au réalisme important. La durée des crues dans les petits bassins versants est très sujette au forçage de la durée de la pluie. On sait que ces types de courts d'eau sont aussi bien sujets aux crues éclaires qu'aux crues longues. L'analyse utilise trois durées de crues afin de montrer la sensibilité des résultats à ce paramètre mal connu et naturellement très variable.

A noter que les débits instantanés de pointe des crues de temps de retour 5 ans Q_{ix5A} ont été pris égaux à $Q_{ix10A}/1.15$, valeur que l'on retrouve en moyenne sur l'ensemble de l'échantillon ($Q_{ix10A}/Q_{ix5A} = 1.15 \pm 0.08$ (écart type)).

4.4 Variabilité interannuelle des débits

Une courbe des débits classée est une représentation statistique du régime d'écoulement le long d'une année. Elle est en générale estimée avec l'ensemble des données disponibles. Il existe toutefois une certaine variabilité interannuelle dans les écoulements, c'est-à-dire des années plus sèches et d'autres plutôt plus humides que la moyenne. Nous avons cherché à qualifier cette variabilité par une analyse plus précise de la station de la Vence à Proveysieux (voisine directe de la Roize). La série temporelle est représentée dans la figure suivante.

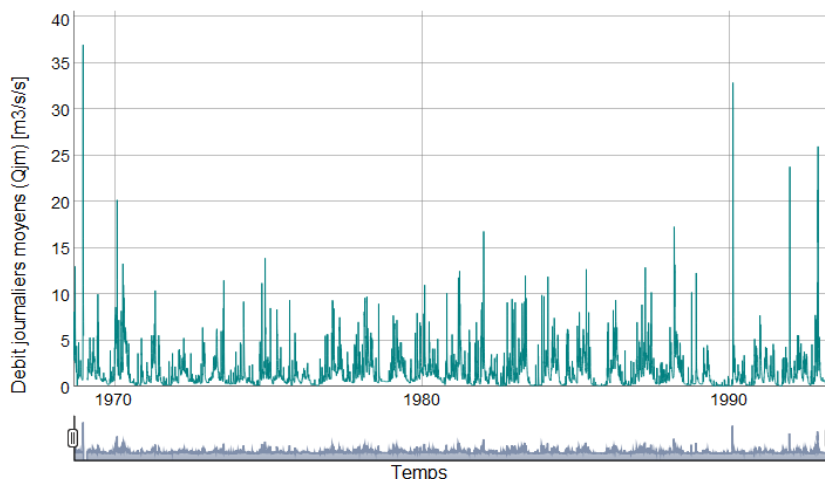


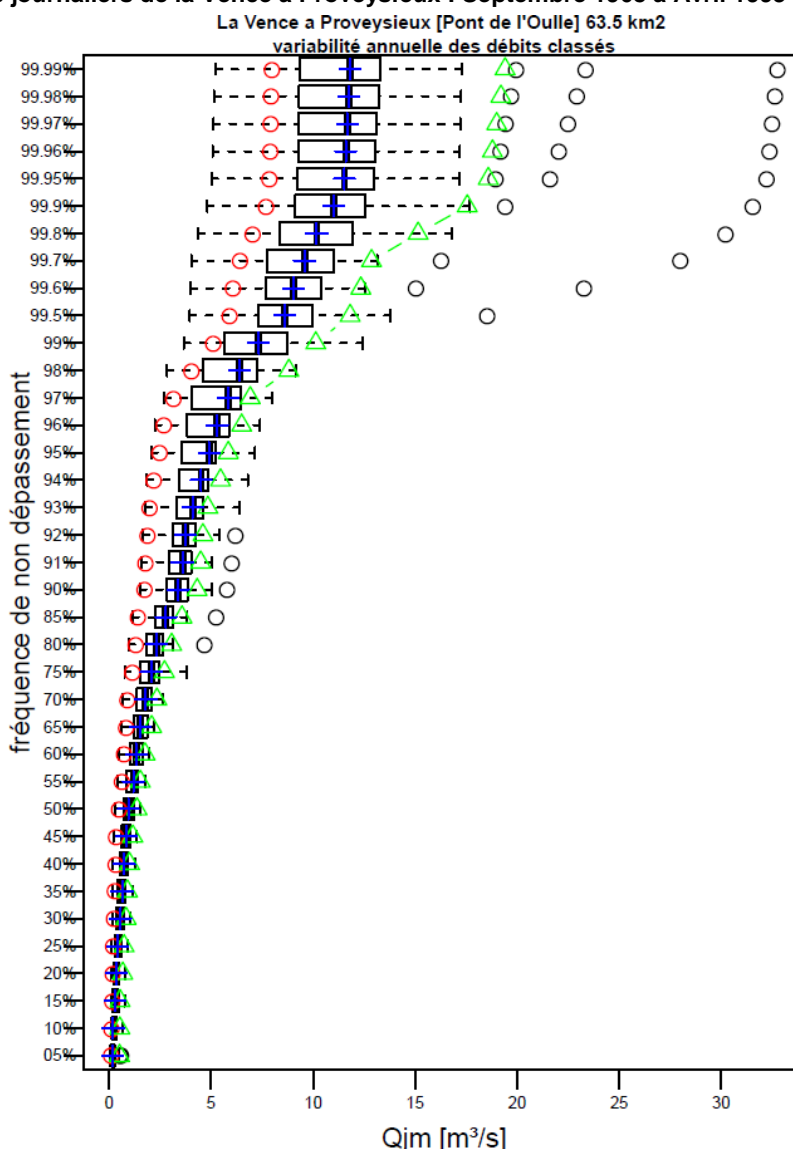
Figure 55: série temporelle des débits moyens journaliers de la Vence à Proveysieux : Septembre 1968 à Avril 1993

Une analyse a été menée pour tenter de déterminer les corrections à apporter à la courbe des débits classés moyenne pour représenter une année « sèche » et une année « humide ». La courbe des débits classés a été recalculée pour chacune des 30 années hydrologiques mesurées. La Figure 56 représente la variabilité de chacune des valeurs des $Q_{X\%}$, X étant la probabilité de non dépassement. Ceci est une bonne illustration de la variabilité interannuelle des débits journaliers que l'on peut retrouver dans les cours d'eau de montagne.

On distingue en particulier 3 années particulièrement humide pendant lesquels la courbe représentative d'une année dite humide a été globalement dépassée pour les quantiles rares, c'est-à-dire supérieure à 99% (représentant ~ 3 jours de crues intenses sur l'année).

Figure 56 : Variabilité interannuelle des débits classés de la Vence

La courbe rouge représentant une année sèche correspond arbitrairement au quantile 10% (c'est-à-dire que cette année correspond à un temps de retour de 10ans) tandis que la courbe verte représentant une année humide correspond au quantile 90% (idem T=10ans). La courbe bleu correspond à la médiane.



Les valeurs de pourcentage de correction à appliquer à la courbe des débits classés de la Roize pour obtenir les valeurs des débits des années sont résumées Tableau 19 et ont été calculé suivant la formule:

$$\text{Correction année sèche, } X\% = \frac{(Q_{X\%})_{10\%} - (Q_{X\%})_{50\%}}{(Q_{X\%})_{50\%}} \text{ et } \text{Correction année humide, } X\% = \frac{(Q_{X\%})_{90\%} - (Q_{X\%})_{50\%}}{(Q_{X\%})_{50\%}}$$

Tableau 19 : Coefficients de correction à appliquer à la courbe des débits classés pour représenter une année sèche ou humide de temps de retour 10 ans, calculés à partir des données de la Vence

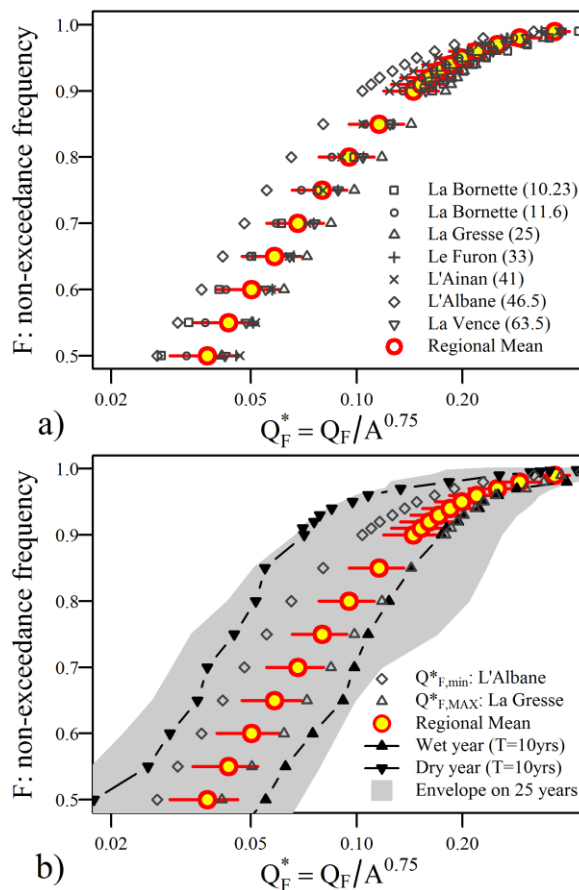
Fréquence de non dépassement	Correction à appliquer pour année sèche	Correction à appliquer pour année humide	Fréquence de non dépassement	Correction à appliquer pour année sèche	Correction à appliquer pour année humide
0.05	-43%	220%	0.92	-50%	23%
0.1	-43%	165%	0.93	-51%	18%
0.15	-44%	90%	0.94	-51%	21%
0.2	-49%	87%	0.95	-50%	19%
0.25	-52%	78%	0.96	-49%	23%
0.3	-57%	49%	0.97	-46%	18%
0.35	-55%	41%	0.98	-37%	38%
0.4	-58%	35%	0.99	-30%	38%
0.45	-59%	39%	0.995	-32%	37%
0.5	-50%	44%	0.996	-33%	37%
0.55	-47%	29%	0.997	-33%	34%
0.6	-45%	33%	0.998	-31%	49%
0.65	-46%	37%	0.999	-30%	60%
0.7	-50%	30%	0.9995	-32%	61%
0.75	-44%	32%	0.9996	-32%	62%
0.8	-45%	31%	0.9997	-32%	63%
0.85	-50%	28%	0.9998	-32%	63%
0.9	-49%	27%	0.9999	-33%	64%
0.91	-51%	25%			

On distingue sur la Figure 56 à quel point cette variabilité est importante : pour une même fréquence de non dépassement, les débits peuvent varier du simple au double en fonction de l'année (pour les quantiles faibles) et la correction est en moyenne de l'ordre de (-1/2;+1/3). L'impact sur le transport solide peut être très important : une rivière pourra se charger en matériaux provenant d'érosions diverses lors d'années sèches et transporter toute cette accumulation lors d'une année humide.

L'ensemble des données hydrologiques de courbe des débits classés ont été rassemblés dans la figure ci-contre tirée de Piton and Recking (2017) : la partie (a) montre la faible dispersion des débits pseudo spécifiques autour de la valeur moyenne régionale. Les barres d'erreur rouge sont estimée via l'écart type des valeurs de Q^* .

La partie (b) retrace la variabilité interannuelle, estimée via les coefficients correcteurs tirés de la Vence, du débit de la Roize. On remarque que la variabilité interannuelle sur un site (enveloppe grise) est plus importante la variabilité géographique, i.e., entre sites. En conséquence les courbes de l'Albane et de la Gresse, minimum et maximum de l'échantillon, sont encadrées par les courbes des années sèches et humides.

Figure 57 : Courbes des débits pseudo-spécifiques classés : a) échantillon des stations régionales retenues dans l'analyses et valeur moyenne régionale et b) variabilité interannuelle approchées par les coefficients de correction estimés à travers l'hydrologie de la Vence.



5 Analyse hydraulique

Pour chacun des sites GRa à GRg visibles Figure 9, nous avons pris les mesures suivantes :

- la granulométrie dans le lit et celle sur les bancs ce qui nous donnera les D_{84} qui nous serviront partie 0.
- trois profils en travers
- un profil en long.

L'ensemble de l'analyse détaillée dans ce chapitre et le suivant fait appel aux méthodes recommandées dans le chapitre "Hydraulique et transport solide" du guide « torrent et rivières de montagnes » (Recking et al. 2013).

Les valeurs de débits liquides passant dans chaque site sont calculées suivant la courbe des débits classés pseudo-spécifique et les valeurs de surface de bassin versant (valeurs disponibles Tableau 20).

Tableau 20 : Surfaces drainantes respectives des GR et autres paramètres globaux

Site	Taille des BV [km ²]	Pente [m/m]	D_{84} (lit) [m]	D_{84} (banc) [m]
Sommet cône de déjection	16.06	8.5%	0.43	0.11
GRa	12.16	8.5%	0.24	0.25
GRb	4.64	10.9%	0.40	0.29
GRc	4.49	10.0%	0.36	0.24
GRd	4.1	15.2%	0.32	0.28
GRe	3.93	14.9%	0.35	0.28
GRF	3.29	14.3%	0.28	0.21
Grg	3.21	8.5%	0.43	0.11

5.1 Hauteur de crue dans quelques sections caractéristiques

A l'aide du logiciel de programmation R, chacun des profils en travers a été tracé et ses paramètres morphométriques principaux ont été estimés (Figure 58 a).

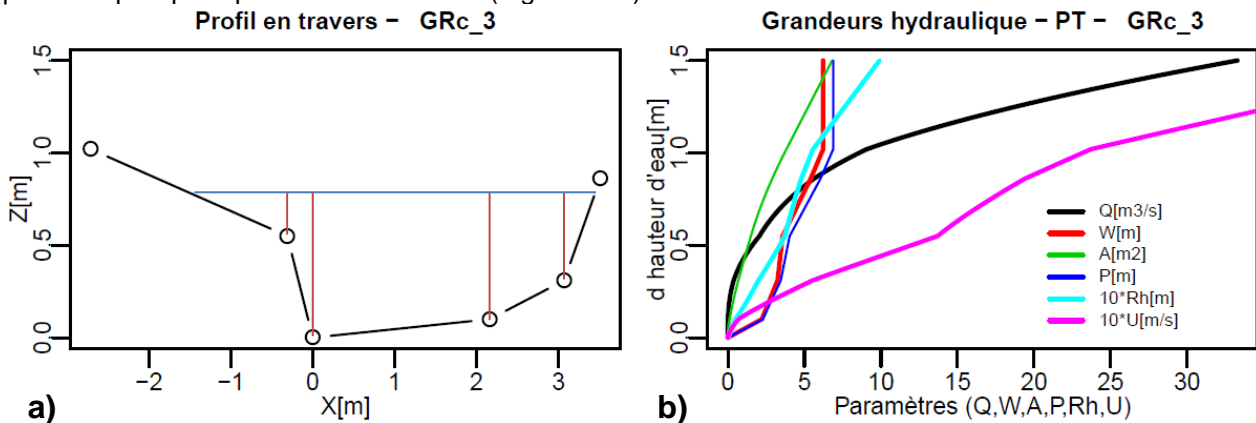


Figure 58 : a) profil en travers 3, site GRc et b) Courbe des paramètres GRc_3

La suite consiste ensuite à calculer pour une hauteur d'eau donné, la largeur au miroir W , le périmètre mouillé P , la section mouillée A , ainsi que le rayon hydraulique $Rh = A/P$ en sommant chacune des contributions des sous sections $(X_i, Z_i) \rightarrow (X_{i+1}, Z_{i+1})$ par la méthode des trapèzes telle qu'illustrée par les lignes rouges.

Nous obtenons alors le graphique Figure 58 (b).représentant l'évolution de chacun de ces paramètres géométriques en fonction de la hauteur d'eau à partir du point (0,0). L'évolution de ces paramètres géométriques est fortement conditionnée par la manière dont ils sont calculés. Les discontinuités dans les profils en travers peuvent poser des problèmes (chenaux secondaire, terrasse plane, etc.). Une analyse des processus de débordements et de l'évolution du rayon hydraulique en fonction de la hauteur d'eau a été menée pour critiquer la méthode. Par exemple, l'eau remplit parfois son chenal et il finit par y avoir une surverse lorsque le niveau d'eau dépasse la hauteur de la crête ce qui active ensuite un autre chenal d'écoulement ; sur un autre site, une défluence amont peut permettre l'alimentation conjointe de chenaux multiples, un calcul de capacité hydraulique de chacun d'entre eux seraient alors théoriquement nécessaire. Prendre en compte ces effets aurait pour ainsi dire nécessité une modélisation numérique 2D prenant en compte le transport solide, alourdissant considérablement les calculs. Il a donc été choisi de considérer que l'eau se répartit de manière uniforme dans toute la section et en général seul le chenal principal a été modélisé (les analyses suivantes ont montré qu'il était rarement débordé sur une année normale – voir les courbes en annexes).

5.2 Courbe de tarage

5.2.1 Equations utilisées

5.2.1.1 Méthode d'"hydraulique détaillée"

Dans cette première formulation, la vitesse est estimée à l'aide de la formule de Ferguson (2007) :

$$\frac{U}{\sqrt{gJR}} = \frac{2.5(R/D_{84})}{\sqrt{1 + 0.15(R/D_{84})^{5/3}}}$$

Avec :

- U la vitesse de l'eau en m/s uniformément répartie dans la section;
- J la pente moyenne en m/m calculée à l'aide du profil en long;
- D_{84} le diamètre (en mètre) tel que 84% de la granulométrie est plus fine;
- g l'accélération de la pesanteur en m/s^{-2}

Nous définissons ainsi des tables de valeurs de hauteur d'eau, largeur au miroir, rayon hydraulique, vitesse, débit, etc. Cette table est estimée, tous les centimètres, jusqu'à une hauteur d'eau de 1.5 m au-dessus du fond.

5.2.1.2 Mise en œuvre pratique

Sur la base des tables de valeurs, pour chaque valeur de débit issue de la courbe des débits classés, la valeur des paramètres (hauteur, W , U ,...) est interpolée de manière linéaire par rapport au débit. Si $Y_{X\%}$ est la valeur du paramètre Y pour le débit de probabilité de non dépassement $Q_{X\%}$ alors:

$$Y_{X\%} = \frac{Y_{i+1} - Y_i}{Q_{i+1} - Q_i} (Q_{X\%} - Q_i) + Y_i \quad \text{avec } i \text{ tel que } Q_i < Q_{X\%} < Q_{i+1}$$

Nous pouvons ainsi remonter à la hauteur d'eau d et aux autres paramètres et calculer la courbe de tarage en bleu (Figure 58) pour chaque profil en travers (PT). Voici celle obtenue pour le site GR4 est présentée Figure 59.

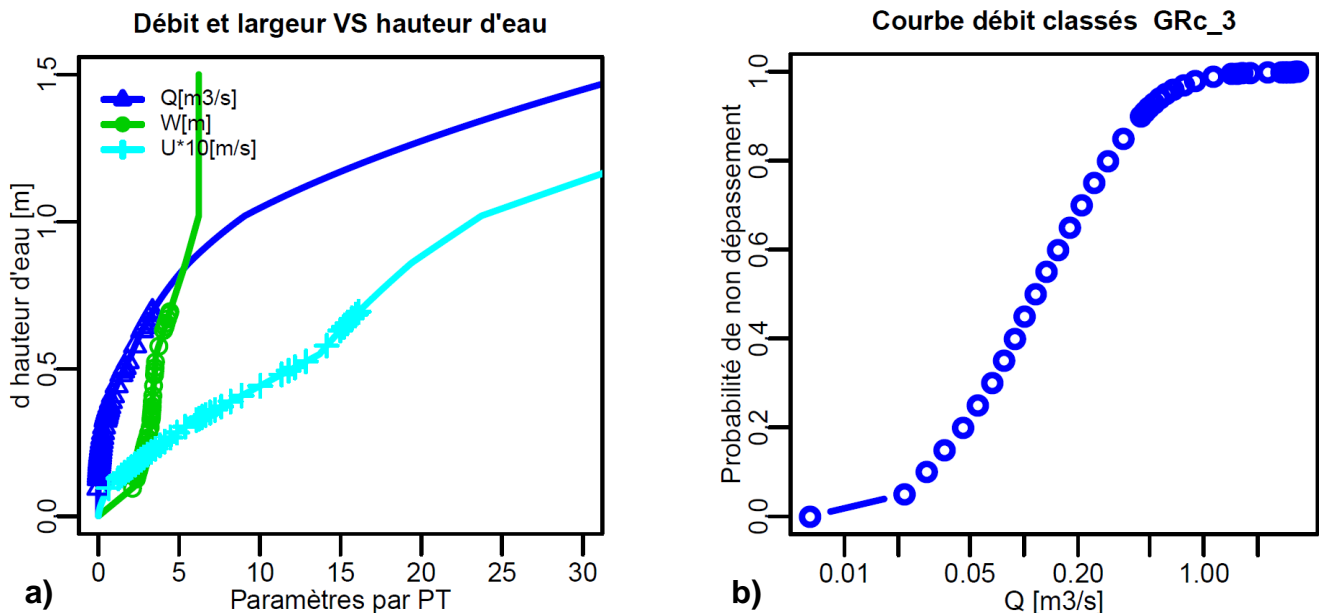


Figure 59 : a) Exemple de courbe de tarage et autres paramètres et b) courbe des débits classés pour lesquels sont interpolées les valeurs affichées en (a)

Les valeurs interpolées sont affichées sous la forme de puces alors que les valeurs estimées dans les tables de valeur centimétrique sont représentées en courbe continue. On remarque que les vitesses ne dépassent pas 2 m/s et les hauteurs ne dépassent pas 0.8 m dans les valeurs de la courbe des débits classée estimée sur le site.

L'ensemble des profils en travers associés à leurs courbes de tarage est disponible en annexe.

La contrainte de cisaillement adimensionnelle est ensuite estimée comme suit:

$$\tau^* = \frac{R_h J}{\Delta D_{84}}$$

Avec:

- J la pente moyenne en m/m calculée à l'aide du profil en long
- D_{84} le diamètre en m tel que 84% de la granulométrie y est inférieure
- R_h le rayon hydraulique en m
- Δ la densité du sédiment déjàugé, considérée comme égale à 1.65.

5.2.2 Méthode d'"hydraulique simplifiée"

Une seconde méthode a été mise en œuvre. Cette dernière considère une géométrie très simplifiée des profils en travers: elle fait l'hypothèse d'une section rectangulaire. Elle a été mise en œuvre afin de permettre l'utilisation de l'ensemble de la méthode préconisée dans Piton and Recking (2017)

La largeur utilisée doit théoriquement être celle de la largeur de plein bord du chenal actif du torrent. Ici, les calculs menés dans la section précédente ont servi à estimer la largeur du chenal lorsque 75 cm d'eau si écoulait. Nous avons considéré arbitrairement que ceci correspond sensiblement à la largeur mise en eau pour les plus hautes eaux annuelles.

Tableau 21: Largeur au miroir pour h=75cm

Site	Profil	Largeur
GRa	GRa_1	6.05
	GRa_2	5.58
	GRa_3	5.23
GRb	GRb_1	6
	GRb_2*	5.03
	GRb_3*	5.9
GRc	GRc_1*	7.61
	GRc_2	9.13
	GRc_3	4.75
GRd	GRd_1	3.51
	GRd_2	7.07
	GRd_3	8.82
GRe	GRd_4	5.22
	GRE_1	4.56
	GRE_2	6.61
GRf	GRE_3	11.24
	GRf_1	4.6
	GRg_1	7.42
GRg	GRg_2	3.77
	GRg_3	3.5

*Valeur W1, W2 et W3 dans la Figure 63

La hauteur d'eau est ensuite estimée à l'aide de l'équation:

$$d = 0.015 D_{84} \frac{q^{*2p}}{p^{2.5}}$$

Avec $q^* = q / \sqrt{g S D_{84}^3}$, q débit spécifique= Q/W et $p=0.23$ si $q^* < 100$ et $p=0.3$ dans les autres cas. Cette formule peut être retrouvée dans Recking et al. (2016). La contrainte de cisaillement adimensionnelle est ensuite estimée comme suit:

$$\tau^* = \frac{hJ}{\Delta D_{84}}$$

Avec la hauteur d'eau en remplacement du rayon hydraulique.

6 Etude du transport solide

On rappelle ce qui a été écrit dans la synthèse géomorphologique en 2.8 : les sédiments sont majoritairement fournis par la Roize supérieure, au niveau des falaises de marno-calcaire du haut bassin versant. De plus, le lit de cette branche principale montre de nombreuses traces d'activités torrentielles et est caractérisé par la présence de nombreuses zones de régulations du transport solide : zones de lit plus larges situées en amont de verrous rocheux ou de zones très stables et plus raides du lit.

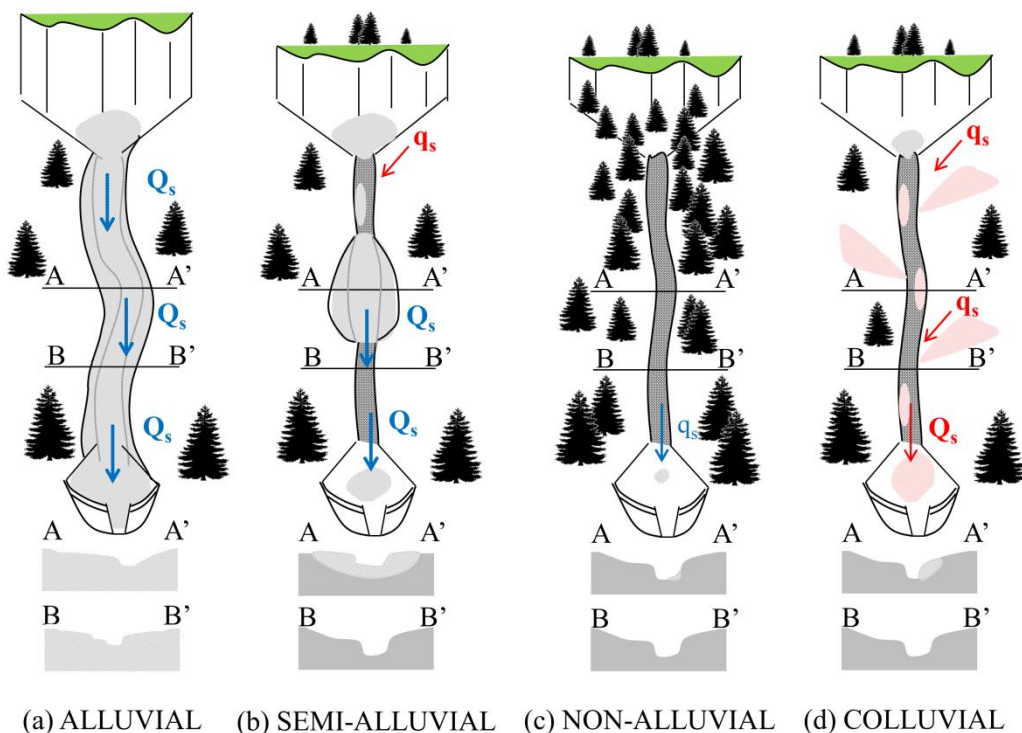
L'érosion du haut bassin versant est, elle, due à plusieurs facteurs :

- la neige causant des avalanches entraînant des matériaux
- les attaques météoriques (gel, etc.)
- le ruissellement (Pinhas 1987)

6.1 Contexte sédimentaire et processus en jeu

Obtenir des valeurs de transport solide cohérentes par rapport à la réalité dans les torrents de montagne n'est pas aisé. Les processus mis en jeu ainsi que le contexte sédimentaire doivent être clairement identifiés afin d'utiliser les bonnes formules. Ceci est largement lié au fait que contrairement aux rivières de plaines qui s'écoulent sur des lits formés de matériaux alluvionnaires qu'elles ont elles-mêmes transportés et déposés dans les vallées, les lits des cours d'eau de montagne sont régulièrement très influencés par des processus externes, colluviaux, tels que les glissements de terrains, chutes de blocs, avalanches, restes morainiques ou tout simplement par la présence de la roche mère affleurante.

Les formules de transport solide sont basées sur l'hypothèse que le lit du cours d'eau est équilibré avec ses forçages extérieurs que sont l'hydrologie, le débit solide et la granulométrie de ce dernier (concept de balance de Lane). Dans la situation d'un lit pavé de blocs colluviaux avec présence d'apports solides plus ou moins sporadiques liés à l'activation de sources sédimentaires à la granulométrie parfois relativement fine comparée au pavage, le calcul du transport solide d'un torrent est un véritable casse-tête. La Figure 60 illustre quatre cas classiques de fonctionnement hydro-sédimentaires. Elle tente d'expliquer la transition que l'on peut observer entre des faciès de cours d'eau purement alluvionnaires vers des lits de torrents purement colluvionnaires, c'est-à-dire dont le comportant est contrôlé par l'activité des versants.



Q_s & q_s : Sediment comes from the bed
 Q_s & q_s : Sediment comes from lateral input

← Alluvial, mobile material →
 ← Material covered by a static armor →

Figure 60 : Illustration de différents scénarios de contrôle du débit solide dans les torrents de montagne, en gris clair les sédiments transportés régulièrement et en gris foncé, les éléments du lit pavé, rarement transportés (tiré de Piton and Recking 2017)

- La situation des systèmes fluviaux de plaine est un lit purement alluvionnaire où l'ensemble des sédiments observés dans le lit sont régulièrement transportés (Figure 60 a). Les calculs de transport solide peuvent alors être menés de façon classique.
- Dans certaines circonstances ; les influences colluvionnaires ne se font ressentir que localement (présence de gorges, par exemple) et des zones complètement alluvionnaires sont régulièrement rencontrées sur le linéaire du cours d'eau (Figure 60 b). Elles sont souvent désignées comme zones de régulation du transport solide dans le jargon de l'hydraulique torrentielle. Les calculs de transport solide classiques peuvent alors être menés sur ces zones alluvionnaires ; hors de celles-ci la granulométrie du lit pavé n'est pas représentative du transport solide réel du cours d'eau.
- Dans certains cas de stabilisation très avancées, il n'y a pas d'apports et le lit n'est pas alluvial. Il est totalement pavé des gros blocs très rarement mobilisés. Seule la fraction fine de la courbe granulométrique du lit sera transportée au gré des crues courantes (Figure 60 c). Le transport solide est extrêmement faible. L'application des formules de transport solides classiques (tel que Recking (2013)) est alors de nouveau possible en prenant à en compte la granulométrie du lit. Le transport estimé est alors très faible. Les formules calées sur des données de laboratoire ont alors tendance à surestimer le transport réel.
- Dans les cas les plus compliqués, deux populations de sédiments coexistent : un lit grossier peu mobile responsable de l'hydraulique et des sédiments très mobiles (que l'on retrouve éventuellement dans des poches sédimentaires, sur des bancs perchés) provenant d'apports exogènes, activés lors des crues (Figure 60 d).

Le fonctionnement de la Roize varie au cours de son linéaire et en fonction de l'activation des sources situées dans les versants. En effet, au fur et à mesure que l'on remonte son lit on peut voir les changements géomorphologiques depuis un faciès majoritairement composé de step-pool puis de cascades (lit pavé de gros blocs (Montgomery and Buffington 1997)) et enfin clairement colluvial à partir des gorges (Figure 9).

Les quatre zones de régulation présentes dans le torrent nous laissent penser⁴ que la Roize fonctionne suivant les scénarios semi-alluvial et non-alluvial dans la partie en aval de la gorge proche des confluences de ravines principales sommitales et selon un scénario colluvial au-dessus. Les zones de dépôts permettent un élargissement important du lit lors de crues et jouent le rôle de tampon en régulant le transport solide venant de l'amont et transitant vers l'aval. Toutefois l'apparition de structures de types step-pool dans les zones de régulation aussi laisse penser à un système sous-alimenté en sédiment. On pourrait ainsi être dans un système non alluvial, qui devient semi alluvial ou colluvial lors d'épisode de forte production sédimentaire dans le haut bassin versant.

Les matériaux proviennent essentiellement du haut bassin-versant ainsi que des deux affluents concernés: la Petite Roize et dans une moindre mesure Charminelle. Ceux-ci représentent peu les matériaux directement issus du lit. Dès lors, on testera dans la suite les méthodes de calcul des deux types semi-alluvial et non-alluvial et on comparera les résultats avec les volumes curés dans la plage de dépôt. Il faudra distinguer dans les relevés de granulométries, celles représentant la rugosité du lit et donc extraites directement dans le chenal de celles qui sont transportées et qui transitent depuis l'amont vers l'aval, extraites dans les bancs du chenal ou dans la plage de dépôt. Des explications supplémentaires sont apportées § 2.5.

6.2 Estimation du transport solide par site

6.2.1 Equations utilisées

Les calculs de débits solides ont été réalisés avec des équations modifiées vis-à-vis de celles proposées dans Recking (2013), complété par Recking et al. (2016) et par le travail qui sera prochaine publié dans Piton and Recking (2017) et dans Piton (2016).

$$\Phi = \frac{q_{sv}}{\sqrt{g(s-1)D_{bedload}^3}} = 14 \frac{\tau^{*2.5}}{1 + \left(\frac{\tau_m^*}{\tau^*}\right)^4} \quad \text{avec} \quad \tau_m^* = 1.5J^{0.75}$$

⁴ On verra par la suite que ce diagnostic a été révisé au regard des résultats de calculs et après réflexion : les zones de régulations montrant des faciès de step-pool, faciès typique des lits en déficits sédimentaires, ces zones sont aussi des zones pavés transférant rapidement la charge alluviale charriée lors des épisodes de crue normaux. Elles ont par contre probablement un rôle clé dans la régulation du transport solide des laves torrentielles ou des épisodes de charriage très intense.

Avec :

- Φ le débit solide spécifique adimensionnel,
- q_{sv} le débit solide spécifique en m^3/s , = Q_{sv}/W débit solide total / largeur
- W la largeur au miroir en m
- J la pente moyenne en m/m calculée à l'aide du profil en long
- D_{84} le diamètre en m tel que 84% de la granulométrie y est inférieure
- g l'accélération de la pesanteur en m/s^{-2}
- R_h le rayon hydraulique en m
- Δ la densité du sédiment déjaugé, considérée comme égale à 1.65.

6.2.2 Mise en œuvre pratique - approche annuelle moyenne

Pour chaque valeur de débit liquide, une hauteur d'eau ainsi que l'ensemble des paramètres d'écoulements (R_h et W) ont été estimés selon la méthode définie 5.2.1.2. Le nombre de Shields τ^* a été calculé comme présenté plus haut et le débit solide apparent résultant selon la formule inverse :

$$Q_{sv,apparent} = Wq_{sv} * \frac{2650}{2000} = W\Phi \sqrt{g(s-1)D_{bedload}^3} * \frac{2650}{2000}$$

La correction *2650/2000 est liée au fait que q_{sv} estime un débit solide volumétrique de sédiments (sans compter la porosité des dépôts) ; dans la mesure où nous voulons comparer ces résultats aux volumes curés dans la plage de dépôt, nous avons retransformé les débits de kg/s en des m^3/s apparents en considérant une densité moyenne de l'ordre de 2.0 t/m³.

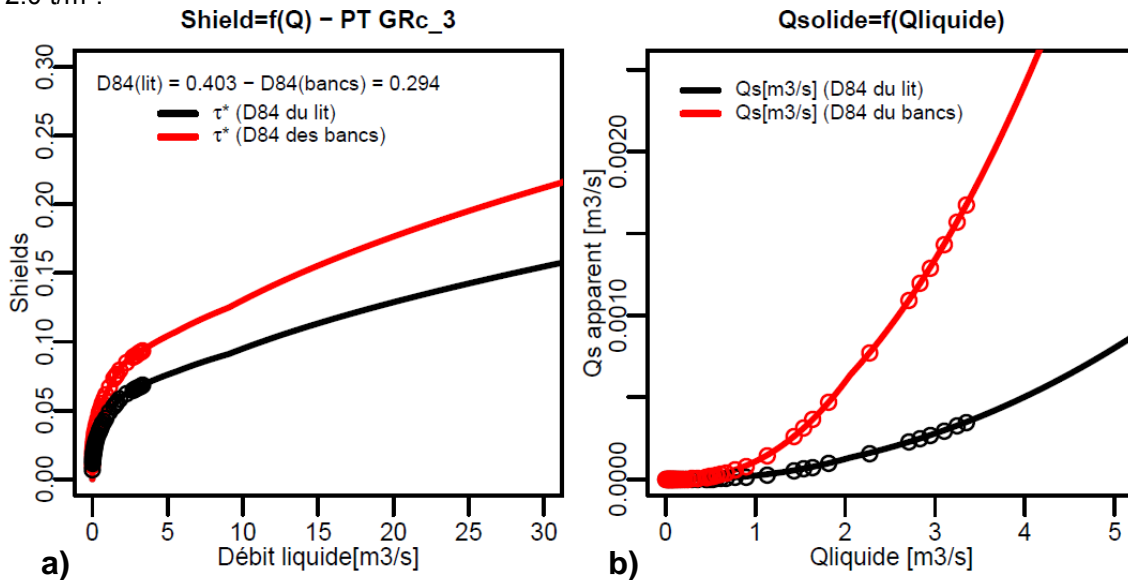


Figure 61 : a) Valeurs du paramètre de Shield estimé pour la granulométrie des bancs ou du lit évoluant en fonction du débit liquide et b) débit solide apparent en fonction du débit liquide pour le PT GRc_3. Les points représentent les valeurs caractéristiques de la courbe des débits classés

On constate que sur un site tel que le GR0, même pour les débits liquides rares de la courbe des débits classés, le nombre de Shield ne dépasse pas 0.10 et le débit solide 20 l/s. Ce calcul est ensuite appliqué à l'ensemble de la courbe des débits classés et le volume transporté annuel est déterminé en intégrant la courbe des débits solides classés par la méthode des trapèzes (chaque intervalle de temps est multiplié par la moyenne des débits solide correspondant aux bornes supérieure et inférieure de l'intervalle de temps). L'ensemble de ces calculs sont illustrés par la figure suivante :

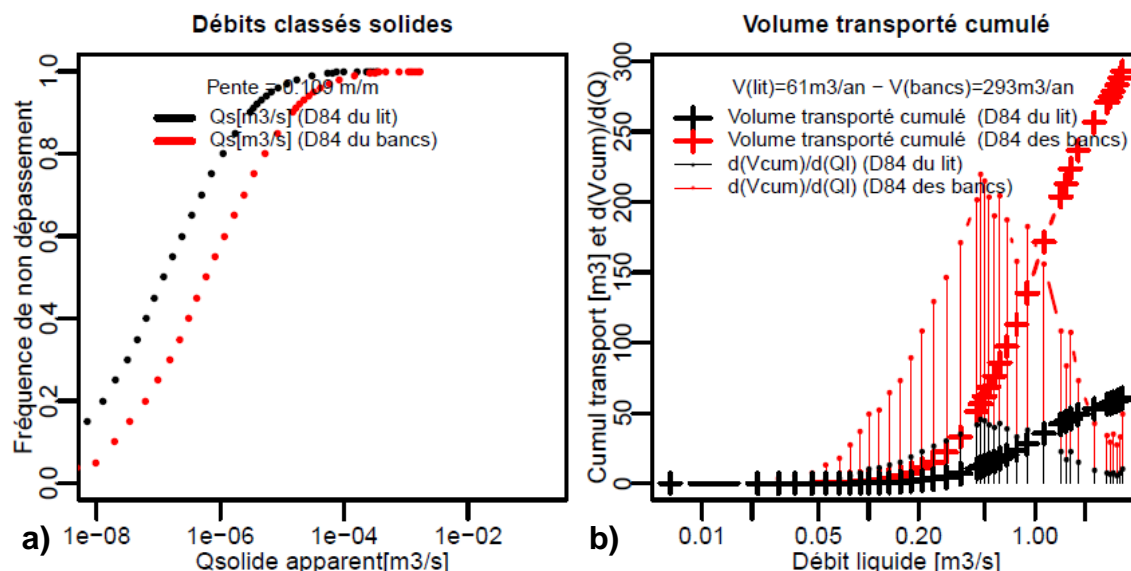


Figure 62 : a) courbe des débits classés solides et b) cumul annuel transporté et dérivé de la courbe indiquant les débits les plus efficaces en terme de transport (produit de probabilité d'occurrence et d'intensité de transport)

Les débits liquides les plus efficaces dans ce travail de transport étant ceux de l'ordre de 0.5 à 1 m³/s, de l'ordre de Q_{90%}, dépassé près de 30 jours par an. On calcule donc de cette manière un transport solide "de fond" en lien avec les hautes eaux annuelles et non un transport solide événementiel lié à des cours épisodiques de transport très intense.

6.2.2.1 Résultats de calculs – hydraulique détaillée

Au global, c'est-à-dire en prenant en compte les deux potentielles granulométries à utiliser et les années sèches, moyenne et humide, la variabilité des volumes solides estimés est rapportée Tableau 22 pour la méthode d'hydraulique détaillée.

Tableau 22 : Volumes solides transportés annuellement – hydraulique détaillée

GSD ->	Lit	Lit	Lit	Bancs	Bancs	Bancs
Hydrologie->	Sèche	Moyenne	Humide	Sèche	Moyenne	Humide
Volume transporté annuel (différence relative par rapport année moyenne)						
Site	[m3/an]	[m3/an]	[m3/an]	[m3/an]	[m3/an]	[m3/an]
GRa	42 (-68%)	133	283 (114%)	27 617 (-67%)	82 662	149 973 (81%)
GRb	43 (-69%)	138	298 (116%)	31 (-69%)	100	216 (116%)
GRC	15 (-68%)	45	93 (105%)	70 (-68%)	220	449 (104%)
GRd	16 (-68%)	49	100 (104%)	115 (-68%)	359	729 (103%)
GRe	49 (-67%)	150	298 (98%)	98 (-67%)	297	590 (98%)
GRf	41 (-68%)	127	262 (106%)	124 (-68%)	389	798 (105%)
GRg	68 (-67%)	208	423 (104%)	264 (-67%)	808	1 635 (102%)
Médiane	41	127	262	115	359	729
Moyenne (GRc-GRg)	38 (-68%)	116	235 (104%)	134 (-68%)	415	840 (103%)

Première constatation, la variabilité de la courbe des débits classés sur l'hydrologie entraîne des variations de volumes transportés de -2/3 et ~+1 par rapport à une année moyenne pour une année sèche et une année humide.

Sauf pour GRa et GRb où les D_{84} sont douteux (D_{84} du lit mesuré dans la plage de dépôt pour GRa et bancs et lit ne se distinguent pas sur GRb), les volumes calculés avec la granulométrie des bancs, plus fine, sont 2 à 7 fois supérieurs à ceux calculés avec la granulométrie du lit.

Hors ces deux sites aval, les ordres de grandeurs estimés montrent assez peu de dispersion (pour des calculs de transport solide – voir plus loin) et convergent vers des estimations de:

- Environ 350 m³/an, +/- 50% avec les sédiments des bancs.
- Environ 125 m³/an, +/-60% avec les sédiments du lit.

On notera que les estimations avec les matériaux du lit sont très cohérentes avec les autres estimations, même sur les sites aval et malgré l'hydrologie de GRa, significativement plus forte puisque subissant les apports de la Roizette (son D_{84} est aussi significativement plus grand en lien avec l'influence de la Roizette qui lessive plus fortement ce bief).

On rappelle que les volumes transportés annuels estimés selon les données de curage de la plage de dépôt sur 25 ans sont de 950 m³/an à 2 050 m³/an en moyenne avec une variabilité interannuelle très forte. On considère en général que les volumes indiqués par les entreprises de terrassement sont les valeurs limites basses de l'intervalle d'incertitude.

6.2.2.2 Résultats de calculs – hydraulique simplifiée

Dans le cas de l'approche avec en hydraulique simplifiée, une troisième granulométrie a été testée : celle de la plage de dépôt (PDD) en cohérence avec les théories développées par Piton and Recking (2017). Les résultats sont les suivants:

Tableau 23: Volumes solides transportés annuellement – hydraulique simplifiée

Site	Pente [m/m]	GSD -> Hydrologie-> Surface BV [km ²]	Volume transporté annuellement [m3/an] et différence par rapport à une année moyenne [%]								
			Lit Sèche [m3/an]	Lit Moyenne [m3/an]	Lit Humide [m3/an]	Bancs Sèche [m3/an]	Bancs Moyenne [m3/an]	Bancs Humide [m3/an]	PDD Sèche [m3/an]	PDD Moyenne [m3/an]	PDD Humide [m3/an]
GRa	8.5%	12.16	15 -73%	54	172 220%	10 176 -71%	34 535	85 458 147%	10 176 -71%	34 535	85 458 147%
GRb	8.5%	4.64	10 -73%	36	115 220%	7 -73%	26	83 220%	414 -73%	1 504	4 534 201%
GRc	10.9%	4.49	2 -73%	8	25 221%	10 -73%	37	119 220%	1 215 -72%	4 374	12 762 192%
GRd	10.0%	4.10	3 -73%	12	38 220%	24 -73%	87	277 219%	1 067 -72%	3 816	10 921 186%
GRe	15.2%	3.93	7 -73%	24	77 221%	13 -73%	48	153 220%	1 214 -72%	4 399	13 110 198%
GRf	14.9%	3.29	6 -73%	21	68 221%	18 -73%	65	209 220%	1 654 -72%	5 986	17 713 196%
GRg	14.3%	3.21	13 -73%	47	152 220%	50 -73%	184	587 218%	1 157 -72%	4 178	12 306 195%
		médiane	6	23	73	15	57	181	1 185	4 276	12 534
		moyenne=	7	25	79	20	75	238	1 120	4 043	11 891
			-73%		220%	-73%		220%	-72%		195%

On a ajouté à cette approche des calculs réalisés avec la granulométrie mesurée dans la plage de dépôt (celle considérée comme représentative des bancs de GRa) comme étant représentative des matériaux transporté en complément avec celle des bancs et celle du lit mesurée localement.

Première constatation: les volumes annuels estimés avec les granulométries du lit et des bancs ont diminué d'un facteur 5 à 7. Ceci est lié à l'estimation du nombre de Shield qui est maximisée dans le cas des profils en travers détaillés alors que la géométrie rectangulaire minimise ce dernier. Compte tenu que la formule de Recking est calibrée avec des estimations simplifiées (hypothèse de forme rectangulaire), la formule doit être utilisée avec le même type de formulation et non en prenant en compte des estimations détaillée des paramètres hydrauliques.

Seconde constatation, quand on prend en compte les granulométries des bancs ou de la PDD, les volumes transportés augmentent très significativement en aval de la confluence (GRa). En amont, les volumes transportés sont globalement cohérents avec l'augmentation de la pente vers l'amont. Les estimations réalisées avec les granulométries du lit sont ridiculement petites et l'augmentation n'est pas visible en GRa: la granulométrie des step-pools située entre la confluence et la PDD est particulièrement grossière. Les apports hydrologiques de la Roizette viennent lessiver les apports solides de la Roize supérieure.

Au bilan **le meilleur ordre de grandeur est saisi** en utilisant **la granulométrie mesurée dans la plage de dépôt** (ce qui est cohérent avec les analyses des autres torrents menés dans Piton and Recking (2017)) et **au droit de la zone de plus faible pente de la branche active principale**: les estimations réalisées au profil de GRb tombent alors précisément entre les deux estimations empiriques basses et hautes du volume annuel moyen (950-2 050 m³/an), et dont la variabilité interannuelle illustre bien la forte sensibilité à l'hydrologie. Les volumes des années sèche et humide varient aussi dans la gamme de variation observée sur le site à travers les données de curage.

6.2.2.3 Synthèse sur l'estimation du bilan annuel

On constate que les estimations de transport solide fournis par les sites intermédiaires et amonts avec la granulométrie la plus fine : $\sim 3\,800\text{ m}^3/\text{an}$ et $\sim 6\,000\text{ m}^3/\text{an}$ sont excessifs. L'ordre de grandeur des calculs en GRb est par contre plus correct si l'on prend en compte la granulométrie de la plage de dépôt.

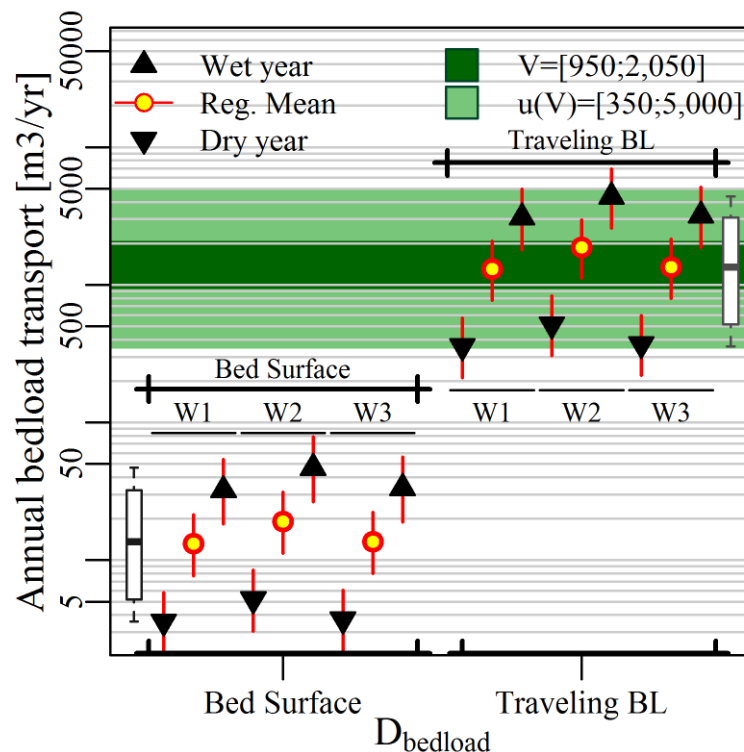


Figure 63 : Volumes annuels transportés selon deux hypothèses de calcul : à gauche le D_{84} mesuré sur le lit et à droite, le D_{84} mesuré sur le lit pour les calculs de la hauteur d'eau et le D_{84} mesuré sur le banc de la plage de dépôt (diamètre réellement transporté) pour la formule de transport solide et le cisaillement adimensionnel (paramètre de Shields), ceci pour les 3 largeurs de lit mesurée sur le tronçon de référence et pour 3 courbes des débits classées (année sèche, moyenne et humide). Les valeurs moyennes de transport annuel et l'incertitude sur ces derniers (estimée à travers la variabilité interannuelle) sont représenté par les bandes vertes. On constate que les estimations utilisant le concept du "travelling bedload" (dissociation des deux diamètres) permet d'obtenir des estimations du bon ordre de grandeur (une telle précision est même surprenante) alors que les estimations utilisant la procédure de base (une seule valeur de D_{84}) donnent des valeurs de transport des quelques dizaines de m^3/an , cohérente seulement avec les années où la Roize est considérée comme dormante

En conclusion, il semble plus pertinent de **prendre en compte la granulométrie mesurée dans un dispositif de piégeage** plutôt que celle mesurée sur site au niveau du lit ou sur les bancs dans les zones de régulation, pour estimer le transport solide de torrents tels que la Roize hors des années où le torrent est dormant. On est donc dans la situation "colluvial" au sens de la Figure 60 pour le site de la Roize. **C'est la pente qui est le premier facteur d'erreur sur les volumes estimés.** Comme préconisé par Peteuil (2010), **c'est bien la zone de moindre pente qui régule le mieux les volumes transportés et dont il est pertinent de prendre la pente pour les calculs de débits solides.**

Les zones de régulation de la Roize ne peuvent être considérées comme des zones 100% alluviale de divagation (au sens de la Figure 60b) au titre que le lit montre un état de fourniture sédimentaire limitante: des steps-pools y sont visibles, faciès caractéristique des cours d'eau à la fourniture sédimentaire limitante. Si au contraire des chenaux de tressage avec un tri granulométrique simple et sans faciès type step pool ou cascades avait été observé, la situation aurait été comparable à la typologie "semi-alluvial" de la Figure 60 et les granulométries mesurées dans ces zones auraient vraisemblablement constitué la granulométrie à utiliser dans les calculs de transport solide. Ceci reste à confirmer sur d'autres sites montrant cette configuration.

6.2.2.4 Etude comparée des formules de la littérature

Afin de confronter les performances de la nouvelle approche en comparaison avec celles proposées par la littérature, des calculs ont été menés par la méthode simplifiée en testant les formules principales retenues dans Malavoi et al. (2011) et plus récemment par Recking et al. (2013).

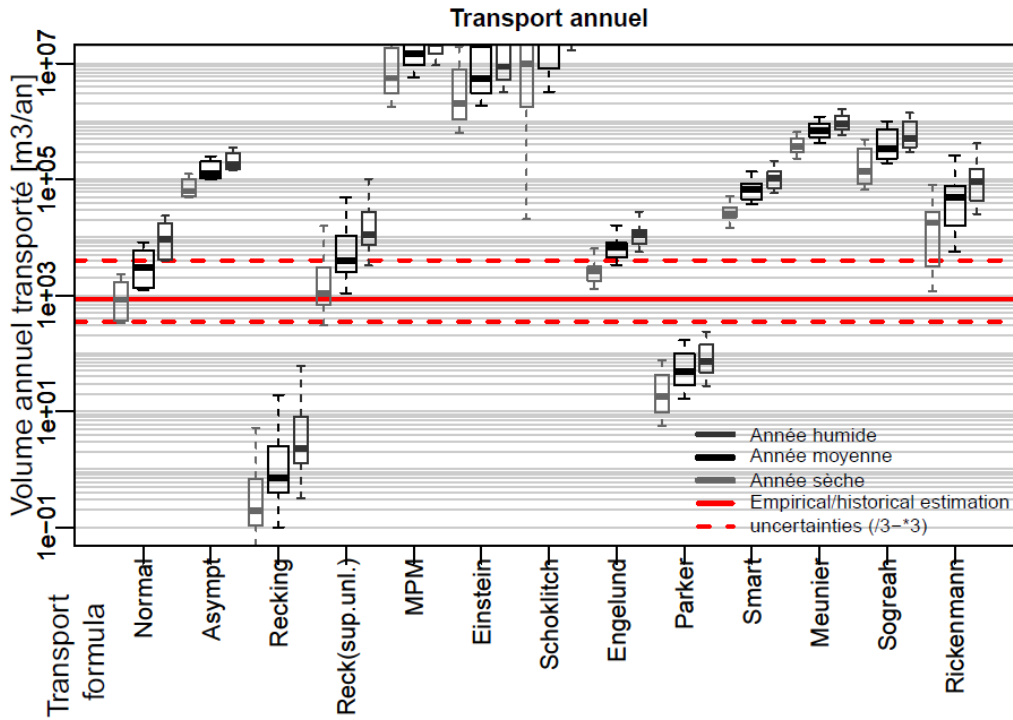


Figure 64: volume annuel transporté estimé par les formules de la littérature

La formulation dite "Normal" correspond à la démarche proposée plus haut. La formulation dite "Asympt" correspond à une formulation asymptotique proposée dans Piton (2016) qui rejoint la formulation de Meunier (1989) mais avec une dépendance au diamètre des sédiments transportés. Elle est la suivante :

$$Q_{sv} = \frac{5.8 * 10^{-4}}{p^{6.25} g^{2.5p}} W D_{84}^{1.5-7.5p} q^{5p} S^{2.5(1-p)}$$

Avec $q^* = q/\sqrt{gSD_{84}^3}$, q débit spécifique= Q/W et $p=0.23$ si $q^* < 100$ et $p=0.3$ dans les autres cas.

Au global, l'ensemble des autres formules proposées dans la littérature, qui ne prennent pas en compte la double granulométrie mais à chaque fois la seule granulométrie du lit se montre moins capable que la nouvelle formulation d'estimer le bon ordre de grandeur du volume transporté annuellement, c'est-à-dire sous de faible taux de transport. La correction proposée par Recking (2012) pour prendre en compte la disponibilité sédimentaire (Recking (sup.unl.)) est encore celle qui fonctionne le mieux mais la nouvelle formulation semble tout de même plus adaptée.

6.2.3 Approche évènementielle

Les hydrogrammes calculés dans la section 4.3.4.2 ont été entrés dans les modèles de transport solide au droit des différents sites. Les mêmes démarches de calculs d'hydraulique détaillée et d'hydraulique simplifiée et d'utilisation de l'ensemble des formules de la littérature ont été utilisées. Les volumes transportés estimés par les formules sont comparés avec des volumes estimés sur la base des données :

- Les volumes transportés par les crues de temps de retour 5 et 10 ans sont estimés empiriquement sur la base des données de curage. Cette approche considère donc que l'ensemble du volume curé est apporté par une seule crue, ce qui surestime le volume puisque les apports préalables sont négligés. En parallèle, les volumes fournis par les entreprises de terrassement sont généralement considérées comme sous-estimés. La série temporelle étant de plus courte (25 ans), une marge d'incertitude de +300 % / - 66 % (*3;/3) est indiquée.

- Le volume transporté en crue centennale est considérée comme étant de l'ordre de 30 000 m³, sur la base des estimations de la crue de 1971 (entre 50 000 et 100 000 m³, avec une incertitude forte) qui semble une crue très intense. Les mêmes incertitudes (*3;/3) sont affichées sur ces volumes.

Tableau 24: volume transportés estimé empiriquement

Temps de retour [an]	Volume médian [m ³]	Intervalle haut [m ³]	Intervalle bas [m ³]
5	1 400	4 200	466
10	2 000	6 000	666
100	30 000	90 000	10 0000

6.2.3.1 Comparaison entre formules

La Figure 65 rapporte les volumes transportés estimés sur la Roize supérieure (sites GRb à GRg) en prenant en compte la granulométrie transportée, mesurée dans la PDD, pour les crues de temps de retour 5, 10 et 100 ans, avec des durées courtes, moyennes et longues.

Pour les temps de retour 5 et 10 ans:

- la formule proposée plus haut sous-estime le volume transporté sauf pour la crue longue. L'intensité de transport est faible, le cumul reste dans l'intervalle d'incertitude et seul un cumul sur une crue longue permet d'atteindre le volume estimé empiriquement. La correction de la formule de Recking pour prendre en compte des conditions de fournitures sédimentaires non limitantes fournie encore une fois un ordre de grandeur similaire. Celle d'Engelund aussi mais avec une tendance plus marquée à la sous-estimation.
- La formule asymptotique a le comportement inverse: elle surestime légèrement la valeur basée sur les curages. Une crue longue atteint alors la valeur haute de l'intervalle d'incertitude. La formule de Smart fournie un ordre de grandeur similaire.
- Les formules de Meunier, de Sogreah et de Rickenmann surestiment les volumes empiriques mais s'en approchent.
- Les autres formules surestiment ou sous-estiment largement les valeurs empiriques.

Pour le temps de retour 100 ans:

- Les ordres de grandeurs sont saisis de façon relativement correcte par la formule proposée et par l'asymptotique, par celle de Recking corrigée et par le groupe des formules adaptées au torrentiel: Smart, Meunier, Sogreah et Rickenmann.
- Les formules de Meyer Peter et Muller, d'Einstein, de Schoklitch surestiment toujours les volumes transportés.
- Celle de Recking non corrigée (appliquée sur la granulométrie du lit) et celle d'Engelund sous estiment encore les volumes transportés.

En synthèse, la nouvelle formulation proposée permet d'encadrer la borne basse de l'intervalle d'incertitude. Les formulations plus classiquement utilisée (Meunier, Smart, Sogreah et Rickenmann) permettent vraisemblablement de saisir la borne haute mais ne sont efficaces que pour des phénomènes de transport très intenses (les volumes transportés pour les crues faibles sont généralement sous-estimés).

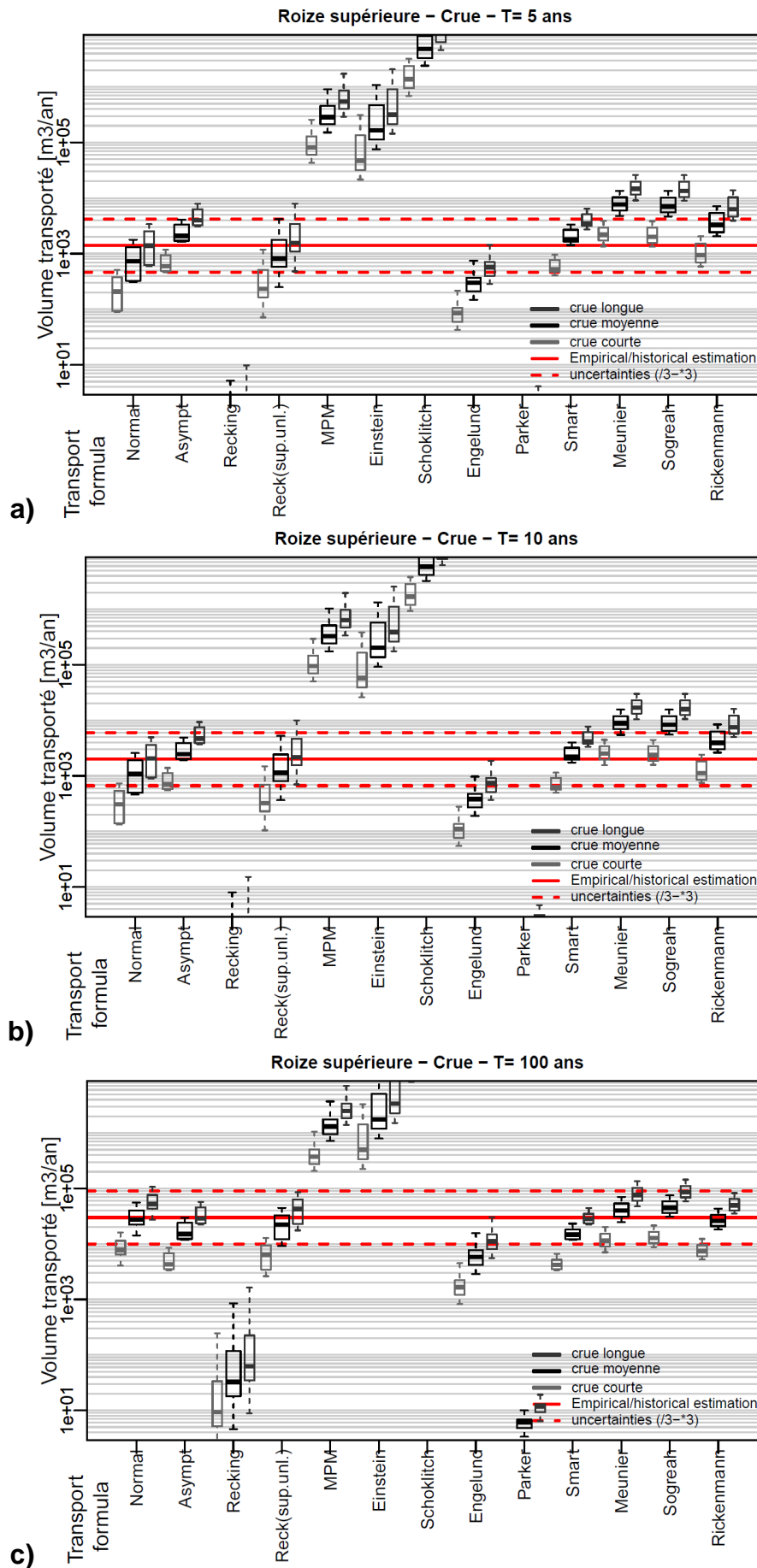


Figure 65 Comparaison de volume transporté dans la Roize supérieure selon les formules de la littérature pour les crues de temps de retour: a) 5 ans, b) 10 ans et c) 100 ans

6.2.3.2 Comparaison entre site

A l'échelle de la Roize, des calculs de détails ont été menés avec la formule proposée par Piton and Recking (2017) au droit des différents sites (GR). La Figure 66 illustre les résultats de calculs.

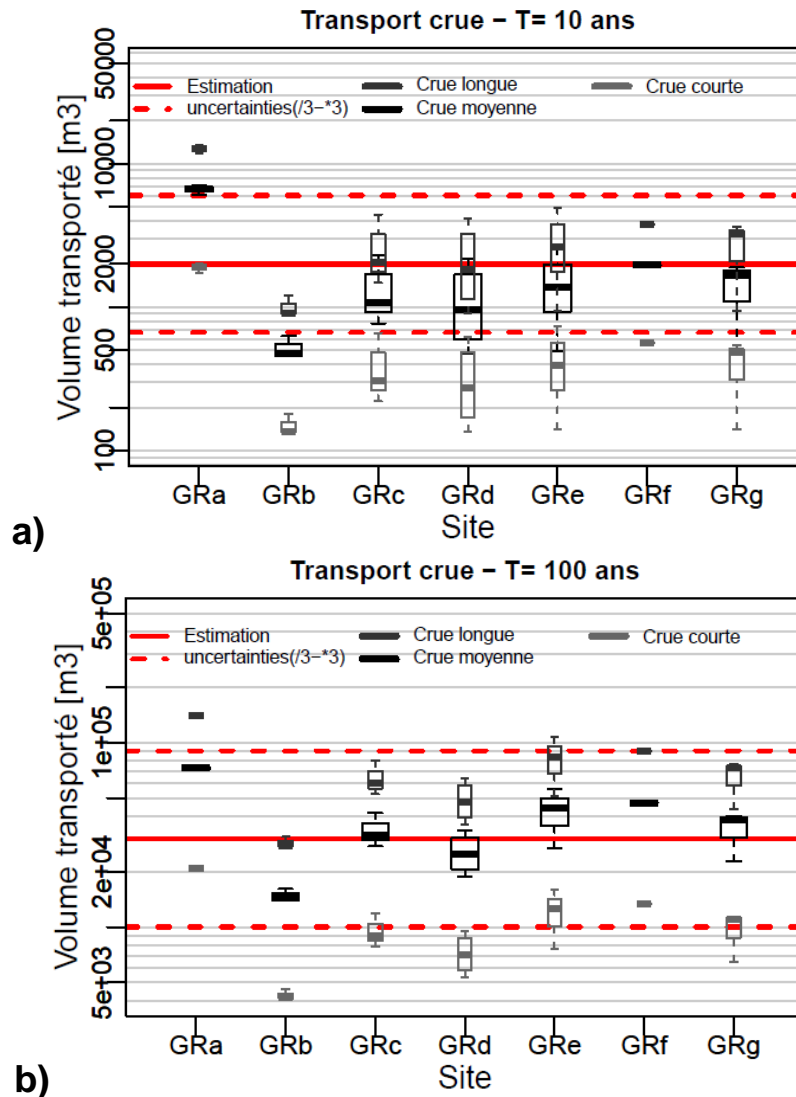


Figure 66: Volume transporté estimé au droit de chaque site pour les crues de temps de retour a) 10 ans et b) 100 ans

De façon similaire avec l'approche annuelle, la capacité de transport du site GRa, en aval de la confluence avec la Roizette est très forte comparée à celle des tronçons de la Roize supérieure: l'enveloppe supérieure des estimations de volume est atteinte par une crue moyenne en aval alors que cette gamme supérieure n'est pas atteinte dans la Roize supérieure, même par une crue longue.

Ici encore, le tronçon GRb, par sa moindre pente, régule les apports de l'amont qui atteignent presque l'estimation empirique décennale et centennale pour les crues longues. Les crues moyennes restent inférieures à l'estimation empirique de même que les crues courtes qui sortent de l'intervalle d'incertitude.

Ceci démontre encore une fois le caractère double du bassin versant de la Roize avec sa branche principale qui fournit le transport solide de fond et la Roizette, au bassin versant deux fois plus grand que la branche principale à la confluence, dont les apports hydrologique génèrent une très forte augmentation de la capacité du torrent à transporter des matériaux.

En cas d'évènement majeur, les calculs laissent penser que des apports de quelques dizaines de milliers de m³ sont possibles depuis la Roize supérieure. Une partie de ces matériaux devrait commencer à se déposer dans la zone aval de la Roize supérieure: dans la zone de step-pools en aval de GRc, en particulier au droit de GRb qui correspond au barrage de Scipion GRAS le plus amont (zone de dépôt préférentielle qui avait donc déjà été mis à contribution en 1851).

La Roizette, en règle générale très peu active du point de vue morphologique, doit être capable de s'activer lors des épisodes les plus intenses. Il faut que les contraintes dépassent la résistance du pavage plutôt stable de ce ruisseau et du tissu végétale bien développé sur le cours d'eau. Les données de 1971 confirment cette possibilité.

En aval de la confluence, la présence d'un lit plus large lié au transport solide issu de la Roize supérieure permet le passage de l'ensemble des écoulements avec une forte capacité de transport. Il n'est pas exclu que les step-pools situées entre la confluence et la PDD soient déstabilisées et provoquent une déstabilisation d'ensemble des lits amont sur une hauteur d'ordre métrique (le pavage est très raide en amont direct de la plage de dépôt, probablement du fait du mode d'excavation de la plage de dépôt; qui, il faut le noter, n'est pas équipée d'un seuil amont de stabilisation du lit).

La plage de dépôt, dont le volume est discuté § 3.4.2, se remplira alors jusqu'à déversement, son volume étant inférieur aux apports. A noter qu'il n'est pas exclu que le remous solide partant de la crête de la plage de dépôt se propage en amont dans le lit et qu'un stockage ai lieu dans le chenal, en particulier sur la fin de crue. Le risque aval existe toutefois toujours:

- La zone intermédiaire entre Voreppe et la PDD, en particulier les 800 m jusqu'au pont du Gigot sont constitués de terrasses alluviales et de remblai anthropiques. Des érosions massives sur ce secteur sont vraisemblablement à attendre, exacerbées par les apports d'eau claire issus de la plage de dépôt. Des volumes importants de flottants seront recrutés par la même occasion. L'analyse des photos aériennes post-crue de 1973 confirment cette tendance à la forte activité morphologique dans ce tronçon.
- La PDD n'étant par ailleurs pas équipée pour retenir les flottants en cas de surverse, comme indiqué précédemment, des apports massifs de flottants sont à attendre à ce niveau, potentiellement sous la forme de bouffées. Les volumes recrutés en aval peuvent s'additionner à ceux libéré par l'ouvrage.

6.2.3.3 *Hydraulique détaillée VS Hydraulique simplifiée*

L'ensemble des résultats des calculs menés en hydraulique détaillée ne sont pas présenté ici. On note simplement que, comme pour les calculs menés sur le bilan annuel, les estimations fournies par la formule en utilisant les nombres de Shields estimés en hydraulique détaillées amènent à des valeurs de transport solide supérieures de l'ordre de 200 à 300 % du résultat en hydraulique simplifiée. Cette surestimation semble diminuer avec l'intensité de la crue.

6.3 Synthèse sur la méthodologie

En synthèse, on a confirmé (une fois de plus) que mener des calculs de transport solide en contexte de torrent à forte pente est une tâche délicate et compliquée. Les calculs menés dans le cadre de ce travail amènent aux recommandations suivantes:

- La nouvelle formulation décrite dans ce rapport et plus en détails dans Piton (2016) et dans Piton and Recking (2017) se montre
 - Beaucoup plus efficace à estimer le transport sédimentaire annuel, ayant lieu sous de petites contraintes, que les autres formulations de la littérature (sauf la formulation de Recking (2013) modifiée dans Recking (2012) – résultat à confirmer dans d'autres bassins versants). L'estimation tombe dans la gamme d'incertitude estimée par des données de curage.
 - Capable de captée l'ordre de grandeur du transport en événementielle, même si elle donne des ordres de grandeurs plutôt plus faible que les formules plus classiquement utilisées. Ces dernières constituent toutefois des points de comparaison très sujets à caution.

Son utilisation est donc recommandée dans les torrents à charriage, présentant des lits pavés.

- L'utilisation de la formule doit se faire avec la granulométrie des sédiments transportés, mesurée par méthode de comptage de surface (Wolman 1954) sur des dépôts observés dans un ouvrage piégeant l'ensemble des matériaux telle qu'une plage de dépôt et non sur de potentiels bancs latéraux situés en bordure d'un chenal principal lui aussi pavé (schéma de synthèse : Figure 60). La formulation simplifiée faisant l'hypothèse d'une section rectangulaire doit être utilisée plutôt qu'une formulation plus détaillée amenant à des valeurs de Shields variant différemment des données de calage de la formule.

6.4 Nouvelle plage de dépôt

Le RTM38 signale depuis plus d'une dizaine d'année la nécessité de créer une deuxième plage de dépôt complémentaire à celle déjà existante. Au vu de l'analyse de terrain effectuée, nous appuyons cette conclusion.

A la lecture du présent rapport, nous soulignons que cet ouvrage doit être équipé pour gérer correctement les flottants et être situé le plus en aval possible, à proximité de l'entrée du village. La section intermédiaire située entre l'ouvrage et la traversée urbaine doit être soigneusement entretenue vis-à-vis des flottants et ses berges ne doivent pas constituer des zones de concentrations des contraintes (zones étroites, coudes marqués, etc.) et être protégées pour empêcher la reprise de matériaux, par exemple via du génie végétal.

7 Susceptibilité aux laves torrentielles - Comparaison avec le torrent du Manival

Le Manival constitue un autre torrent particulièrement actif du massif de la Chartreuse (cf. complément §11.3). Il est intéressant de noter que les dérochoirs de la Roize et de ce dernier font sensiblement la même surface :

Torrent	S_{2D} de la zone de production sédimentaire [km ²]	S_{3D} de la zone de production sédimentaire [km ²]	Longueur du chenal jusqu'à la PDD [km]
Roize	0.34	0.50	4.5
Manival	0.39	0.60	2.5

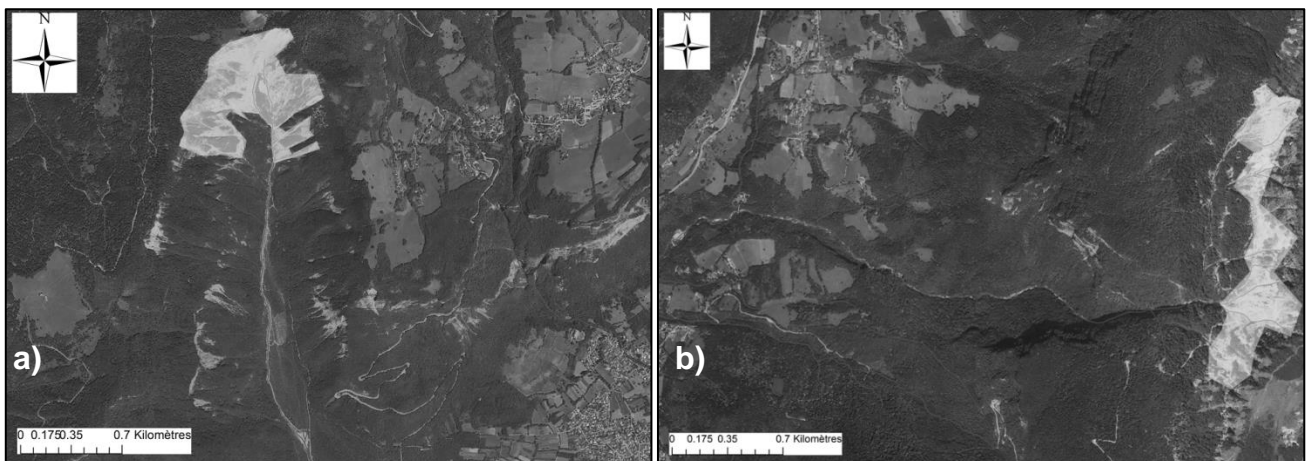


Figure 67 : Comparaison des zones de production primaires des torrents du Manival et de la Roize

Le dérochoir du Manival est peut être plus actif que celui de la Roize, compte tenu des curages plus réguliers de la plage de dépôt de ce dernier.

Autre différence : le lit du Manival est contraint par des barrages jusqu'à la plage de dépôt. Le lit est d'une largeur régulière, la pente réduisant jusqu'à environ 16% en amont de la plage de dépôt. Les laves torrentielles atteignent régulièrement cette dernière (Liébault et al. 2010, Theule et al. 2012, 2015) en ayant parcouru un lit d'environ 2.5 km.

Au contraire, on ne référence pas de laves torrentielles atteignant la plage de dépôt de la Roize. Il est vrai que la pente située en amont de celle-ci est seulement de l'ordre de 8.5%, mais on relève aussi l'existence de ces multiples zones de régulation le long des 4.5 km de gorges entre le haut bassin versant et la plage de dépôt. On peut penser que chacun de ces élargissement constitue une sorte de plage de dépôt sans ouvrage de fermeture qui laisse se déposer les fronts de laves et laisse passer le corps de celles-ci, transformant peu à peu les bouffées de lave torrentielle en charriage hyperconcentré puis en charriage simple.

L'application de la théorie de Gras (1857) de zones de régulation du transport solide au droit des barrages ou des élargissement naturel pourrait être testé sur des torrents comme le Manival pour tamponner les volumes de laves torrentielles susceptibles de saturer la plage de dépôt.

8 Installation d'une caméra sur la plage de dépôt de la Roize

Parallèlement au travail effectué directement sur la Roize, IRSTEA met en place des caméras sur quelques plages de dépôt afin d'étudier les phénomènes mis en jeu en leurs seins lors d'évènement majeurs et/ou de laves torrentielles.

Dans un premier temps, l'objectif est :

- d'avoir une banque de vidéos afin de pouvoir sensibiliser les élus locaux ainsi que la population au rôle de protection des plages de dépôts et de régulation des matériaux transportés par les torrents ;
- de disposer de quelques observations de remplissage de plages de dépôt à l'échelle de la crue. En effet, si de nombreuses images pré et post-crués sont disponibles, les observations directes de remplissage de plages de dépôts restent extrêmement rares. Ces données sont pourtant cruciales dans la calibration des modèles de fonctionnement de ces ouvrages, modèles aussi bien numériques que physiques.

Dans un deuxième temps, les images ayant une qualité suffisante permettront d'effectuer du traitement afin d'obtenir par exemple des vitesses d'écoulements.

Dans le cadre de ce travail, deux ouvrages ont été équipés de caméras d'observations : les plages de dépôts du Manival à St Nazaire les Eymes (38) et celle de la Roize à Voreppe. Le système prend des photos à pas de temps quotidien pour un suivi de long terme et toutes les secondes lorsque des crues sont détectées par un géophone (capteur sismique) disposé à l'entrée de la plage de dépôt (Figure 68 et Figure 69).



Figure 68 : a) Plan du dispositif installé sur la Roize b) photo prise par la caméra (Fontaine 2015) (•En violet : le géophone, en rouge : le conditionneur, en bleu : la station imagerie, en jaune : la câble de transmission)



Figure 69 : a) panneau solaire et caméra installés sur le barrage de la PDD b) géophone installé à l'amont

Ces systèmes sont présentés dans deux publications récentes en langue française (Fontaine et al. 2017, Piton et al. 2017). On produit ici un extrait de la seconde sur les conclusions partielles tirées des observations réalisées entre 2015 et 2016.

"Morpho-dynamique dans les plages de dépôt de Chartreuse

Les bassins des plages de dépôt ont un rôle clé dans la réduction du risque torrentiel. Elles piègent les charges solides résultantes des crues extrêmes, mais aussi des crues ordinaires. Cela augmente les coûts de curages et perturbe les équilibres morphologiques et biologiques aval (Malavoi et al. 2011). Pour mieux dimensionner ces ouvrages et optimiser le transfert des crues ordinaires ne menaçant pas les enjeux, il est nécessaire d'améliorer la compréhension actuelle de la dynamique de sédimentation de ces bassins de rétention. L'observation du remplissage de ces ouvrages lors des crues torrentielles constitue une première étape en apportant une description géomorphologique correcte des processus en jeux lors du piégeage de la charge solide.

Les premières observations corroborent des résultats issus de modèle physique (e.g., Piton 2016) en mettant en avant des cycles morphologiques alternant tressage et écoulement à chenal unique (Figure 70). Comme attendu, on observe par ailleurs que les crues ordinaires jouent un rôle clé sur le remplissage des plages de dépôt. Le piégeage est total dans les bassins régulièrement curés où l'absence de chenaux préexistants génère un étalement de la lame d'eau (Figure 70a-c). Dans le cas des bassins moins entretenus, où des chenaux apparaissent (Figure 70d-i), des phénomènes d'auto-curage partiels ont été observés à travers l'incision d'anciens dépôts.

Le suivi continu des sites au niveau de plusieurs stations démontre que ces torrents montrent régulièrement des crues d'eau claire, i.e., sans export de sédiment vers la plage de dépôt. Une activité morphogène peut tout de même avoir lieu plus haut : la crue du 23 Juillet 2016 sur le Manival a, par exemple, fortement remanié le chenal au droit de la station supérieure ($S_{BV}=1.0 \text{ km}^2$), alors que les écoulements atteignant la plage de dépôt ($S_{BV}=3.6 \text{ km}^2$) n'ont déposé qu'une charge négligeable (images non fournies). Des stockages-déstockages ("respirations torrentielles") ont donc clairement lieu au niveau du chenal d'écoulement.



Figure 70 – Images prises depuis les barrages de fermeture des plages de dépôt du Manival (a-c) et de la Roize (d-g). Illustration des changements morphologiques et des cycles naturels d'écoulements mono- et multi-chenalisés dans les deux cas, à l'échelle d'une crue dans le Manival et d'une année dans la Roize, à la fourniture sédimentaire plus faible."

9 Conclusion

Au cours de cette étude nous avons cherché à établir un diagnostic aussi complet que possible de la Roize en combinant plusieurs approches.

L'étude géomorphologique nous a permis de vérifier la présence de laves torrentielles qui s'écoulent depuis le haut-bassin versant, fournissant la majeure partie de la fourniture sédimentaire, jusque dans les zones de régulation qui servent de transition vers un transport par charriage.

L'analyse historique ainsi que les visites de terrain ont en parallèle servis à montrer que les préoccupations concernant la quantité de sédiments transitant dans la Roize sont tout à fait justifiées et que ce flux de matériaux est à prendre sérieusement en considération si l'on souhaite dimensionner des ouvrages.

Par la suite, les étapes successives d'analyse de l'hydrologie, de l'hydraulique et du transport solide ont servis à éprouver un certain nombre de méthodes allant de la méthode SPEED et de la création d'un modèle régional pour le calcul des pluies et débits, jusqu'à une méthode récente d'évaluation des débits solides (Piton 2016) sur le cas concret qu'est la Roize. Les données de curage fournies par le service RTM et l'AD ont finalement permis de comparer les données estimées aux valeurs arrivant réellement dans la plage de dépôt et ainsi d'éprouver la déroulé complet de toutes ces méthodes.

Finalement, au cours des reconnaissances faites dans le lit de la Roize nous avons constaté la présence de nombreux flottants dans le lit du torrent et l'analyse historique de la crue de 1971 nous rappelle à quel point ceux-ci représentent un paramètre clé dans l'étude des risques occasionnés par le torrent.

10 Bibliographie

- Bel, C. 2016. Debris flow propagation in steep erodible channels. . Univ. de Grenoble.
- Bel, C., F. Liébault, H. Bellot, F. Fontaine, D. Laigle, and O. Navratil. 2014a. Debris flow monitoring in the French Alps. Pages 1589–1595 Proceedings of the 7th International Conference on Fluvial Hydraulics, RIVER FLOW 2014. . CRC Press/Balkema, Lausanne.
- Bel, C., O. Navratil, F. Liébault, F. Fontaine, H. Bellot, and D. Laigle. 2014b. Monitoring Debris Flow Propagation in Steep Erodible Channels. Pages 103–107 in G. L. et al., editor. Engineering Geology for Society and Territory (IAEG Congress proceedings). . Springer International Publishing Switzerland.
- Bernard, C. 1927. Cours de restauration des montagnes [Courses of mountain restoration]. Page 788 (E. N. des Eaux et Forêt, Ed.). . Ecole normale des eaux et forêts.
- Carre, J., and O. Cayla. 2012. Analyse probabilistique régionale de la pluviométrie extrême en France métropolitaine. Pages 1–8 in SHF, editor. Congrès SHF : «Évènements extrêmes fluviaux et maritimes» Conf. Proc. SOGREAH, Paris.
- Carré, J., and B. Fretti. 2010. Analyse et critique de la méthode Speed (Système probabiliste d'étude par évènements discrets). . SOGREAH.
- Cézanne, E. 1870. Etude sur les torrents des Hautes Alpes (2nd Edition) - Tome 2. Page 407 (Dunod, Ed.). . Librairie des corps impériaux des ponts et chaussées et des mines, Paris.
- Costa de Bastelica, M. 1874. Les torrents : leurs lois, leurs causes, leurs effets, moyens de les réprimer et de les utiliser, leur action géologique universelle. (J. Baudry, Ed.). . Librairie Polytechnique, Paris.
- Culman, K. 1865. Rapport au Conseil Fédéral sur les torrents des Alpes Suisses inspectés en 1858 - 1859 - 1860 et 1863. Page 590. . Impremrie L. Corbaz & Co.
- Culmann. 1865. Rapport sur les torrents des alpes suisses inspectés 1858, 1859, 1860 et 1862.
- Demontzey, P. 1882. Traité pratique du reboisement et du gazonnement des montagnes. Page 528 (J. Rothschild, Ed.). . Ministères de l'agriculture et du commerce et des travaux publics.
- Ferguson, R. 2007. Flow resistance equations for gravel-and boulder-bed streams. Water Resources Research 43:1–12.
- Fontaine, F. 2015. Descriptif technique : Dispositifs de prise de vue sur plages de dépôt, Projet RISBA.
- Fontaine, F., C. Bel, H. Bellot, G. Piton, and F. Liebault. 2017. Monitoring des crues à fort transport solide dans les torrents. Monitoring en milieux difficiles. . Collection EDYTEM - Cahiers de Géographie.
- Gidon. 2013. Pommiers, gorges de la Roize. . <http://www.geol-alp.com>.
- Gras, S. 1857. Etudes sur les torrents des Alpes. Page 108 (Victor Dalmont, Ed.). . F.Savy, Paris.
- Gruffaz, F. 1996. Etude de description et analyse des plages de dépôt torrentilles réalisées dans les Alpes et Pyrénées Françaises [Description and analysis of sediment traps built in the Alps and the Pyrénées]]. . RTM.
- Jail, M., and N. Martin. 1971. La trombe d'eau du 5 juillet 1971 dans la basse vallée de l'Isère. Revue de géographie alpine 59:593–600.
- Lefort, P. 1996. TRANSPORTS SOLIDES DANS LE LIT DES COURS D'EAU [Solid transport in water courses' beds]. (E. N. S. D. E. D. M. D. GRENOBLE, Ed.). . INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE GRENOBLE.
- Liébault, F., C. Peteuil, C. Jousse, B. Fragnol, J. Theule, F. Berger, J. Lopez Saez, A. Gotteland, M. Jaboyedoff, and A. Loye. 2010. L'utilisation des plages de dépôts pour la mesure du transport solide torrentiel : applications dans le département de l'Isère. . PGRN.
- Liebault, F., A. Remaître, and C. Peteuil. 2013. Torrents et rivières de montagne - Dynamique et aménagement. Pages 15–89 in A. Recking, D. Richard, and G. Degoutte, editors. QUAE, Antony.
- Lopez Saez, J., C. Corona, M. Stoffel, A. Gotteland, F. Berger, and F. Liébault. 2011. Debris-flow activity in abandoned channels of the Manival torrent reconstructed with LiDAR and tree-ring data. Natural Hazards and Earth System Science 11:1247–1257.
- Malavoi, J. R., C. C. Garnier, N. Landon, A. Recking, and P. Baran. 2011. Eléments de connaissance pour la gestion du transport solide en rivière. Page 216 (V. Barre, Ed.). . Onema.
- Meunier, M. 1989. Essai de synthèse des connaissances en érosion et hydraulique torrentielle. La Houille Blanche 5:361–376.
- Montgomery, D. R., and J. M. Buffington. 1997. Channel-reach morphology in mountain drainage basins. Geological Society of America Bulletin 109:596–611.
- Peteuil, C. 2010. Synthèse des données de production sédimentaire des bassins versants torrentiels des Alpes françaises [Synthesis of French Alps torrent watershed sediment production data]. . ONF-service RTM de l'Isère, Grenoble.
- Peteuil, C., F. Liébault, and O. Marco. 2012. ECsTREM, a practical approach for predicting the sediment yield in torrents of the French Alps [ECsTREM, une approche pratique pour predire la production sédimentaire des torrents des Alpes Françaises]. Pages 293–304 INTERPRAEVENT Conference Proceedings.
- Pilot, J. J. A. 1857. Recherche sur les inondations dans la vallée de l'Isère depuis 1219 jusqu'à nos jours.

- Pinhas. 1987. Etude de l'activité torrentielle de la Roize. . Office National des Forêts - Service Restauration des Terrains de Montagne - Service RTM de l'Isère.
- Piton, G. 2016. Sediment transport control by check dams and open check dams in Alpine torrents. . Univ. Grenoble Alpes, IRSTEA - Centre de Grenoble.
- Piton, G., J. Berthet, C. Bel, F. Fontaine, H. Bellot, E. Malet, L. Astrade, A. Recking, F. Liébault, G. Astier, M. Juppet, and K. Royer. 2017. Dynamique géomorphologique des torrents : intérêt de l'emploi des appareils photographiques automatiques. Monitoring en milieux difficiles. . Collection EDYTEM - Cahiers de Géographie.
- Piton, G., and A. Recking. 2016a. Design of sediment traps with open check dams. I: hydraulic and deposition processes. *Journal of Hydraulic Engineering* 142:1–23.
- Piton, G., and A. Recking. 2016b. Design of sediment traps with open check dams. II: woody debris. *Journal of Hydraulic Engineering* 142:1–17.
- Piton, G., and A. Recking. 2017. The concept of travelling bedload and its consequences for bedload computation of mountain streams. *Earth Surface Processes and Landforms* (in press).
- Recking, A. 2012. Influence of sediment supply on mountain streams bedload transport. *Geomorphology* 175-176:139–150.
- Recking, A. 2013. Simple method for calculating reach-averaged bed-load transport. *Journal of Hydraulic Engineering* 139:70–75.
- Recking, A., G. Degoutte, B. Camenen, and P. Frey. 2013. Torrents et rivières de montagne: Dynamique et aménagement. Pages 126–192 in A. Recking, D. Richard, and G. Degoutte, editors. Editions Quae, Antony.
- Recking, A., P. Leduc, F. Liébault, and M. Church. 2012. A field investigation of the influence of sediment supply on step-pool morphology and stability. *Geomorphology* 139-140:53–66.
- Recking, A., G. Piton, D. Vázquez-Tarrió, and G. Parker. 2016. Quantifying the morphological print of bedload transport. *Earth Surface Processes and Landforms* 41:809–822.
- RTM. 2014. Boite à outils hydrologiques - Manuel de référence. . Office National des Forêts - Service Restauration des Terrains de Montagne - Direction Technique.
- RTM. (n.d.). Archives RTM, locaux de Grenoble, consultées en 2015. . RTM38.
- RTM38. 2006. Commune de Voreppe - torrent de la Roize - analyse des risques liés aux transports solides par charriage dans la traversée de Voreppe. . Office National des Forêts - Service Restauration des Terrains de Montagne - Service RTM de l'Isère.
- RTM38. 2009. Torrent de la Roize - Division domaniale de Voreppe / Pommiers la Placette. . Office National des Forêts - Service Restauration des Terrains de Montagne - Service RTM de l'Isère.
- Theule, J. I., F. Liébault, A. Loye, D. Laigle, and M. Jaboyedoff. 2012. Sediment budget monitoring of debris-flow and bedload transport in the Manival Torrent, SE France. *Natural Hazards and Earth System Science* 12:731–749.
- Theule, J., F. Liébault, D. Laigle, A. Loye, and M. Jaboyedoff. 2015. Channel scour and fill by debris flows and bedload transport. *Geomorphology* 243:92–105.
- Thiéry, E. 1891. Restauration des montagnes, correction des torrents, reboisement [Mountain restoration, torrent control, reforestation]. Page 443 (Baudry et Cie, Ed.). . Librairie Polytechnique, Paris.
- Veyrat-Charvillon, S., and M. Meunier. 2006. Stereophotogrammetry of archive data and topographic approaches to debris-flow torrent measurements: Calculation of channel-sediment states and a partial sediment budget for Manival torrent (Isère, France). *Earth Surface Processes and Landforms* 31:201–219.
- Wolman, M. G. 1954. A method of sampling coarse bed material. *Transactions of American Geophysical Union* 35:951–956.

11 Annexes

11.1 Carte géologique

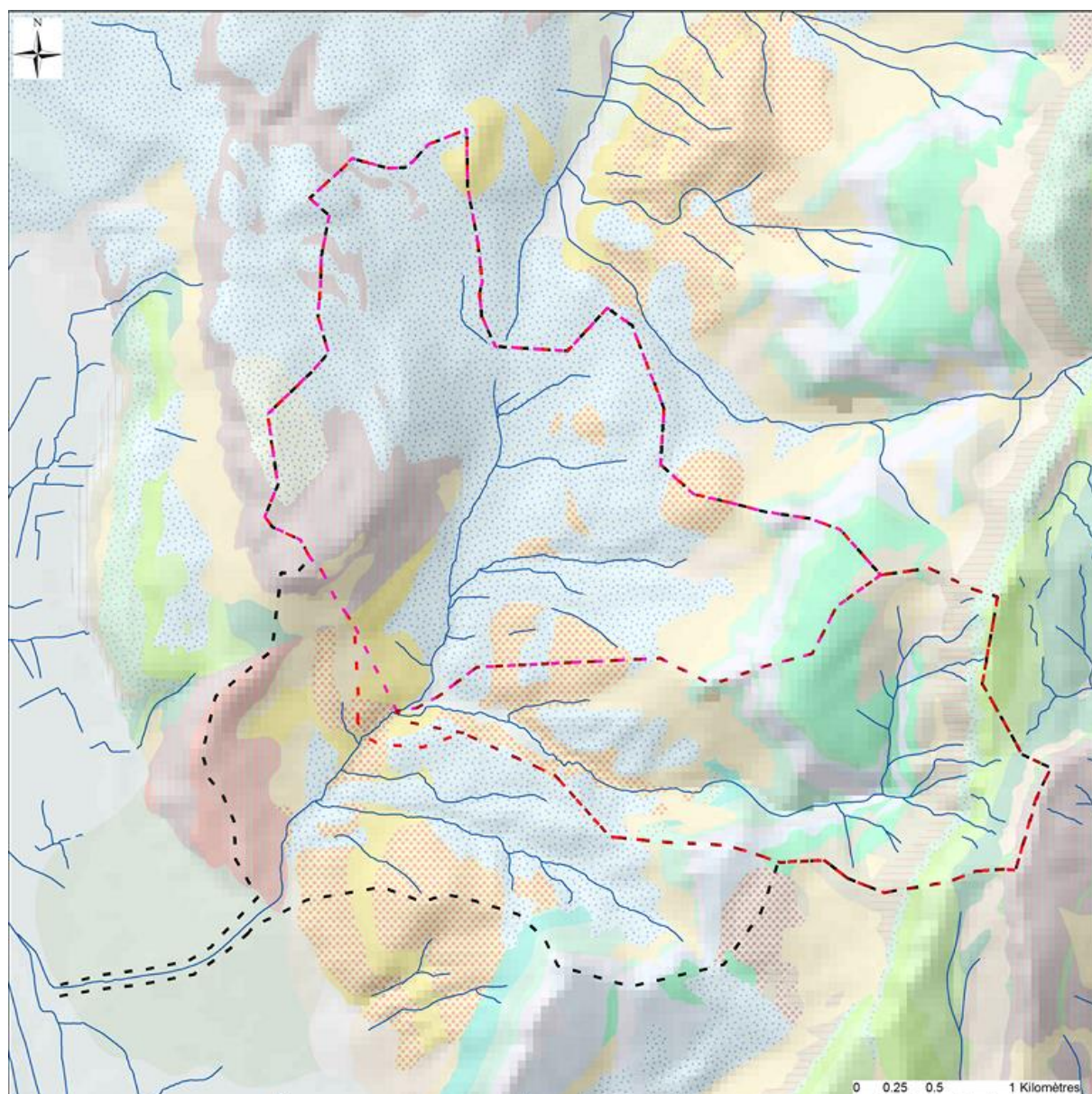


Figure 71: carte géologique détaillée du bassin versant de la Roize, issue des données du Cemagref (légende page suivante)

Légende

Géologie

Charm550_38_S_Fgeol_L93.shp

- 5 - Eboulis vifs actuels
- 6 - Eboulis stabilisés anciens würmiens à post-würmiens (?)
- 9 - Eboulis à gros blocs, éboulements en masse, écroulements, actuels à récents ou d'âge non précisé ; voir également les éboulements représentés par des surcharges
- 15 - Dépôts de versants composites (localement glissés) : colluvions, éboulis et moraines remaniés
- 16 - Cônes mixtes d'éboulis, de déjection et/ou d'avalanches (+/- remaniement par ruissellement), récents à actuels ou d'âge indéterminé
- 18 - Cônes torrentiels de déjection (d'épandage) post-würmiens à actuels (actifs) ou sans âge précisé
- 19 - Cônes de déjection stabilisés, anciens ou de retrait würmien
- 27 - Alluvions actuelles et récentes
- 28 - Alluvions anciennes (fluviales à fluvio-glaciaires ou fluvio-lacustres), Würm à post-Würm (?)
- 37 - Alluvions fluvio-glaciaires würmiennes
- 44 - Dépôts glaciaires (moraines) principalement du Würm, localement plus tardifs (?) ou plus récents. Dépôts fluvio-glaciaires ou glacio-lacustres localement associés.
- 45 - Moraines rissiennes
- 61 - Conglomérats deltaïques surtout calcaires avec lits de sables (Tortonien)
- 62 - Molasse sablo-argileuse ou sablo-marneuse et niveaux argileux (Tortonien)
- 63 - Molasse sablo-gréseuse à lentilles conglomératiques (Tortonien)
- 106 - Lauzes et formations biodétritiques diverses (Campanien)
- 118 - Complexe calcaire urgonien : "Lumachelle" (Aptien supérieur)
- 121 - Complexe calcaire urgonien : masse urgonienne supérieure (Aptien inférieur : Bédoulien inférieur)
- 122 - Complexe calcaire urgonien : couches inférieures à Orbitolines (Aptien inférieur : Bédoulien inférieur)
- 124 - Complexe calcaire urgonien : marnes à Annelides (Barémien supérieur)
- 125 - Complexe calcaire urgonien : calcaires roux lités (Barémien supérieur)
- 127 - Complexe calc urgonien : Calc arg gris, Calc biocl lités, Marnes du Pré de la Font, Marn de la Fontaine Grailière, Marn de la Fontaine Colombette, Marn du Col de l'Amoux, Calc arg et à petits silex, Calc biocl du Plateau de Glandasse (Barémien inf)
- 129 - Couches rouges à Panopées (Hauterivien terminal - Barémien inférieur)
- 131 - Marnes et calcaires noirs à Spatangues, à miches, calcaires siliceux très durs à spicules (Hauterivien)
- 138 - Complexe des Calcaires du Fontanil : calcaires sommitaux du Fontanil ou "Calcaires à silex" (Valanginien supérieur)
- 139 - Complexe des Calcaires du Fontanil : calcaires roux supérieurs du Fontanil (Valanginien)
- 142 - Complexe des Calcaires du Fontanil : calcaires coralligènes de la Sure (limite Berriasien - Valanginien)
- 143 - Complexe des Calcaires du Fontanil : calcaires inférieurs du Fontanil (Berriasien terminal - Valanginien inférieur)
- 144 - Complexe des Marnes de Narbonne : Couches de transition aux Calcaires du Fontanil ; Calcaires argileux ; Marnes de Narbonne (Berriasien supérieur - Valanginien inférieur)
- 145 - Néocomien inférieur marno-calcaire : Calcaires gris lités (Berriasien moyen-supérieur) ; Calcaires argileux et marnes (Berriasien inférieur) ; Calcaires gris lités (Berriasien)
- 147 - Néocomien inférieur marno-calcaire : Couches à ciment de la Porte de France ; calcaires argileux (Berriasien basal)
- 148 - Calcaires coralliens de l'Echailon (Tithonien supérieur - Berriasien)
- 152 - Calcaires "tithoniques" supérieurs (bordure Chartreuse subalpine) (Tithonien supérieur)
- 153 - Calcaires "tithoniques" moyens (bordure Chartreuse subalpine) (Kimméridgien supérieur - Tithonien inférieur)
- 156 - Calcaires "tithoniques" inférieurs (bordure Chartreuse subalpine) (Kimméridgien supérieur)
- 157 - Couches de la galerie du Saint-Eynard : calcaires alternant avec des lits de marnes (Kimméridgien inférieur)
- 162 - Calcaires "séquanais" (bordure Chartreuse subalpine) (Oxfordien terminal - Kimméridgien inférieur)

11.2 Description méthode SPEED

Cette description est tirée d'annexes de rapports ARTELIA utilisant la méthode SPEED.

11.2.1 BASES THEORIQUES

La théorie adoptée est le processus de Poisson. Il est considéré que la pluie (comme d'autres événements météorologiques accidentels - coups de vent, cyclones, orages etc.) satisfait aux axiomes de base de cette théorie.

Ceci implique en particulier que les maximums annuels (ou saisonniers) de la pluie journalière (P_j) suivent une loi de Gumbel et que les totaux annuels (ou saisonniers) S de la pluie journalière suivent une « loi des fuites », qui est très proche de la distribution $\sqrt{\text{Gauss}}$ (les racines carrées des valeurs de S suivent une loi normale).

L'ajustement des pluies journalières observées sur graphique de Gumbel se traduit par une droite définie par :

- Y_0 , qui est le pivot de la distribution, c'est à dire la valeur de la variable de Gumbel pour laquelle la droite de Gumbel coupe l'axe $P_j = 0$.

Il est démontré que $n=e^{-Y_0}$ est le nombre d'évènements indépendants d'où sont tirés les maximums annuels. Ce nombre n est proportionnel au nombre de perturbations météorologiques et on peut s'attendre à son invariance dans une région géographique, donc à l'invariance de Y_0 , pour des phénomènes de même origine.

Cf étude Cémagref/Meteo France analysant le nombre de pluies dépassant un seuil (graphique présenté lors du colloque de Lyon mais non fourni).

- La moyenne P_{Jm} , qui est plus caractéristique du régime de pluie dont dépend le secteur.

Elle peut varier spatialement au contraire du paramètre Y_0 (pour une même famille d'évènement), cette variation étant liée à des raisons géographiques (un même évènement pluvieux peut évoluer au cours de son déplacement). On démontre mathématiquement que la moyenne est associée à une variable de Gumbel de 0.5772 (variable d'Euler) soit une période de retour de 2,3 ans.

C'est cette moyenne P_{Jm} et le pivot Y_0 qui sont utilisés pour caractériser les pluies sur le secteur d'étude. Dans l'étude qui suit nous considérerons la pluie de période de retour 2 ans (P_{J2}) très proche de la moyenne (période de retour 2,3 ans).

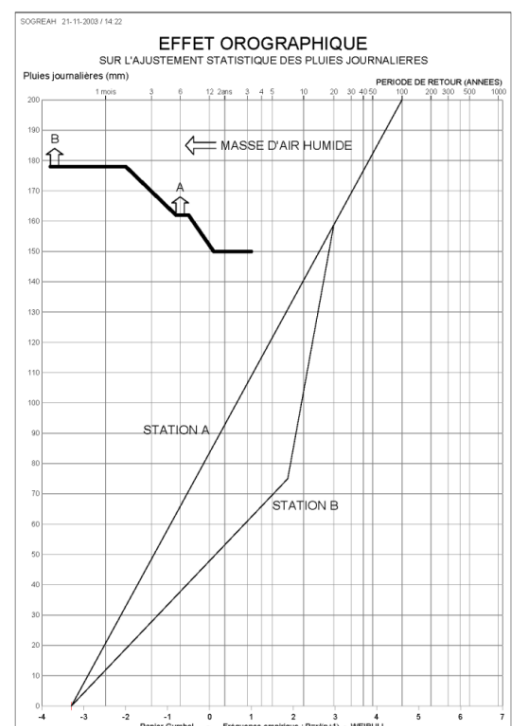
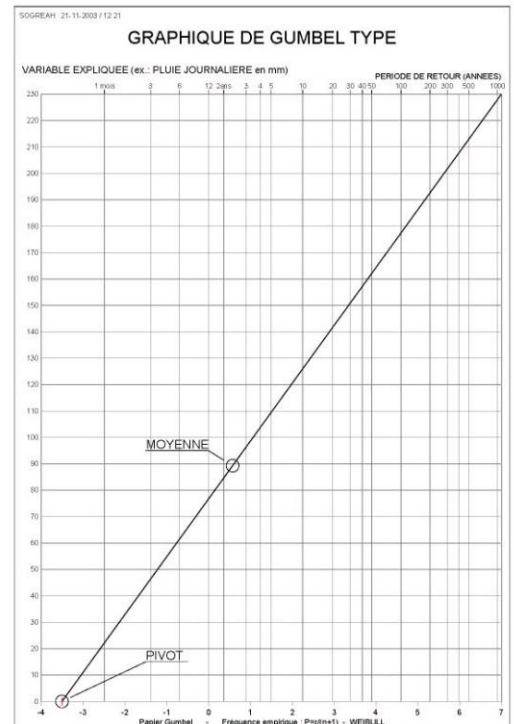
11.2.2 REGIONALISATION

L'intérêt de régionaliser l'étude réside en premier lieu dans la détermination du pivot ce qui permet de réduire l'incertitude sur les ajustements statistiques. Mais la régionalisation a permis, au fil des applications de la méthode, de mettre en évidence des phénomènes particuliers liés à la géographie du secteur d'étude et révélant des "cassures" dans les droites d'ajustement de Gumbel.

On citera en particulier deux phénomènes qui peuvent apparaître sur certains bassins et qui conduisent chacun d'eux à une augmentation de la valeur des pluies rares et donc à celles des débits rares ce qui explique les phénomènes catastrophiques de Nîmes, Vaison la Romaine etc...

11.2.2.1 EFFET OROGRAPHIQUE

Le premier effet est observable sur une station située en aval d'une chaîne de montagne (par rapport au flux des masses d'air humides).



Considérons deux stations A et B, la première étant au pied du versant montagneux amont et la seconde en aval du versant recevant la perturbation.

Lorsqu'une masse d'air chaude et humide arrive sur le versant, le massif montagneux l'oblige à s'élever en altitude ce qui se traduit par des pluies. Lorsque la masse d'air arrive en B, son humidité a diminué ce qui se traduit en B par des pluies moins intenses qu'en A. Sur un graphique de Gumbel cela se traduirait par deux ajustements A et B passant par le même pivot mais dont la pente (le Gradex) est plus faible pour la station B que pour la station A.

Or, si l'on considère une masse d'air de grande ampleur et très humide donc un phénomène de fréquence rare, on peut imaginer que les pluies tombant en A ne provoquent qu'un faible "assèchement" de la masse d'air qui arrive en B avec quasiment les mêmes potentialités qu'en A. Il s'en suit des pluies en B comparables à celles tombées en A. Sur un graphique de Gumbel, cela conduit à une cassure pour l'ajustement B : en dessous d'une certaine période de retour T1 les pluies sont inférieures aux pluies en A et au-dessus d'une autre période de retour T2, les pluies sont identiques aux pluies A.

11.2.2.2 BULLES FROIDES (GOUTTE FROIDE)

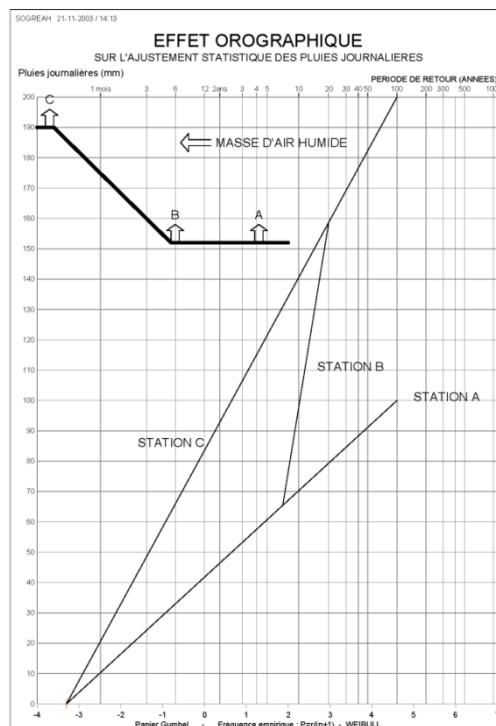
Le phénomène des bulles froides conduit au même résultat que celui exposé précédemment.

Il peut apparaître sur des stations situées à proximité d'un relief même réduit et en amont de ce relief par rapport au flux des perturbations atmosphériques.

Il arrive parfois qu'une masse d'air froide se bloque contre le relief et joue alors, pour la masse d'air chaude et humide qui survient de la Méditerranée, le rôle d'un relief plus prononcé c'est à dire provoque une ascension de cette masse d'air humide générant ainsi des pluies plus intenses que celles qu'il y aurait en l'absence de la masse d'air froide.

Ce phénomène est fréquent dans les Pyrénées orientales où il peut concerner des bassins étendus et explique les crues exceptionnelles survenues ces deux dernières décennies à Nîmes, Vaison la Romaine entre autres.

Il conduit à des ajustements comparables à ce qui était décrit précédemment pour la station B.



11.3 Zone de production du Manival

Le même travail que celui présenté sur la Roize dans le § 2.3 a été réalisé sur le bassin versant du Manival.

Extension des zones actives: (d'après BDOrtho IGN© de 2003 et Scan25 IGN©) :

- Connectées au réseau hydrographique : 0,40 km² (11 %)
- Non connectées au réseau hydrographique : 0,06 km² (2 %)

Processus érosifs : Eboulements, chutes de blocs, éboulisation, ravinement?

Phénomène de transport solide prépondérant :

- Observations RTM : Mixte
- Indice géomorphologique : Mixte

Dispersion des zones en érosion : forte (ID = 0,14)

Légende

- Axe d'écoulement principal
- ⋯ Limite du bassin versant
- Surface en érosion connectée au réseau hydrographique
- Surface en érosion non connectée au réseau hydrographique
- Surface végétalisée

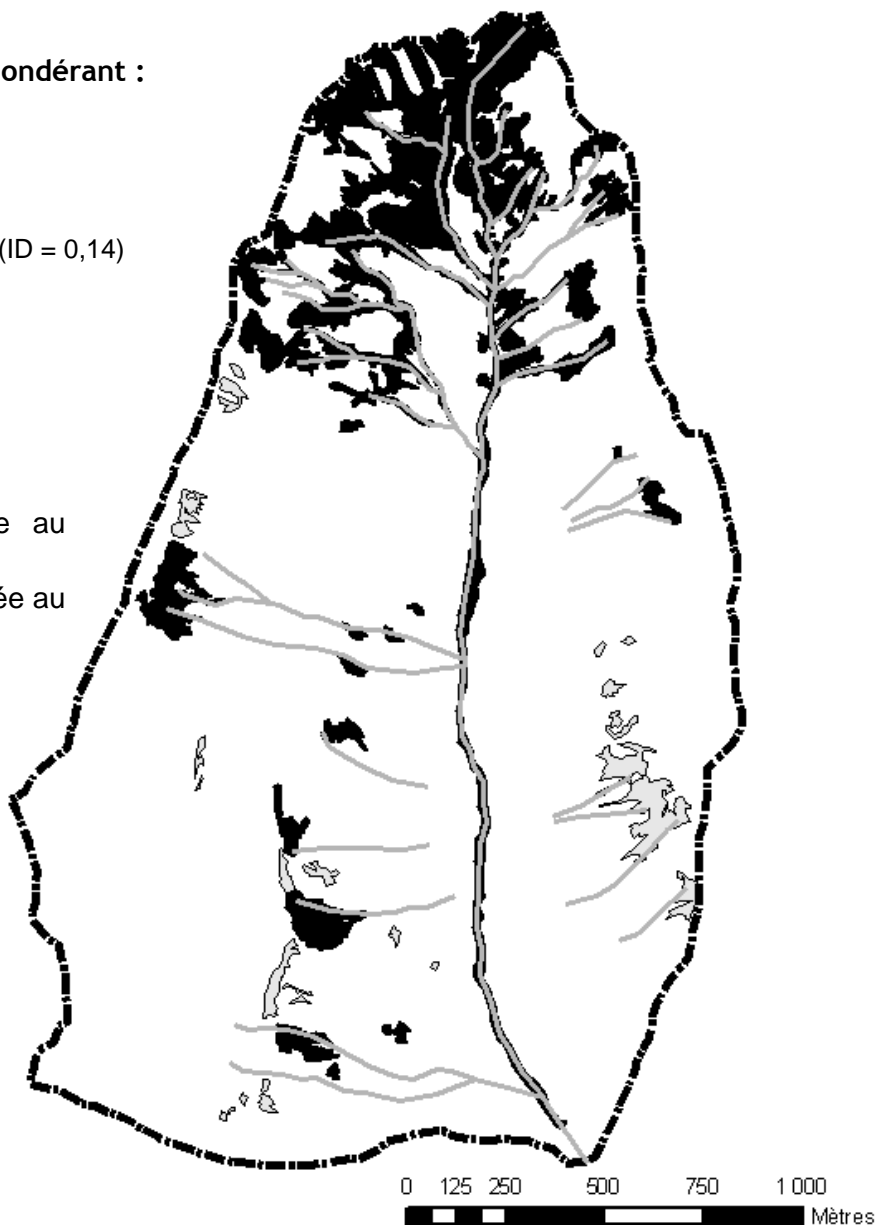


Figure 72: Cartographie des zones actives d'érosion sur le Manival (RTM38 2009)

Résumé du rapport

L'hydraulique torrentielle, c'est-à-dire l'étude des torrents de montagne n'est pas un sujet facile à traiter. Celle-ci est une science relativement jeune qui comporte un certain nombre de spécificités par rapport à l'hydraulique plus classique d'une rivière de plaine. Les événements torrentiels sont en effet des phénomènes très rapides et par voie de conséquence durs à observer mais également très violents, ce qui complique énormément l'acquisition de données.

IRSTEA étudie déjà quelques « gros » torrents particulièrement actifs. Ceci dit, tous les torrents ne sont pas de ce type. L'analyse de la Roize, torrent plus classique, nous a permis de mettre en évidence les phénomènes qui y ont lieu tels que le transport par charriage ou les laves torrentielles.

De plus, cette étude a servi à tester la succession complète d'un certain nombre de méthodes qui vont permettre d'estimer finalement la quantité de sédiments transitant dans la Roize. La combinaison d'une approche géomorphologique, historique, hydrologique, hydraulique et du transport solide a permis d'obtenir une vision globale de ce qui s'y passe, basée sur des valeurs de pluies, de débits liquides et de débits solides pour différents temps de retour utiles à l'évaluation des risques engendrés par la Roize.

Mot clés : Hydrologie de montagne, géomorphologie, hydraulique torrentielle, transport solide par charriage

Abstract

Steep slope stream hydraulics, i.e. mountain-rivers' hydraulics is a complicated field of works. It is a relatively young science with several differences compare to low-lands-river hydraulics. Flash-floods are fast-events, and are thus hard to observe. They are, in addition, violent, which make really complicated to monitor it.

IRSTEA is undertaking studies of few "large" and very active torrents. However, all streams do not belong to this category. This study of the Roize, more classical torrent, will highlight the type of phenomena that occur in this torrent, as for instance bed-load transport or debris flows.

In addition, in this case-study, a complete series of methods allow us to estimate the solid-transport of the Roize. Combining geomorphology, historical analysis, hydrology, hydraulics and solid-transport-formula allow us to gather a global-point of view of what occur in the Roize based on estimation of rains, water-discharges and transported-sediment-volumes for different time period. These new data are useful to assess the natural-hazards related to the Roize.

Key words: mountain hydrology, geomorphology, torrential hydraulics, bed-load transport