Plan de gestion du transport solide dans le bassin versant du Guil

1 - Quantification

JANVIER 2014

Études réalisées par :

S.A.R.L. E.T.R.M. : Vincent KOULINSKI

Chef-lieu - 73700 Les Chapelles

Tél. : 04.79.40.04.78 - etrm@cegetel.net

Bureau d'Études Territorial Méditerranée :

Laurence NAFFZGER

Service de Restauration des Terrains en Montagne des Hautes-Alpes :

Pascal DIOT et Philippe BOUVET

5, rue des Silos, BP 96 - 05003 GAP cedex

Tél. : 04.92.53.61.12 rtm.gap@onf.fr

SOMMAIRE

1. INTRODUCTION 1

1.1. OBJET DE L'ÉTUDE 1

1.2. MORPHOLOGIES ET TRANSPORT SOLIDE 4

1.2.1. Nature des phénomènes 4

1.2.2. Lit alluvionnaire 6

1.2.2.1. Fonctionnement équilibré 6

1.2.2.2. Régulation du transport solide 7

1.2.3. Lit pavé 10

1.2.3.1. Caractéristiques générales 10

1.2.3.2. Pavage exogène 11

1.2.3.3. Pavage endogène 12

1.2.4. Pavage mobile 14

2. ANALYSE DES PLUIES 15

2.1. MÉTHODE 15

2.2. CRUES HISTORIQUES 15

2.2.1. Objet de l'analyse 15

2.2.2. Crue de 1957 16

2.2.3. Crue de Juin 2000 21

2.2.4. Crue d'Octobre 2000 24

2.2.5. Crue de Juillet 2002 26

2.2.6. Crue de mai 2008 27

2.2.7. Crue de juin 2011 29

2.2.8. Comparaison des crues 31

2.3. ÉTUDE LOCALE DES PLUIES JOURNALIÈRES 34

2.4. PRÉCIPITATIONS LOCALES SUR PLUSIEURS JOURS 36

2.5. ÉTUDE RÉGIONALE DES PLUIES JOURNALIÈRES 39
2.5.1. Données disponibles 39
2.5.2. Traitement réalisé 39

2.6. PLUIES À FAIBLE PAS DE TEMPS 42

2.7. VALEURS RETENUES 45
2.7.1. Principe de détermination 45
2.7.2. Abriès 45
2.7.3. Vallée des Aigue et haute vallée du Chagne 46
2.7.4. Bas Queyras 46

3. ANALYSE DES DÉBITS DE CRUES 47

3.1. ANALYSE DES CRUES HISTORIQUES 47
3.1.1. Objet 47
3.1.2. Crue de 1957 47
3.1.3. Crue de Juin 2000 48
3.1.4. Crue d'Octobre 2000 48
3.1.5. Crue de mai 2008 49
3.1.6. Synthèse 50

3.2. DONNÉES HYDROMÉTRIQUES 51

3.3. ESTIMATION DES DÉBITS AUX POINTS CRITIQUES 53
3.3.1. Principe retenu 53
3.3.2. Guil à la Maison du Roy 53
3.3.3. Guil à l'amont d'Aiguilles 54
3.3.4. Guil à Abriès (caravaning) 54
3.3.5. Cristillan en aval de Ceillac 58
3.3.6. Le Chagne à Guillestre 58

3.4. ESTIMATION DES DÉBITS SUR LES DIFFÉRENTS SITES 59
3.4.1. Méthode mise en œuvre 59
3.4.2. Résultats obtenus 60

4. ANALYSE DES PROFILS EN LONG 61

4.1. OBJECTIF 61

4.2. DONNÉES DISPONIBLES 61

4.3. ANALYSE DU PROFIL EN LONG GÉNÉRAL 62
4.3.1. Objectif 62
4.3.2. Profil en long d'ensemble 63
4.3.3. Amont des Gorges d'Aiguilles 64
4.3.4. Traversée d'Aiguilles et gorges amont et aval 66
4.3.5. Plaine de Château Queyras 67
4.3.6. La Combe du Queyras 68
4.3.7. Basse vallée et cône de déjection du Guil 69
4.3.8. Ségure à Ristolas 70
4.3.9. Bouchet en aval du Roux 71
4.3.10. Peynin à Aiguilles 72
4.3.11. Aigue Blanche 74
4.3.12. Torrent d'Izoard 75
4.3.13. Cristillan à Ceillac 76
4.3.14. Le Chagne 77

4.4. ÉVOLUTION DU LIT 79
4.4.1. Objectif 79
4.4.2. Amont des Gorges d'Aiguilles 79
4.4.3. Plaine d'Aiguilles 85
4.4.4. Plaine de Château Queyras 87
4.4.5. La Combe du Queyras 89
4.4.6. Basse vallée du Guil à Guillestre 91

5. QUANTIFICATION DU TRANSPORT SOLIDE 93

5.1. OBJECTIF 93

5.2. GRANULOMÉTRIE DES MATÉRIAUX 93
5.2.1. Guil 93

5.2.2. Bouchet 96
5.2.3. Peynin 97
5.2.4. Cristillan 98
5.2.5. Aigue Blanche 99
5.2.6. Le Chagne 99

5.3. ESTIMATION DU TRANSPORT SOLIDE 100
5.3.1. Principe du calcul 100
5.3.2. Résultats obtenus 101
5.3.3. Fonctionnement des confluents 103
5.3.3.1. Nature des phénomènes 103
5.3.3.2. Quantification 105
5.3.4. Secteur aval 108
5.3.4.1. Chagne 108
5.3.4.1.1. Caractéristiques générales 108
5.3.4.1.2. Prise en compte d'un lit alluvionnaire sur l'ensemble du linéaire 109
5.3.4.1.3. Prise en compte d'un lit pavé dans la partie amont 110
5.3.4.1.4. Synthèse sur le comportement du Chagne à Guillestre 111
5.3.4.2. Guil 112

6. MODÉLISATIONS NUMÉRIQUES 113

6.1. MODÉLISATION DE LA CONFLUENCE GUIL - SÉGURE 113
6.1.1. Objectifs 113
6.1.2. Hypothèses 113
6.1.2.1. Hydrologie 113
6.1.2.2. Apports solides 113
6.1.2.3. Zone modélisée 114
6.1.3. Résultats obtenus 115
6.1.3.1. Crue centennale généralisée 115
6.1.3.2. Crue centennale du Ségure et décennale du Guil 117
6.1.3.3. Crue décennale du Ségure et centennale du Guil 118
6.1.3.4. Effet d'un lit plus étroit 119
6.1.3.5. Effet d'un apport majoré du torrent de Ségure 121
6.1.4. Synthèse 122

6.2. MODÉLISATION DE LA CONFLUENCE GUIL - BOUCHET 122
6.2.1. Objectifs 122
6.2.2. Hypothèses 123
6.2.2.1. Hydrologie 123
6.2.2.2. Apports solides 123
6.2.2.3. Zone modélisée 124
6.2.3. Résultats obtenus 125
6.2.3.1. Crue centennale généralisée 125
6.2.3.2. Crue centennale du Bouchet et décennale du Guil 127
6.2.3.3. Crue décennale du Bouchet et centennale du Guil 128
6.2.3.4. Élargissement de la confluence 129
6.2.4. Synthèse 131

6.3. MODÉLISATION DE LA CONFLUENCE GUIL - PEYNIN 132
6.3.1. Objectifs 132
6.3.2. Hypothèses 133
6.3.2.1. Hydrologie 133
6.3.2.2. Apports solides 133
6.3.2.3. Zone modélisée 134
6.3.3. Résultats obtenus 134
6.3.3.1. Crue centennale généralisée 134
6.3.3.2. Crue centennale du Peynin et décennale du Guil 136
6.3.3.3. Crue décennale du Peynin et centennale du Guil 137
6.3.3.4. Élargissement du lit en aval de la confluence 138
6.3.4. Synthèse 140

6.4. CONFLUENCE GUIL - AIGUE BLANCHE 141
6.4.1. Objectifs 141
6.4.2. Fonctionnement général 141
6.4.2.1. Secteur de la confluence 141
6.4.2.2. Zone centrale et étroite 145
6.4.2.3. Amont du verrou rocheux de Château Queyras 146
6.4.3. Analyse des profils en long 148
6.4.4. Comportement en crue 152
6.4.4.1. Phénomène rencontré 152
6.4.4.2. Écoulement au droit du pont 153

6.4.4.3. Étude de la crue centennale 157
6.4.4.3.1. Méthode de calcul 157
6.4.4.3.2. Calcul de la ligne d'eau 158
6.4.4.3.3. Dépôt de matériaux 159
6.4.4.4. Étude de la crue de type juin 2000 161
6.4.4.4.1. Calcul de la ligne d'eau 161
6.4.4.4.2. Bilan du volume de matériaux transité 162
6.4.5. Synthèse sur l'état actuel 162

6.5. CONFLUENCE CHAGNE / CHAGNON À VARS 163
6.5.1. Objectifs 163
6.5.2. Hypothèses 163
6.5.2.1. Hydrologie 163
6.5.2.2. Apports solides 164
6.5.2.3. Zone modélisée 164
6.5.3. Résultats obtenus 165
6.5.3.1. Crue centennale généralisée 165
6.5.3.2. Crue centennale du Chagnon et décennale du Chagne 167
6.5.3.3. Crue décennale du Chagnon et centennale du Chagne 168
6.5.4. Synthèse 169

6.6. MODÉLISATION DE LA CONFLUENCE GUIL - CHAGNE 170
6.6.1. Objectifs 170
6.6.2. Hypothèses 170
6.6.2.1. Hydrologie 170
6.6.2.2. Apports solides 170
6.6.2.3. Zone modélisée 171
6.6.3. Résultats obtenus 172
6.6.3.1. Crue centennale généralisée 172
6.6.3.2. Crue centennale du Chagne et décennale du Guil 173
6.6.3.3. Crue décennale du Chagne et centennale du Guil 174
6.6.3.4. Engravement de la confluence avec la Durance 175
6.6.3.5. Apports solides supérieurs du Chagne 177
6.6.4. Synthèse 178

1. INTRODUCTION

1.1. Objet de l'étude

Le Guil est une rivière torrentielle qui conflue avec la Durance à Guillestre. Il présente les caractéristiques suivantes :

- Lit à forte pente localement très mobile pouvant divaguer sur l'ensemble du fond de vallée,
- Apports essentiels de torrents affluents tant pour les débits liquides que pour les volumes de matériaux,
- Capacité à modifier totalement son lit lors des fortes crues, rendant souvent secondaires les phénomènes purement hydrauliques.

Cependant, le régime hydrologique du Queyras est très spécifique :

- Site particulièrement à l'abri des dépressions provenant de l'Ouest. Cette particularité explique la très faible activité ordinaire du Guil et - en particulier - l'absence de crues significatives courantes.
- Crues extrêmement violentes associées au phénomène de Lombarde. En effet, le haut bassin est particulièrement exposé et les précipitations peuvent alors être considérables (dépassant nettement 200 mm). Les crues très destructrices de 1948, 1957 et 2000 sont évidemment de ce type. Les hauts bassins versants du Chagne et du Cristillan, et surtout le haut Guil sont particulièrement exposés à ce phénomène.
- Ce régime contrasté explique, plus qu'ailleurs, que les évolutions de la rivière puissent être plus importantes en quelques heures que durant plusieurs décennies.

Après les crues de 2000, le Parc Naturel Régional du Queyras a fait réaliser une étude d'ensemble du Guil :

Parc Naturel Régional du Queyras

Octobre 2002

Contrat de rivière du Guil

Étude du fonctionnement physique et hydraulique, de l'entretien et de la Mise en valeur du Guil et de ses affluents

ETRM - SOGREAH - ARGEO - CCEAU

Cette étude permet de mettre en évidence les évolutions du lit du Guil sur la dernière décennie avec une rare précision, les levés topographiques, les observations du lit et les photographies prises à cette époque étant disponibles.

Ainsi, le présent rapport reprend de larges extraits de cet ancien document, soit pour confirmer les éléments alors présentés, soit pour mettre en évidence les évolutions sur la dernière décennie.

Il n'est pas possible d'évoquer le Guil sans parler de la crue de juin 1957. Celle ci a modifié profondément les fonds de vallée et a été l'occasion d'un réaménagement complet de la vallée du Guil et des cônes de déjection de ses affluents. La quasi-totalité des ouvrages hydrauliques actuels a été construite à la suite de cette crue exceptionnelle.

Le dispositif de protection contre les crues est donc basé sur des ouvrages datant de plus de cinquante ans. Or, ces ouvrages ont parfois mal vieilli :

- Les niveaux des fonds ont évolué, affouillant les protections et les détruisant localement. C'est le cas par exemple entre Ville Vieille et Château Queyras.
- La qualité de construction des ouvrages n'a pas toujours été optimale. Ainsi, certains ouvrages vieillissent prématurément, offrant alors une protection illusoire comme à Abriès.
- L'évolution de l'occupation de l'espace a modifié le fonctionnement des ouvrages. C'est par exemple le cas de l'entonnement du chenal de Ceillac, partiellement obstrué par des constructions et des remblais.
- Les enjeux ont évolués. Ainsi, le lit aval du Chagne est aujourd'hui bordé de campings, d'installations sportives et de zones artisanales… absentes lors de la forte crue de 1957.

Les ouvrages d'après 1957 constituent donc l'élément essentiel dans l'étude du Guil. Les crues de 2000, puis de 2008, ont montré que ces ouvrages étaient indispensables pour la protection des biens et des personnes. Leur état et les lacunes de protections qui en découlent doivent être étudiés en détail.

Ainsi, l'étude sera articulée autour des aspects suivants :

- Étude hydrologique en apportant une attention particulière au phénomène de retour d'Est. Elle intègre la crue de 2008 qui correspond à des volumes de matériaux transportés importants, même si les débits de pointe de cette crue sont restés très modérés.
- Analyse du profil en long du Guil permettant de mettre en évidence son fonctionnement.
- Analyse comparative des différents profils en long du Guil, ce qui permet de retracer l'historique des évolutions du lit et des causes des dégradations que l'on peut observer actuellement. Les levés réalisés entre 1999 et 2001 combinés à une série de nouveaux profils permettent une analyse particulièrement précise de l'évolution des niveaux.
- Quantification du transport solide avec prise en compte des apports de matériaux. Ce travail permet de mettre en évidence les tendances à l'érosion ou au dépôt ainsi que son ampleur.
- Utilisation de l'historique des crues afin de mettre en évidence les points les plus critiques, les aménagements les plus efficaces et les points restant encore très sensibles.
- Description du lit. Ce travail permet de mettre en évidence les différents points critiques en se basant notamment sur les crues récentes :
    - Évolution du lit, notamment depuis 2000,
    - Risque d'inondation,
    - Dégradation du lit,
    - État des ouvrages.

Ce travail est d'abord destiné à mettre en évidence une hiérarchisation des problèmes dans le bassin versant.

- Un inventaire des ouvrages permet d'optimiser la gestion de ce patrimoine imposant mais pas toujours en bon état.
- Un inventaire des boisements doit permettre d'en définir une gestion rationnelle.
- Définition, en concertation avec les élus, des objectifs poursuivis.
- Proposition de principes d'aménagements.

1.2. Morphologies et transport solide

1.2.1. Nature des phénomènes

Quatre types de transport solide peuvent être observés sur le Guil et ses principaux affluents :

1. Le transport solide par **charriage** correspond aux éléments grossiers traînés ou roulés sur le fond par l'écoulement. Les interactions avec le lit sont alors prépondérantes et ce type de transport est directement lié à la morphologie du lit. D'autre part, il est nécessaire que les contraintes hydrauliques soient suffisamment élevées pour pouvoir assurer le transport des cailloux sur le fond. Un tel transport est donc exceptionnel et ne se produit que quelques jours par an, lorsque les débits sont particulièrement élevés. La forte interaction avec le lit explique que seul ce transport solide fasse l'objet d'une quantification et qu'il explique les évolutions observées (engravement, dépôts, divagation….).
2. Le transport solide par **suspension** correspond au déplacement des matériaux au sein de l'écoulement : ils sont assez fins pour que la turbulence de l'écoulement dépasse la vitesse de chute du grain. Ces matériaux très fins sont transportés sans contact avec le lit. Ils n'ont donc pas d'influence prépondérante sur le comportement de l'écoulement et la morphologie du lit mineur. Par contre, ils peuvent jouer un rôle essentiel pour le développement des terrasses élevées ou l'envasement des retenues.
3. Le transport solide par **saltation** correspond à des matériaux assez fins pour que les interactions avec le fond ne soient pas prépondérantes mais trop grossiers pour que les matériaux restent durablement dans l'écoulement. Dans les rivières, il s'agit essentiellement de sables. Dans le cas du bassin versant du Guil, ce type de transport ne parait pas prépondérant.

La figure suivante schématise ces trois types de transport solide "classiques" :

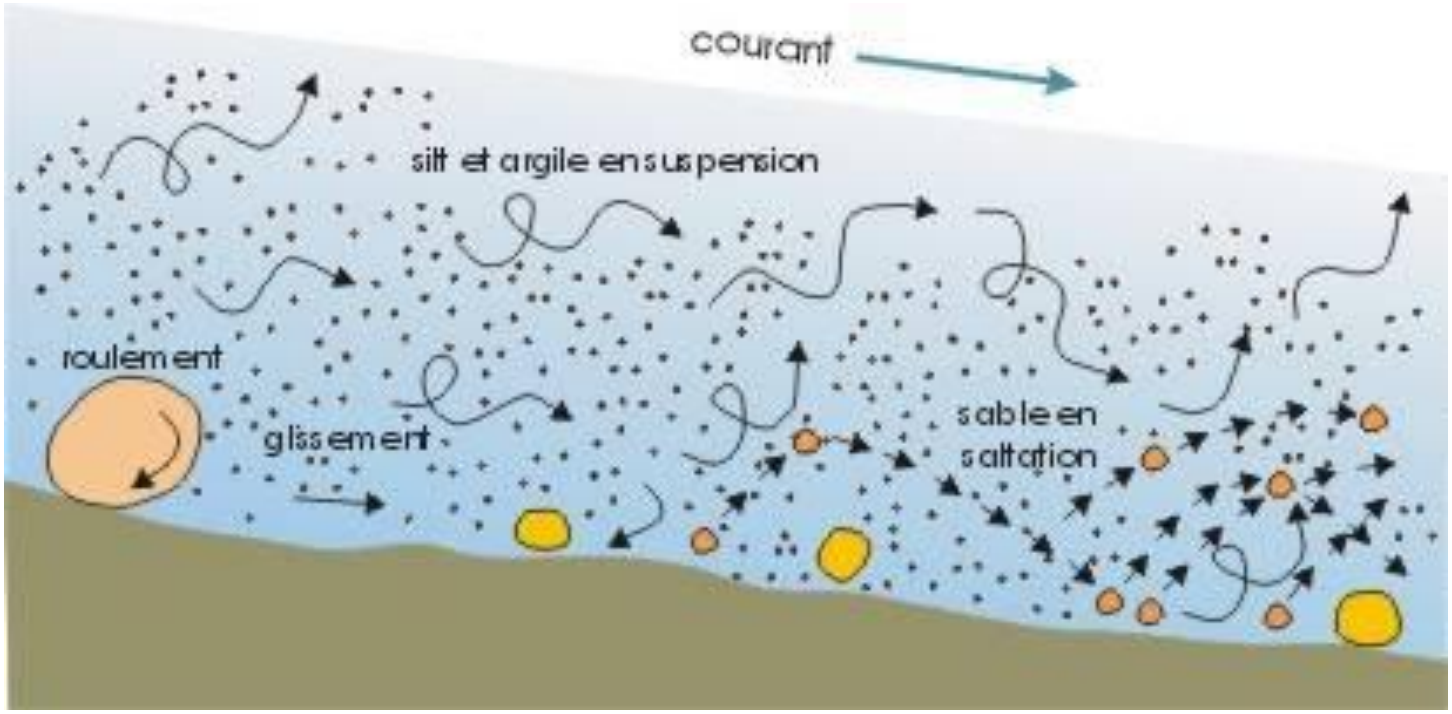


Figure 1 : Différents types de transport solide en rivière.

4. Les **laves torrentielles** correspondent à l'écoulement d'un fluide monophasique boueux lors des crues. Ce phénomène modifie profondément les écoulements. Par rapport au charriage, il ne s'agit pas d'une gradation du transport solide mais d'un changement complet de nature. L'étude des torrents à lave est donc radicalement différente de celle des torrents avec seulement du charriage. Ce type de transport solide est évidemment absent du lit du Guil, et reste étonnamment rare dans le bassin versant. Outre de multiples petits torrents très raides comme dans le Val d'Escreins ou les gorges du Cristillan par exemple, les principaux torrents formant des laves torrentielles sont les suivants :

- Torrent de Maloqueste,
- Torrent de la Garcine,
- Torrent d'Izoard,
- Rivet,
- Torrent de la Valette en amont de la Maison du Roy,
- Torrent du Palps
- …

La suite de l'exposé des phénomènes concerne les cours d'eau à charriage et aborde le phénomène de charriage.

1.2.2. Lit alluvionnaire

1.2.2.1. Fonctionnement équilibré

Le lit alluvionnaire résulte d'un échange permanent entre le transport solide et le lit. Les matériaux sont de granulométrie comparable et la géométrie du lit résulte d'un équilibre dynamique sans cesse modifié par les conditions d'écoulement. Le schéma suivant montre un tel fonctionnement pour un tronçon de rivière :

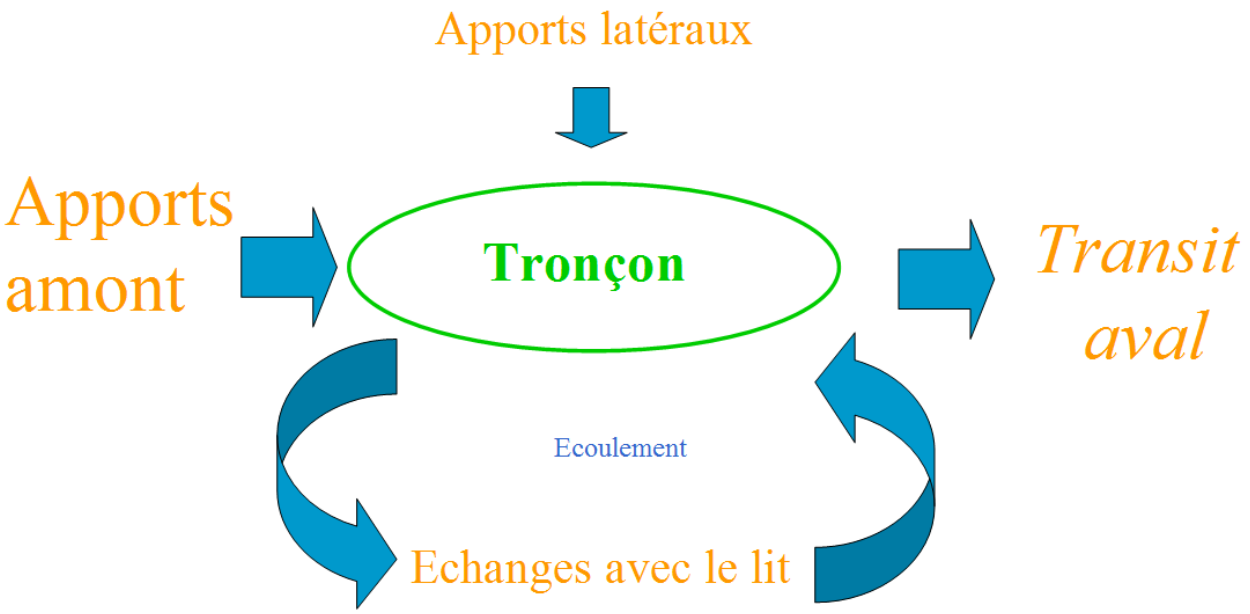


Figure 2 : Vue schématique d'un transport solide par charriage équilibré.

Le transit aval est ici imposé uniquement par les conditions d'écoulement, la géométrie du lit et la granulométrie. Dans un lit à l'équilibre, les apports et le transit aval sont globalement égaux. Les échanges avec le lit présentent alors un bilan nul. Par contre, ces échanges permettent une **régulation** du transport solide et un transit aval correspondant à la capacité de transport de l'écoulement.

Ces échanges permettent l'instauration d'une morphologie correspondant à un lit mobile, souvent en tresse. Les modifications du tracé en plan - même de grande ampleur - ne signifient absolument pas un déséquilibre du fonctionnement de la rivière, ni une modification du transport solide ni une modification du niveau du lit.

Sur le Guil, cette morphologie apparaît naturellement sur un linéaire important :

- Amont de Château Queyras à l'exception des gorges de part et d'autre de la plaine d'Aiguilles.
- Localement dans les gorges (Plaine de la Fusine ou de la Chapelue).
- Sur le cône de déjection en aval de la sortie des gorges.

La photo suivante montre le lit du Guil en amont de Ristolas avec un lit très divaguant et parfaitement alluvionnaire :

Photo 1 : Lit alluvionnaire mobile dans le tronçon aval.

1.2.2.2. Régulation du transport solide

Les échanges avec le lit permettent une régulation du transport solide. En effet, pour des apports donnés, la rivière va transporter un volume de matériaux imposé par l'écoulement. Le lit doit alors s'adapter pour rétablir un équilibre. Le schéma suivant montre la situation dans le cas d'un apport déficitaire :

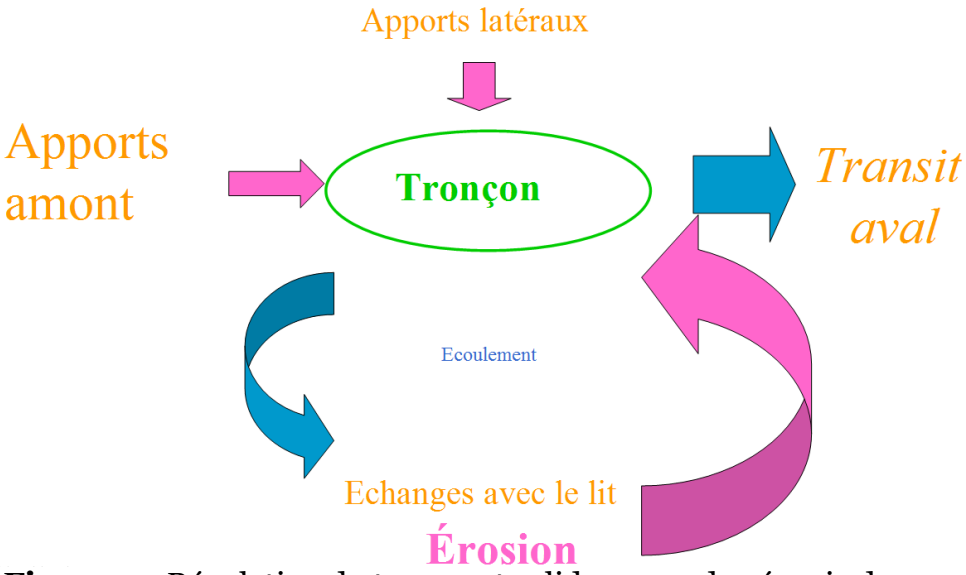


Figure 3 : Régulation du transport solide en cas de pénurie des apports.

Dans ce cas, le lit est érodé, même si localement des dépôts sont possibles, en rapport avec les divagations de la rivière. Naturellement la rivière retrouve un équilibre :

- L'enfoncement du lit va conduire, pour un niveau aval fixe, à une réduction de pente.
- La réduction de pente va diminuer la capacité de transport.
- L'équilibre avec le lit amont va se rétablir.

La figure suivante schématise le début d'une telle évolution :

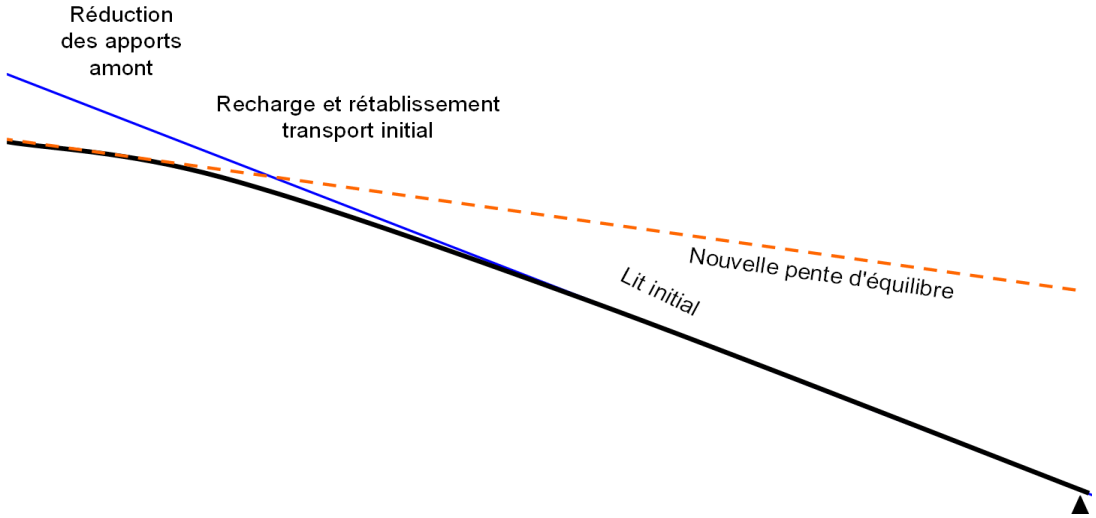


Figure 4 : Début de l'évolution du profil en long en cas de réduction des apports.

Ce graphique montre que l'adaptation du lit commence par l'amont. À l'extrémité amont du tronçon la pente du lit évolue rapidement vers la pente d'équilibre plus faible, correspondant aux nouveaux apports solides.

La fourniture de matériaux par le lit permet de retrouver un transport solide suffisant pour conserver temporairement la pente initiale du lit dans la partie aval. Cette fourniture entraine l'abaissement du lit amont et une érosion des berges.

Le phénomène se poursuit avec un abaissement du lit et une lente propagation vers l'aval, comme le montre le schéma suivant avec un état plus avancé que précédemment :

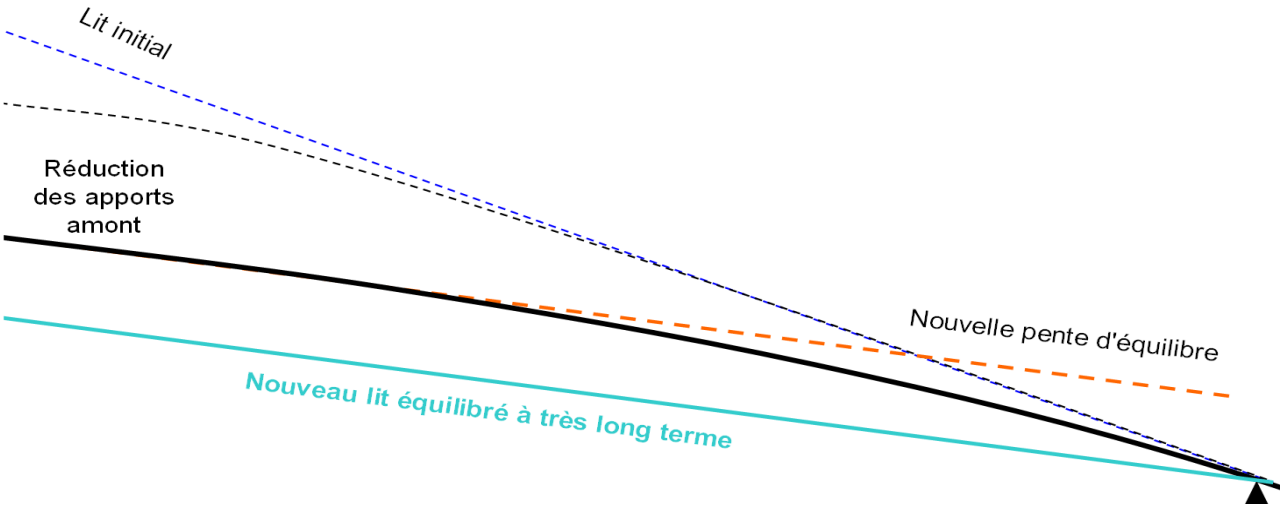


Figure 5 : Nouvelle pente d'équilibre en cas de pénurie de matériaux amont.

Sur le très long terme, le lit retrouve un équilibre avec la pente d'équilibre réduite correspondant aux nouveaux apports amont.

La réduction de pente est très lente et sa vitesse diminue au fur et à mesure que le lit se rapproche de l'équilibre. A long terme, un nouvel équilibre est atteint. Cela explique que, sur la plupart des rivières, la pente géométrique du lit corresponde à la pente d'équilibre.

Ainsi, chaque zone alluvionnaire atténue les variations de transport amont afin de préserver le transport solide aval. Ce n'est que lorsque la zone alluvionnaire amont voit sa pente changer sous l'effet de l'érosion que le transport solide aval est affecté. Sur le Guil, le lit est très large - notamment dans son cours supérieur - ce qui assure une régulation du transport solide et réduit fortement les risques de variation de niveau du lit… sauf dans les zones de confluence avec les torrents.

Ce fonctionnement correspond uniquement aux matériaux transportés en charriage. En effet, le transport en suspension étant largement indépendant du lit, il n'y a pas de phénomène de régulation et les variations amont du transport solide sont très rapidement sensibles en aval.

D'autre part, cette évolution fait abstraction du phénomène de pavage, détaillé dans le chapitre suivant.

Évidemment, en cas d'apport solide excédentaire, le lit s'adapte à la nouvelle pente d'équilibre, plus forte, toujours en partant de l'amont, comme le montre le graphique suivant :

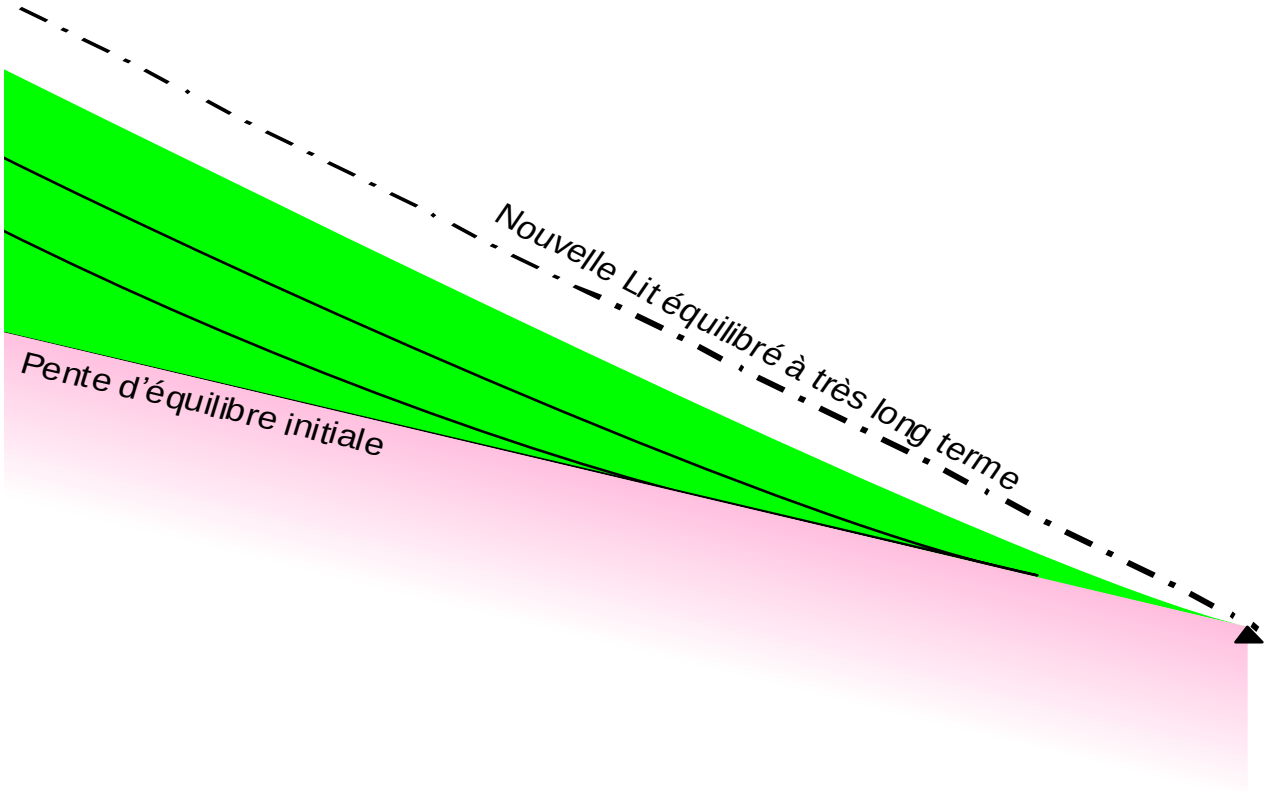


Figure 6 : Nouvelle pente d'équilibre en cas d'augmentation des apports amont.

1.2.3. Lit pavé

1.2.3.1. Caractéristiques générales

Le pavage du lit correspond à une rupture du lien entre le lit et le transport solide, comme le montre le schéma suivant :

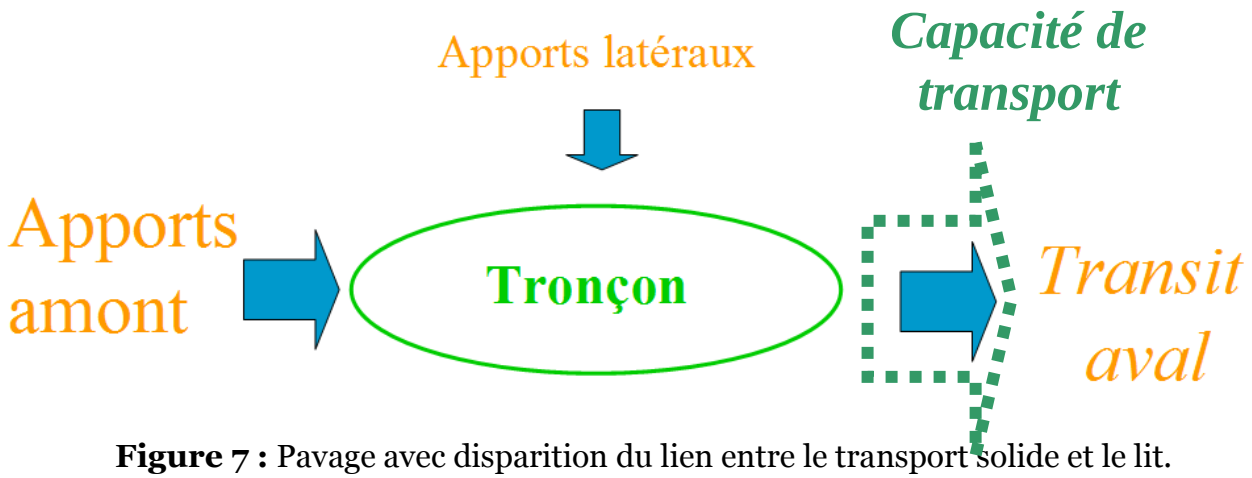


Figure 7 : Pavage avec disparition du lien entre le transport solide et le lit.

Dans ce cas, le transit aval ne dépend plus de la capacité de transport hydraulique mais seulement des apports amont. En effet, avec cette morphologie, la capacité de transport est toujours supérieure aux apports amont, car - dans le cas contraire - on observerait un dépôt avec le rétablissement des échanges avec le lit et la formation d'un lit alluvionnaire. Cette capacité de transport, dépendant essentiellement de la pente et du débit liquide, est schématisée en pointillés.

Au contraire du cas précédent, un tel lit perd toute possibilité de régulation du transport solide et il transfert rapidement les évolutions de transport solide amont vers l'aval. Des échanges avec le lit restent possibles, mais sans lien avec les grands équilibres du transport solide. Il s'agit de matériaux qui s'arrêtent dans les zones abrités de l'écoulement, les volumes étant très faibles.

Le pavage couvre une grande variété de situations et plusieurs phénomènes peuvent être à l'origine de ces évolutions. Ils sont détaillés par la suite.

1.2.3.2. Pavage exogène

Il s'agit du cas "simple" d'un pavage formé par des éléments extérieurs au lit proprement dit. Le cas le plus courant dans le bassin versant du Guil est le pavage par de très gros blocs car les apports de blocs (éboulement, laves torrentielles…) sont fréquents. Un pavage direct par le substratum rocheux est plus rare mais peut aussi être observé, y compris sur un linéaire important comme dans la Combe de l'Ange Gardien en aval de Château Queyras. La photo suivante montre le Guil dans les gorges en amont de la Chapelue avec un pavage par le substratum rocheux et surtout par des blocs provenant d'éboulements :

Photo 2 : Pavage rocheux et par des blocs dans les gorges du Guil.

Ce type de pavage est particulièrement net sur certains affluents même importants comme l'Aigue Blanche, le Cristillan, le Rif Bel ou le Chagne.

1.2.3.3. Pavage endogène

Le pavage endogène correspond à la formation d'une couche de matériaux grossiers à partir des matériaux du lit. En effet, le transport des matériaux grossiers est généralement plus difficile que celui des matériaux fins. En cas d'érosion, les matériaux fins sont - plutôt - plus facilement érodés. Cette évolution est associée à une redistribution des matériaux avec le regroupement des matériaux grossiers entre eux et la formation de facies variés (alternance de seuils et de mouilles notamment).

La figure suivante illustre - d'après Liebeau - la formation du pavage à partir d'un lit de granulométrie homogène :

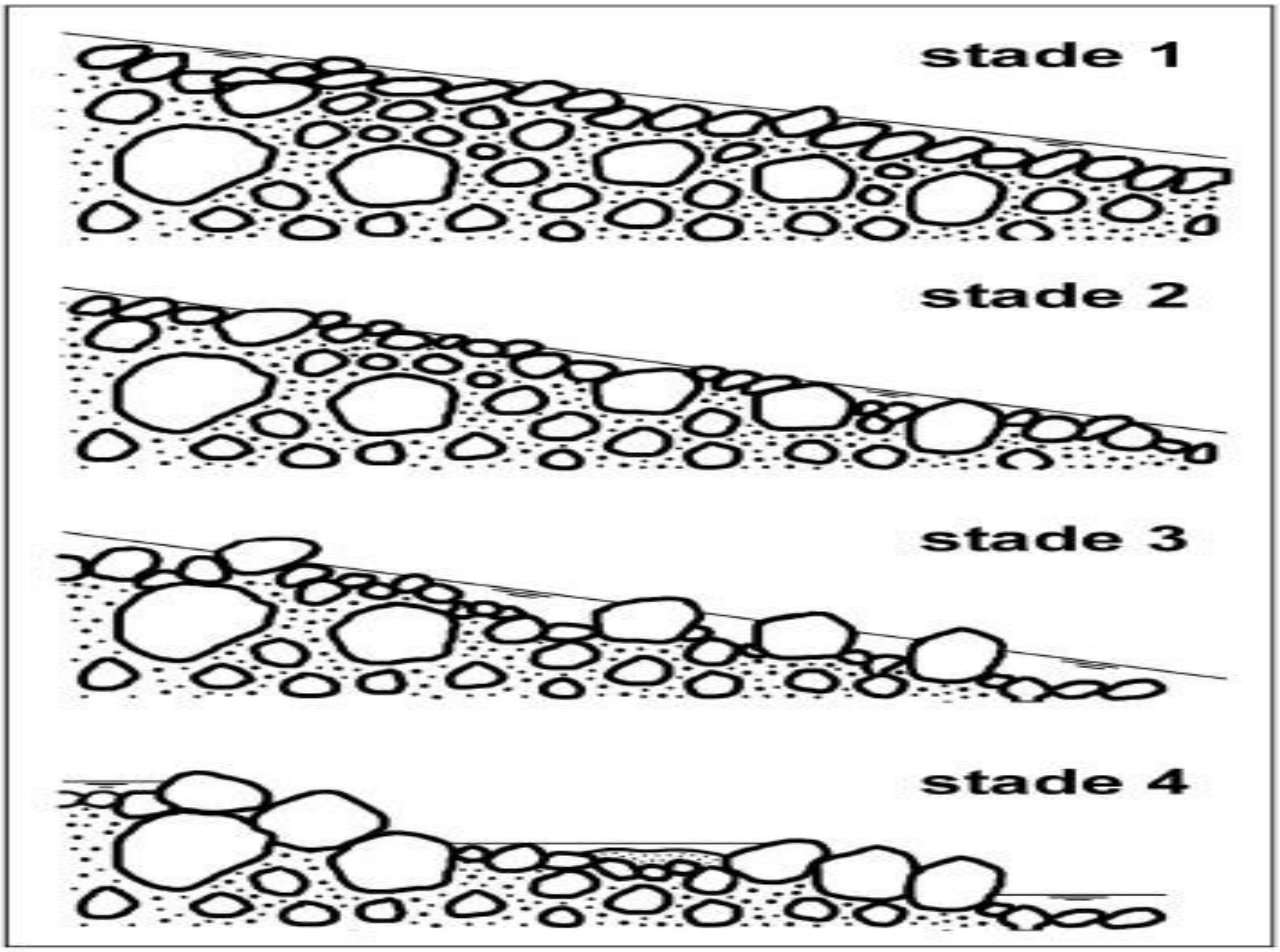


Figure 8 : Vue schématique d'un pavage endogène.

Ce type de pavage est formé par l'écoulement… qui peut aussi le détruire lors des fortes crues. Il s'agit donc d'un élément temporaire, beaucoup moins résistant que le pavage exogène.

Les photos suivantes montrent la formation d'un tel pavage en aval de la confluence avec le torrent du Clot, l'écoulement du Guil générant un tri granulométrique marqué :

Photo 3 : Tri granulométrique et pavage à la confluence avec le torrent du Clot.

1.2.4. Pavage mobile

La nature, dans sa remarquable diversité, présente évidemment des situations beaucoup moins tranchées que celles exposées précédemment. En effet, dans certains cas, les blocs en place sont assez nombreux pour dissiper une partie de l'énergie de l'écoulement et permettre un transport solide avec une pente géométrique supérieure à la pente d'équilibre. Par contre, ces blocs ne sont pas assez nombreux pour fixer le tracé du lit.

Ces blocs proviennent généralement d'un héritage géologique et ne correspondent plus au fonctionnement actuel du bassin versant. Il peut s'agir d'anciennes moraines ou d'apports grossiers provenant de gorges dans des phases de transport solide intense. Ce second cas est le plus visible dans le bassin versant, notamment sur le Guil dans le secteur de la Roche Écroulée mais aussi sur le Chagne et le Rif Bel dans la traversée de Guillestre.

En effet, le Chagne a creusé de profondes gorges entre Vars et Guillestre, apportant sur son cône de déjection des volumes importants de matériaux dont certains sont grossiers. Le lit est alors stabilisé par ces blocs et les divagations sont rares. Cependant, lors des crues extrêmes, le lit reste mobile, mais le débit solide n'atteint que difficilement la capacité maximale de transport. Un tel lit ne présente pas un équilibre au même titre qu'un lit alluvionnaire et la tendance est plutôt au creusement - modéré - lors des fortes crues, un engravement du lit étant difficile même à long terme.

La photo suivante montre le lit du Chagne sur son cône de déjection avec la présence de matériaux particulièrement grossiers et une mobilité très réduite :

Photo 4 : Lit de Chagne avec pavage mobile sur le cône de déjection.

Le torrent d'Izoard ou l'Aigue Blanche présente le même type de morphologie à leur confluence avec le Guil.

2. ANALYSE DES PLUIES

2.1. Méthode

Le Queyras présente une particularité : des phénomènes de retour d'Est (Lombarde) très marqués alors qu'il bénéficie, de manière très générale, d'un régime abrité avec des précipitations médiocres.

La crue de Juin 1957, comme celles de 2000, correspond à un tel phénomène de dépression méditerranéenne remontant par l'Italie.

La crue de mai 2008 est plus atypique et correspond aussi à des pluies très étendues sur l'ensemble des Alpes avec des intensités de pluies relativement faibles mais des volumes considérables. Elle présente un comportement assez proche de la crue de 1856 mais reste de moindre ampleur.

La démarche retenue ici consiste à analyser les pluies locales, puis à mettre en évidence l'effet des retours d'est en utilisant les précipitations provenant des sites particulièrement sensibles à ce type de phénomène, de la Maurienne à l'Ubaye.

2.2. Crues historiques

2.2.1. Objet de l'analyse

Le Queyras a subi cinq fortes crues durant les dernières décennies :

- Juin 1957. Il s'agit de la crue la plus forte du XXème siècle. Elle a concerné la quasi-totalité du bassin versant.
- Juin 2000. Cette crue, dont la période de retour est de plusieurs décennies, a concerné essentiellement le haut bassin versant en amont d'Aiguilles.
- Octobre 2000. Les précipitations ont alors été très fortes sur le bassin versant du Bouchet et dans le secteur d'Abriès. Elle paraît moins forte que celle de juin 2000.
- Juillet 2002. La zone de forte précipitation est cantonnée, pour l'essentiel, en amont de Ristolas, ce qui explique des débits modérés en aval.
- Mai 2008. La zone concernée excède nettement le Queyras, même si la haute vallée du Guil a - une fois encore - reçu des précipitations très importantes. Cette crue se caractérise par sa durée très importante.

L'analyse de ces crues, et des précipitations qui y sont associées, est particulièrement intéressante en particulier pour les plus récentes car il a été possible de réaliser une série d'observations après la crue, et de mettre en évidence les variations de pluviométries.

Les observations relatives au comportement du Guil et de ses affluents seront détaillées dans les autres chapitres.

2.2.2. Crue de 1957

Les pluies constituent les principales données connues. Le tableau suivant indique les précipitations relevées[1] à proximité du Queyras durant le mois de Juin 1957 :

Date	*2 / 3*	*8*	*9*	*10*	*11*	*12*	*13*	***14***	*15*	*16*	*17*	*18*	**total**
Lautaret	28	8	8	0	29.6	3.4	20.1	**24.9**	9	3.5	12.5	0.2	**147.2**
La Vachette	12	8	7.9		11.5	4.9	30.2	**59.4**	4.8	4.5	3.7		**146.9**
Cervières			9.3		11.3	4.5	24.3	**54.6**	2.0	3.0		3.8	**112.8**
Guillestre	11	13	13.1	0.6	6.0	3.0	12.0	**40.4**	2.0	0.5	2.4	0	**104**
Vars (Ste Catherine)			6.9	7	8.7	14.2	19.4	**87.4**	4.7	3.1	5.9	5.7	**163**
Ceillac	13	14	13.9	0	7.8	4.0	23.0	Données manquantes					**75.7**
Arvieux	12	12	11.6	0.5	7.7	4.1	28.5	**111.0**	6.5	2.8	3.9	3.9	**204.3**
Abriès	24	22	22	3.5	1.2	0.7	79	**202.0**	11	Données manquantes			**320**
Château Queyras	17	9	9.4			9.2	32.7	**158.0**	9.7		3.6		**248.1**
St Véran	12	8	7.7	0.4	7	7	46.5	**159.0**	11.4	9.1	8.3	3.8	**280.5**

Plusieurs remarques sont nécessaires concernant la qualité des données :

- Les données de Ceillac sont manquantes à partir du 14, le village étant partiellement détruit et ayant été évacué dans la nuit du 13 au 14.
- De même, les données d'Abriès ont été reconstituées pour la journée du 13 juin. Il convient donc d'être particulièrement prudent.
- La note indique que "*tous les observateurs ont signalé le caractère d'intermittence des précipitations et également leur forme d'averses orageuses violentes, surtout le 13 juin et dans la nuit du 13 au 14*". Cette remarque est essentielle car elle explique que, malgré la grande durée des précipitations, les torrents affluents aient connu de très fortes crues : les précipitations intenses et courtes étaient bien adaptées à leurs petits bassins versants.
- Des intensités de 30 mm/heure auraient été relevées à Abriès, en particulier à la fin de l'épisode lorsque les terrains étaient saturés.
- Pour mémoire, les précipitations à Bonneval sur Arc (Maurienne) ont été de 387 mm du 10 au 16 juin. Ces valeurs sont un peu supérieures à celles observées à Abriès.
- Il convient de noter que, "pendant les trois mois précédents, les précipitations avaient été déficitaires (d'un bon tiers)". C'est ce que montre la figure suivante pour le cas de Ceillac. Le mois de février avait cependant été particulièrement neigeux avec plus de 100 mm, ce qui explique en grande partie la présence de neige sur les sommets.

---

[1] Ces valeurs sont issues d'une "note préliminaire sur les inondations dans les Hautes-Alpes en juin 1957" établie par la Météorologie Nationale.

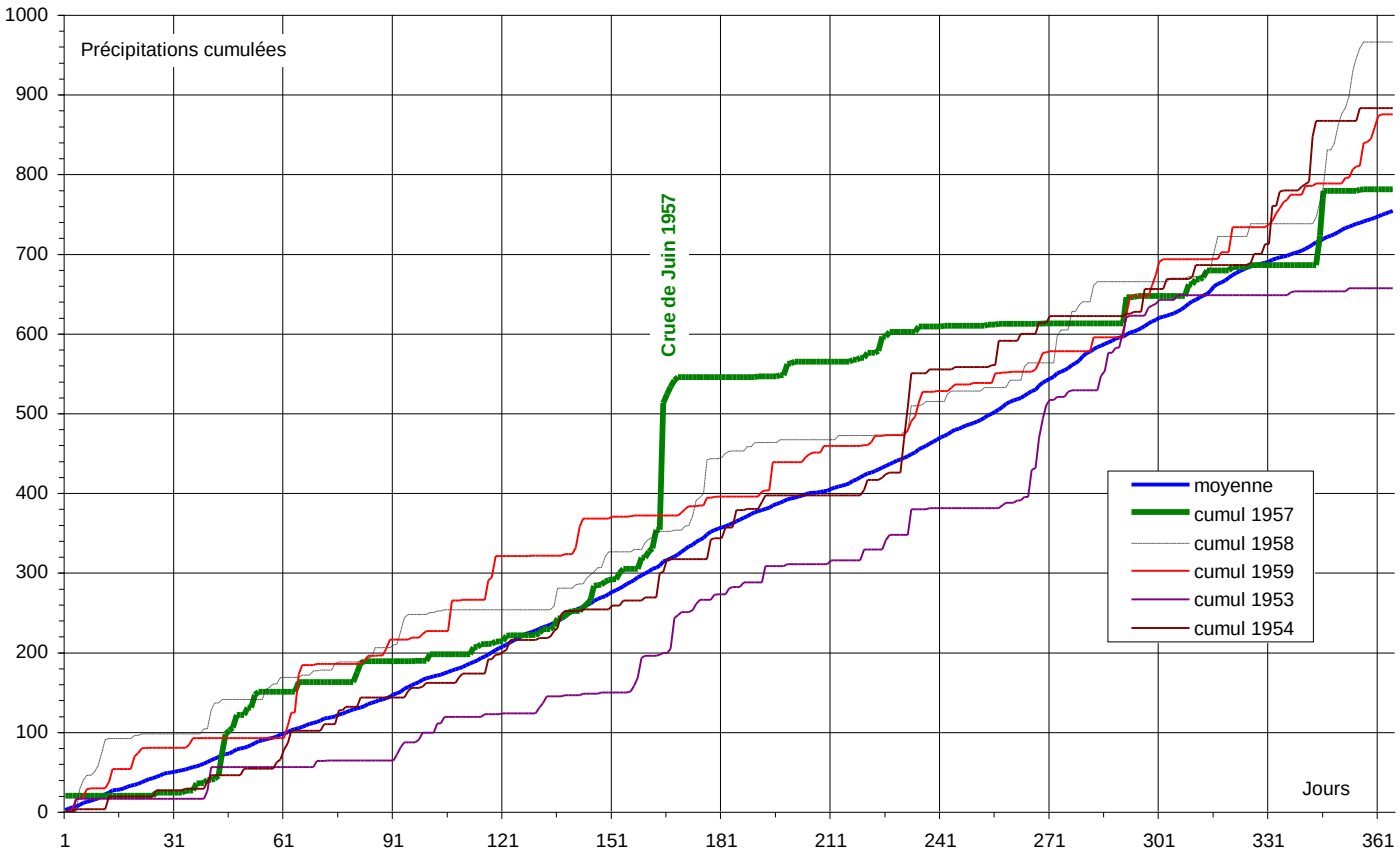


Figure 9 : Précipitations cumulées sur l'année à Ceillac.

- D'autre part, près de 100 mm sont tombés au mois de mai mais de façon très régulière. Ainsi, la neige était présente en montagne et les terrains avaient été largement préparés par des précipitations relativement abondantes. La crue s'est donc produite avec des conditions initiales particulièrement défavorables.

Ces valeurs montrent à la fois une grande dispersion et une croissance très marquée lorsque l'on s'approche de la crête frontalière. Cette répartition est cohérente avec les observations dans le Queyras lors de cet épisode :

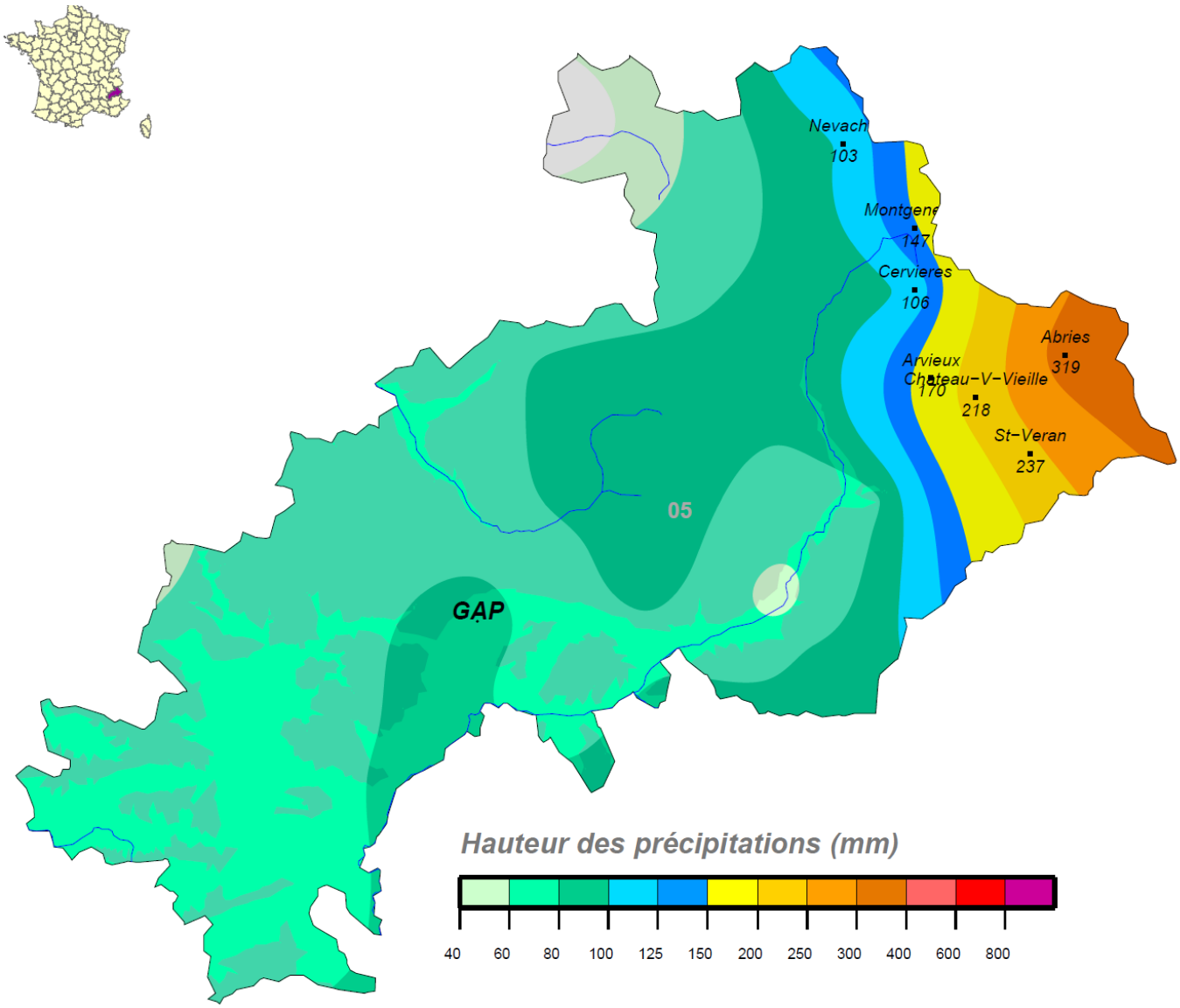


Figure 10 : Cumul de précipitations en juin 1957 (METEO France 2011).

Le graphique suivant indique les précipitations du mois de juin 1957 :

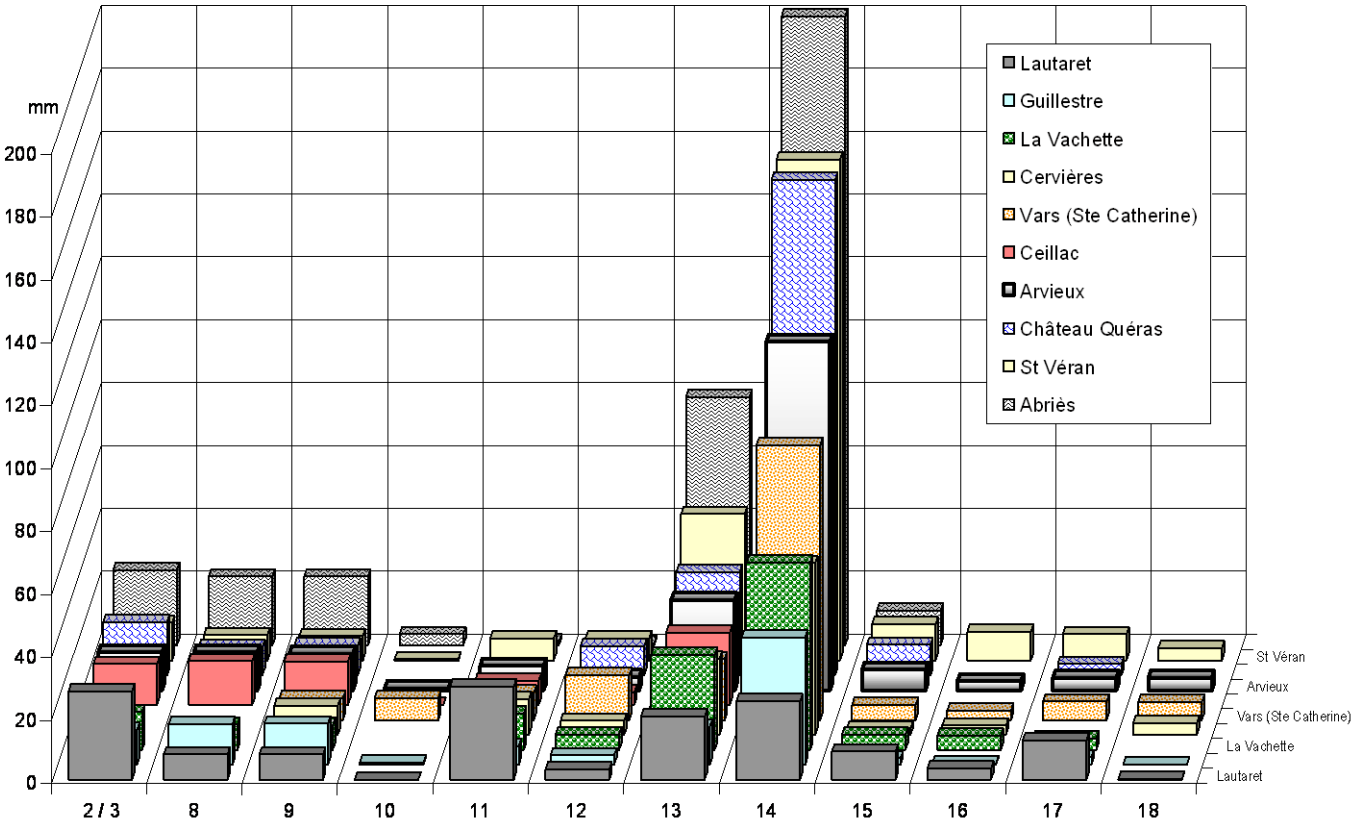


Figure 11 : Précipitations relevées début juin 1957.

Ce graphique conduit aux remarques suivantes :

- Au début juin, les précipitations ont été les plus fortes sur les postes éloignés de la ligne frontalière (comme le Lautaret par exemple). Elles sont cependant loin d'être négligeables sur les autres postes, en particulier ceux du Queyras (Abriès, St Véran). Dans l'ensemble, ces précipitations sont peu structurées spatialement.
- La situation est fondamentalement différente pour la journée du 14 : de façon très nette, plus on se rapproche de la frontière, plus les précipitations sont importantes. Les gradients sont très élevés : Les précipitations sont près de 2 fois plus faibles à Vars qu'à St Véran. Elles sont extrêmes sur Abriès. Cet aspect est particulièrement visible sur la carte des précipitations.
- Les pluies à Cervières sont particulièrement faibles (54 mm seulement le 14). Ces valeurs médiocres contrastent fortement avec les dégâts causés par la Cerveyrette. On conclut à des précipitations très importantes sur le haut bassin versant.
- Les précipitations après le 14 juin sont - partout - médiocres.

Il est intéressant de mettre en évidence la préparation des terrains avant le 14 juin. Ainsi, la figure suivante indique les cumuls de précipitation avant cet épisode :

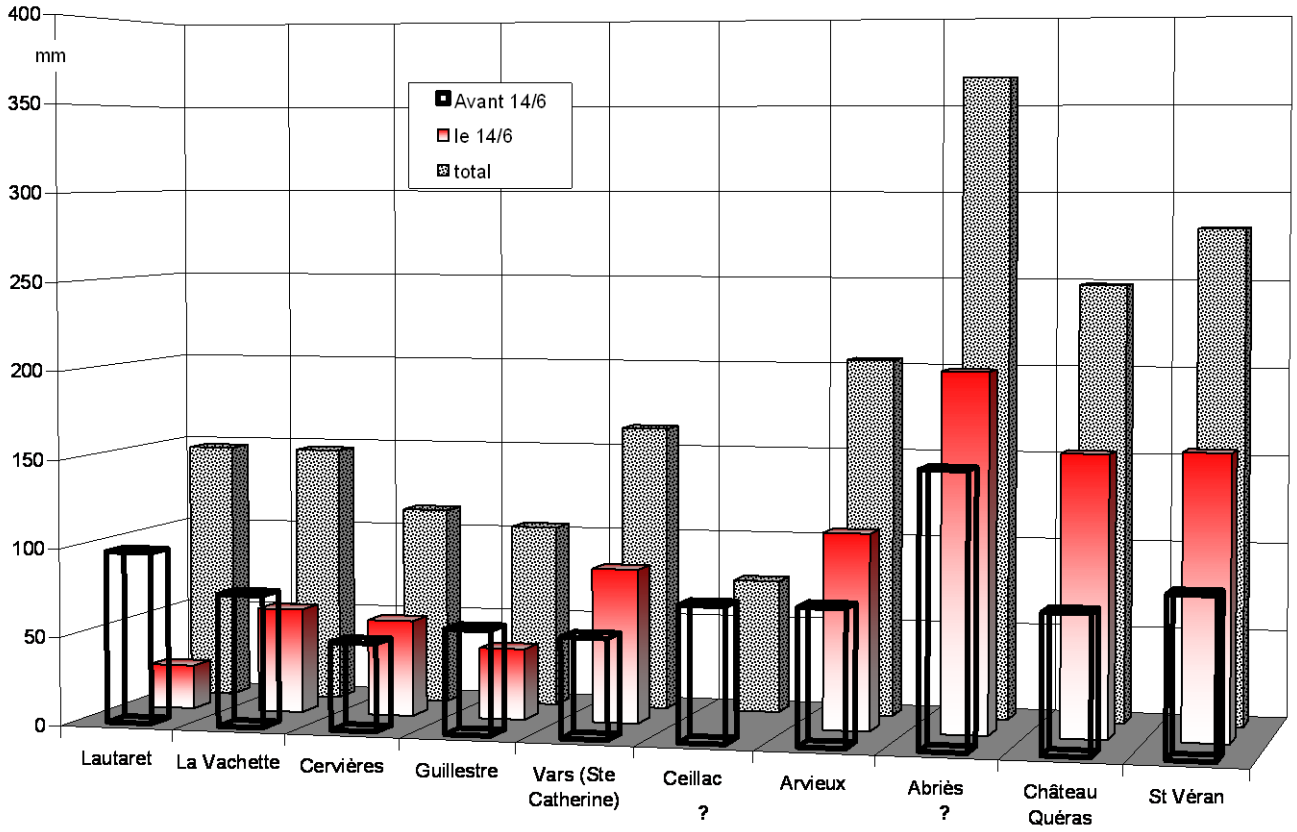


Figure 12 : Cumul de précipitations en juin 57.

Ce graphique montre clairement le rôle de la préparation des terrains avant le 14 juin. En moyenne, les précipitations ont atteint 73 mm. Il convient de noter que tous les postes ont été arrosés (le minimum étant relevé à Cervières avec - quand même - 50 mm). Les écarts sont donc très faibles. Rappelons que le mois de mai avait été particulièrement humide.

C'est la journée du 14 qui a fait la différence entre le Queyras frontalier (St Véran, Château Queyras, Abriès et vraisemblablement Ceillac) avec des précipitations journalières supérieures à 150 mm et sa périphérie (Arvieux, Vars).

2.2.3. Crue de Juin 2000

Il s'agit de la première forte crue depuis celle de 1957. Le tableau ci-dessous indique les précipitations relevées lors de cet épisode qui s'est étendu sur environ 4 jours :

Station	Alt.	10/06	11/06	12/06	13/06	14/06	Cumul 4 jours
Abriès	1560	90	61	89	28	8	268
Saint Véran	2010	51	49	87	13	2	200
Château Queyras	1355	25	36	49	12	18	122
Arvieux	1675	21	23	31	9	1	84
Ceillac	1665	23	28	30	14	1	95
Saint Paul /Ubaye	1900	58	30	24	9	5	121
Montgenèvre	1850	27	25	23	9	4	84

Ce tableau montre que les précipitions ont été particulièrement élevées sur les stations d'Abriès et St Véran mais qu'elles ont été d'autant plus médiocres sur le reste du bassin versant que l'on s'éloigne de la crête frontalière. Les précipitations sur Arvieux et Ceillac ont été trop modestes pour former une crue. Le nord du département a été totalement épargné.

La figure suivante montre le cumul de précipitation du 10 juin à 6 h au 13 juin à 6 h sur l'ensemble des Hautes-Alpes et avec un zoom sur le Queyras :

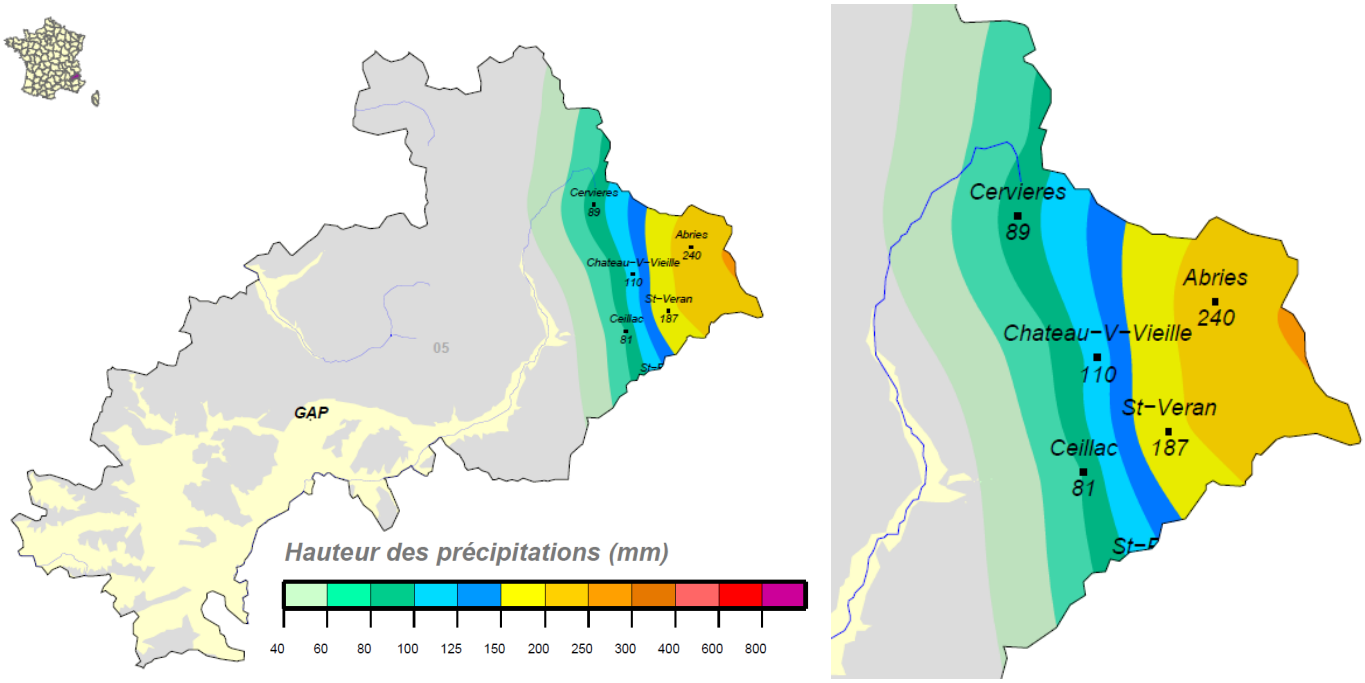


Figure 13 : Cumul de précipitations en juin 2000 (METEO France 2011).

La figure suivante regroupe les pluies horaires à Abriès durant l'épisode :

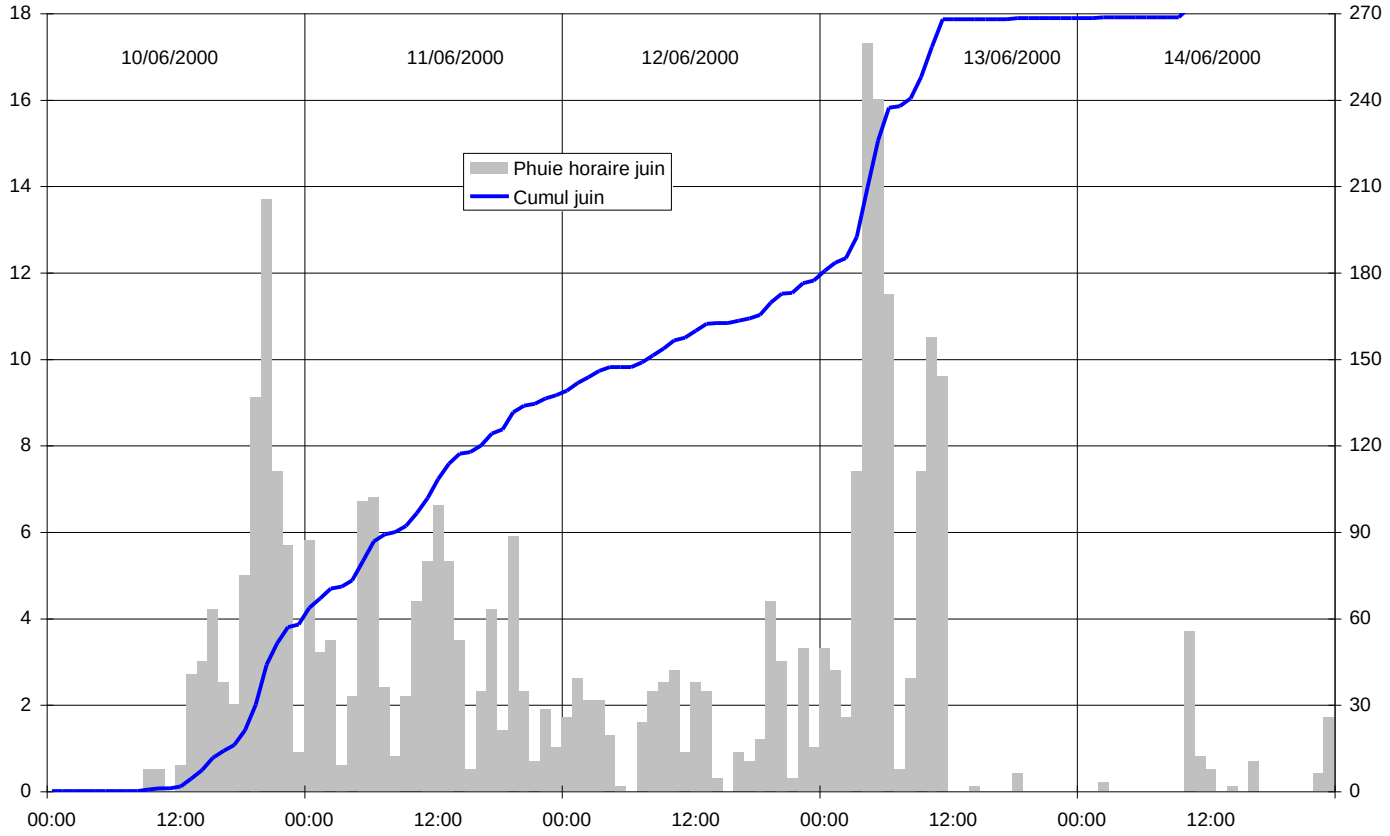


Figure 14 : Précipitations relevées à Abriès.

Ces observations conduisent aux remarques suivantes :

- Les intensités de pluies à Abriès durant la crue ne sont pas extrêmes, le maximum correspondant à 17.3 mm/h. soit une période de retour inférieure à 10 ans. Cette relative faiblesse des pluies sur de faibles pas de temps explique sans doute l'absence de forte crue sur les petits torrents.
- Comme en 1957, le maximum des intensités de précipitation est concentré en fin de crue, lorsque les terrains sont saturés.
- Entre les deux épisodes intenses, les précipitations sont restées soutenues durant deux jours, avec un cumul de précipitation de l'ordre de 100 mm.
- L'ensemble de l'épisode dure quatre jours, ce qui explique un cumul de précipitations très important (268 mm en 4 jours).

Les observations de terrain réalisées durant la crue (et notamment une reconnaissance aérienne) ont montré que les précipitations avaient été très irrégulièrement réparties dans l'espace :

- La haute vallée (au-dessus de la Roche Écroulée) a été très sollicitée. Mais de petits torrents affluents du Guil à la Roche Écroulée n'ont pas subi de crue, les précipitations étant localement plus faibles.

- Dans la vallée du Bouchet, le vallon de la Montette a été très arrosé au contraire des bassins versants voisins du Malrif et de Valpréveyre. Cette répartition est d'autant plus surprenante que le Vallon de Valpréveyre est à proximité immédiate de la crête frontalière.
- Le secteur autour du Grand Queyras a subit de très fortes précipitations. Les torrents suivants ont alors connu des crues (grossièrement dans l'ordre d'intensité décroissante) :
  - Ravin de Maloqueste en face de l'Echalp ainsi que plusieurs autres petits torrents sur le même versant,
  - Peynin,
  - Torrent de Ségure,
  - Aigue Blanche.
- Au-delà d'Abriès, les précipitations semblent avoir été assez faibles.

Cette analyse montre que la répartition des précipitations est très irrégulière dans l'espace et dans le temps (comme les pluies à Abriès le montrent), la vue spatiale des précipitations présentée précédemment étant très lissée. De plus, il est très probable que les précipitations sur les versants dans les hauts bassins aient largement dépassé celles qui ont pu être enregistrées à Abriès et St Véran. Hélas, aucune mesure n'était disponible à l'époque sur le site de Ristolas.

La comparaison des deux postes est d'ailleurs très instructive. En effet, il est très vraisemblable qu'il a beaucoup plus plu au-dessus d'Abriès qu'à St Véran, la crue du Guil à Abriès étant nettement plus forte que celle de l'Aigue Agnelle.

Pourtant, la différence de précipitation est assez faible (les pluies d'Abriès ne sont que 34 % supérieures). Il est donc probable que le poste de St Véran soit plus exposé par rapport aux précipitations moyennes dans le bassin versant :

- Le poste d'Abriès, dans la vallée, est relativement peu exposé et il est probable que les précipitations soient supérieures aux alentours (surtout vers l'Est).
- Le poste de St Véran, au contraire, est situé sur le versant Est de la vallée et les précipitations recueillies sont donc plus représentatives du bassin versant.

Cette analyse montre que plusieurs phénomènes se conjuguent pour expliquer les précipitations :

1. Une tendance générale liée au phénomène de retour d'Est avec une décroissance très nette en allant vers l'Ouest.
2. Une évolution systématique liée à l'exposition et à la situation par rapport au relief. Les versants paraissant alors plus arrosés que les fonds de vallée.
3. Une distribution aléatoire d'une crue à l'autre. Elle explique par exemple que le vallon de Valpréveyre ait été peu arrosé durant la crue, alors que celui de la Montette tout proche a recueilli des précipitations exceptionnelles.

2.2.4. Crue d'Octobre 2000

Le tableau suivant indique les précipitations relevées dans le Queyras[2] lors de cette crue :

Station	Alt.	11-oct	12-oct	13-oct	14-oct	15-oct	Cumul
Abriès	1560	34.3	10	11	82.3	82	219.6
St Véran	2010	36.9	10.8	11.8	88.5	33	181
Ceillac	1665	34	15	3	33	32	117
Arvieux	1675	44	14	3	41	48	150

Cette crue, comme celle de juin, montre que les postes d'Abriès, et dans une moindre mesure de St Véran, sont particulièrement arrosés. Une fois de plus, les précipitations sur Ceillac et Arvieux ont été très modérées, ne dépassant pas – respectivement – 34 et 48 mm/jour.

Dans l'ensemble, cette crue présente des caractéristiques très proches de celle de juin, avec des précipitations un peu plus faibles.

La figure suivante indique les précipitations horaires relevées à Abriès durant cette crue :

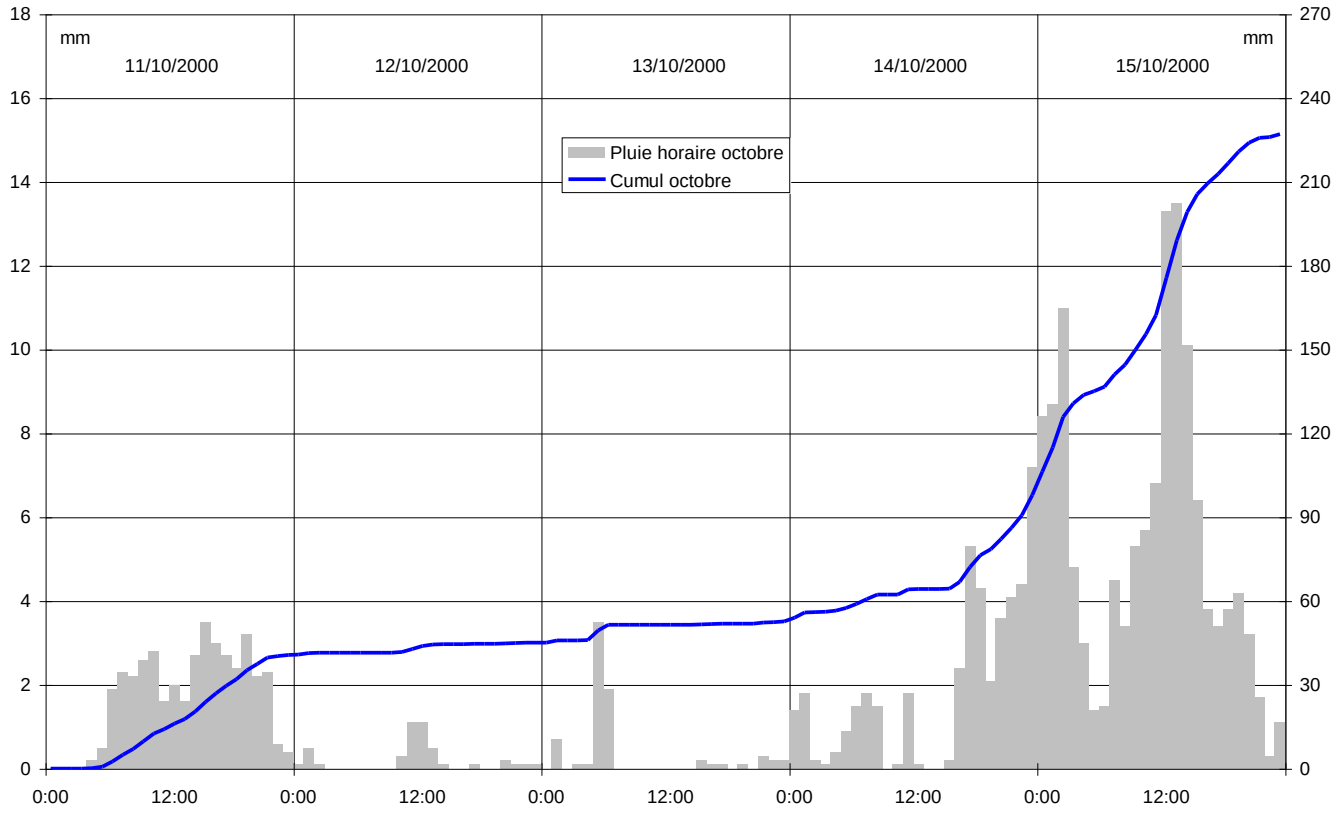


Figure 15 : Précipitations horaires à Abriès en octobre 2000.

[2] Pour la station de St Véran, seul le cumul des précipitations du 11 au 14 octobre est connu. Il a été réparti proportionnellement aux précipitations sur Abriès relevés durant cette période.

Ce graphique met en évidence deux phases :

- Une préparation des terrains le 11 octobre avec un cumul de 34 mm.
- Une période intense en fin d'épisode constituée de deux pics. Les précipitations horaires ont été relativement modérées (moins de 14 mm) mais le cumul sur 24 heures glissantes atteint 142.6 mm ! Cette valeur est bien supérieure aux cumuls journaliers qui fractionnent l'épisode intense.

Comme précédemment, le graphique suivant montre les précipitations du 10 au 16 octobre à 6 h :

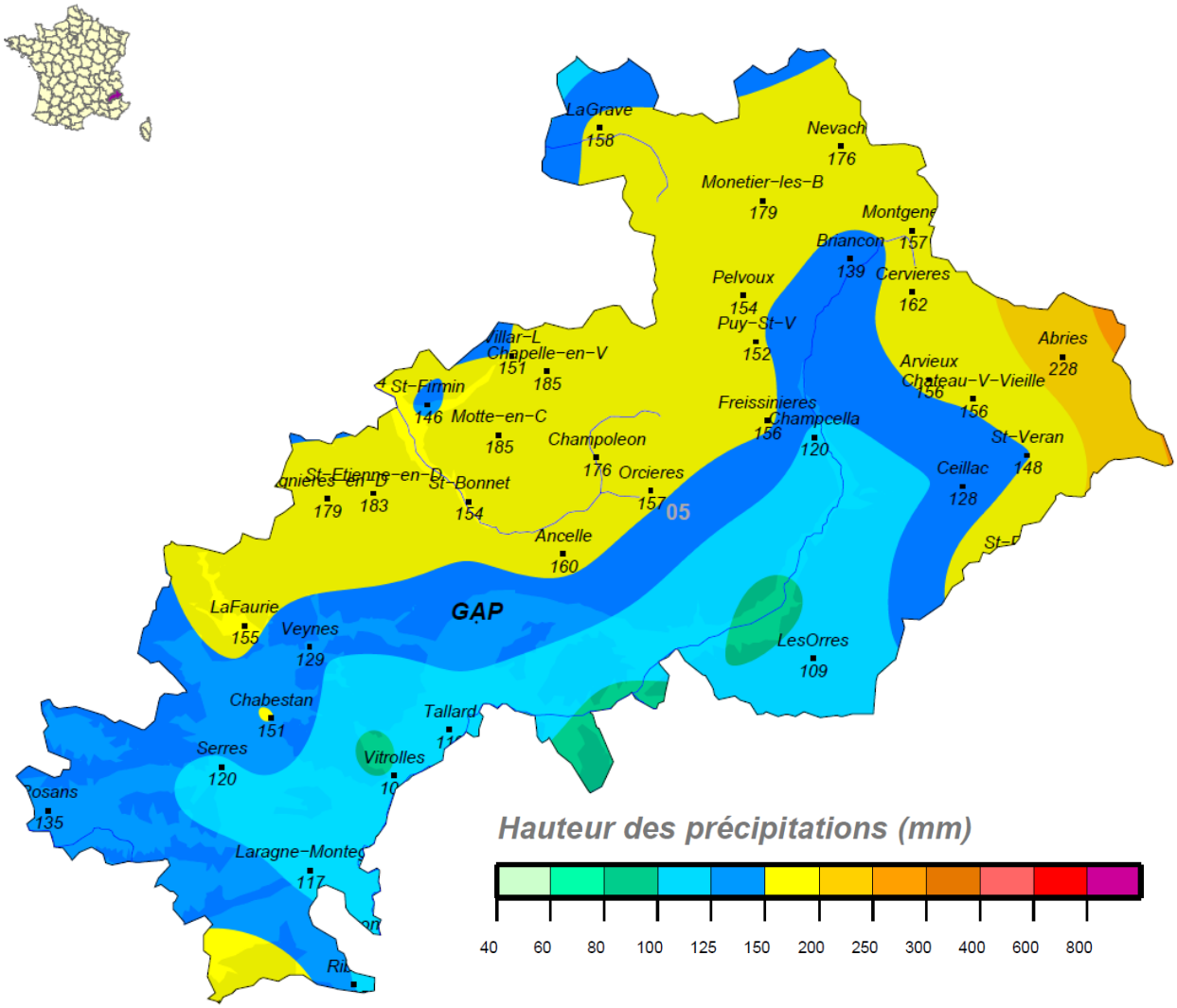


Figure 16 : Cumul de précipitations en octobre 2000 (METEO France 2011).

Cette carte montre que l'effet de retour d'est est ici beaucoup moins marqué mais que l'effet du relief est prépondérant. Les observations de terrain montrent que les précipitations ont été très inégalement réparties :

- Une fois de plus, c'est le haut bassin versant qui a été le plus arrosé.
- Les précipitations ont été relativement modérées dans le vallon de la Montette. Par contre, elles ont été très importantes dans le vallon de Valpréveyre, au contraire de ce qui avait été observé lors de la crue de juin. Les très forts débits dans le vallon de Valpréveyre expliquent pour l'essentiel la crue du Bouchet jusqu'à son confluent avec le Guil à Abriès.

2.2.5. Crue de Juillet 2002

Cette crue concerne essentiellement - une fois encore - la partie amont du bassin versant (amont d'Abriès). Les relevés de précipitations durant cet épisode sont les suivants :

Station	Alt.	13-juil	14-juil	15-juil	16-juil	Cumul
Abriès	1560	9	51	35	6	101
St Véran	2010	12.1	61.2	30.8	7.7	111.8
Ceillac	1665	19.4	35.4	23.4	2.2	80.4
Château Queyras	1355	0	10	33.7	0	43.7
Arvieux	1675	9	19.8	11.2	1.4	41.4

Le graphique suivant correspond à ces valeurs :

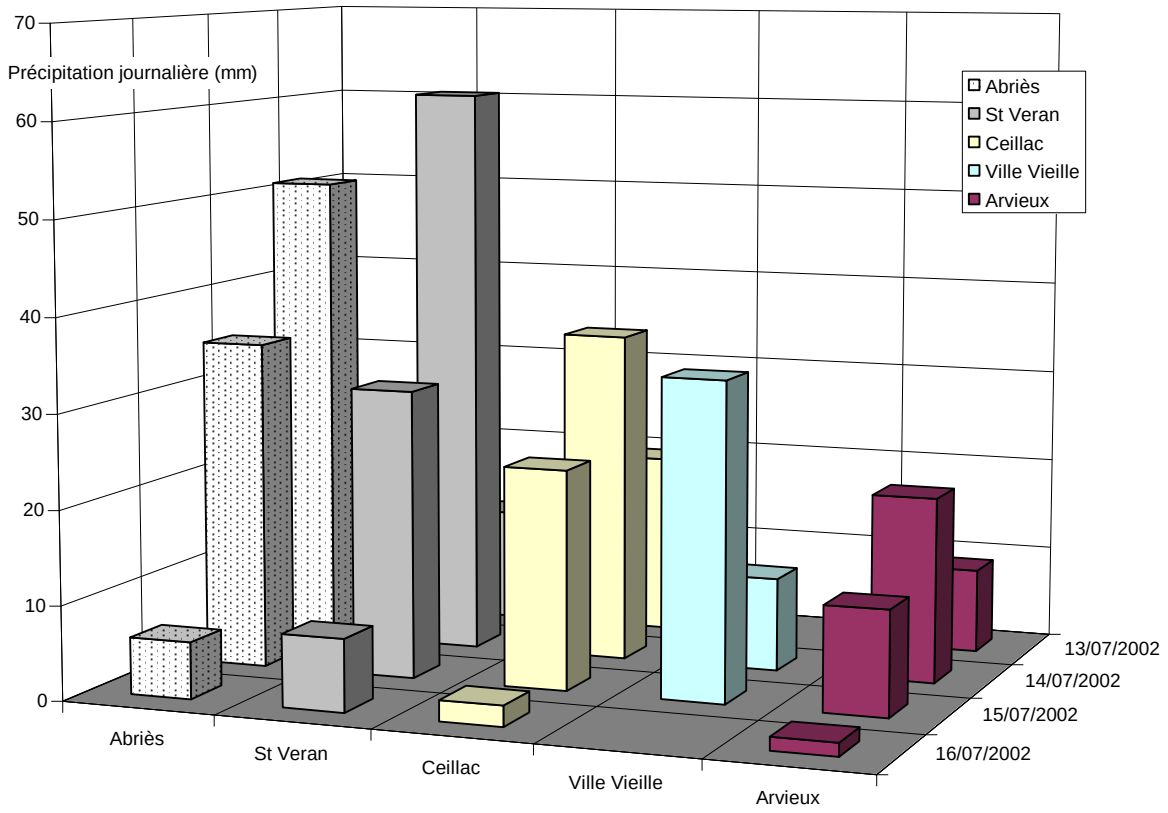


Figure 17 : Précipitations de Juillet 2002.

C'est évidemment les stations les plus amont qui ont été les plus arrosées. Cependant, on remarque là encore des précipitations très fortes sur St Véran alors que l'Aigue Blanche n'a pas connue de crue remarquable.

Cette caractéristique est d'abord liée à la situation très exposée du poste de mesure de St Véran et à la bonne perméabilité du bassin versant.

La zone de plus forte précipitation (commune de Ristolas) échappe à toute mesure, ce qui explique le contraste entre les pluies relativement modérées et une crue localement forte. Ainsi, les périodes de retour des précipitations mesurées sont très modérées :

- 2 à 3 ans sur Abriès,
- 4 à 5 ans sur St Véran.
- Moins de 2 ans sur les autres postes.

Ainsi, la crue de 2002 n'a été forte qu'en amont de Ristolas où elle a mis en évidence les points faibles. Elle a été très modérée en aval, y compris dans la vallée des Aigue.

2.2.6. Crue de mai 2008

La figure suivante montre la répartition des précipitations lors de cet épisode avec le cumul de précipitations en 7 jours, du 24 au 31 mai :

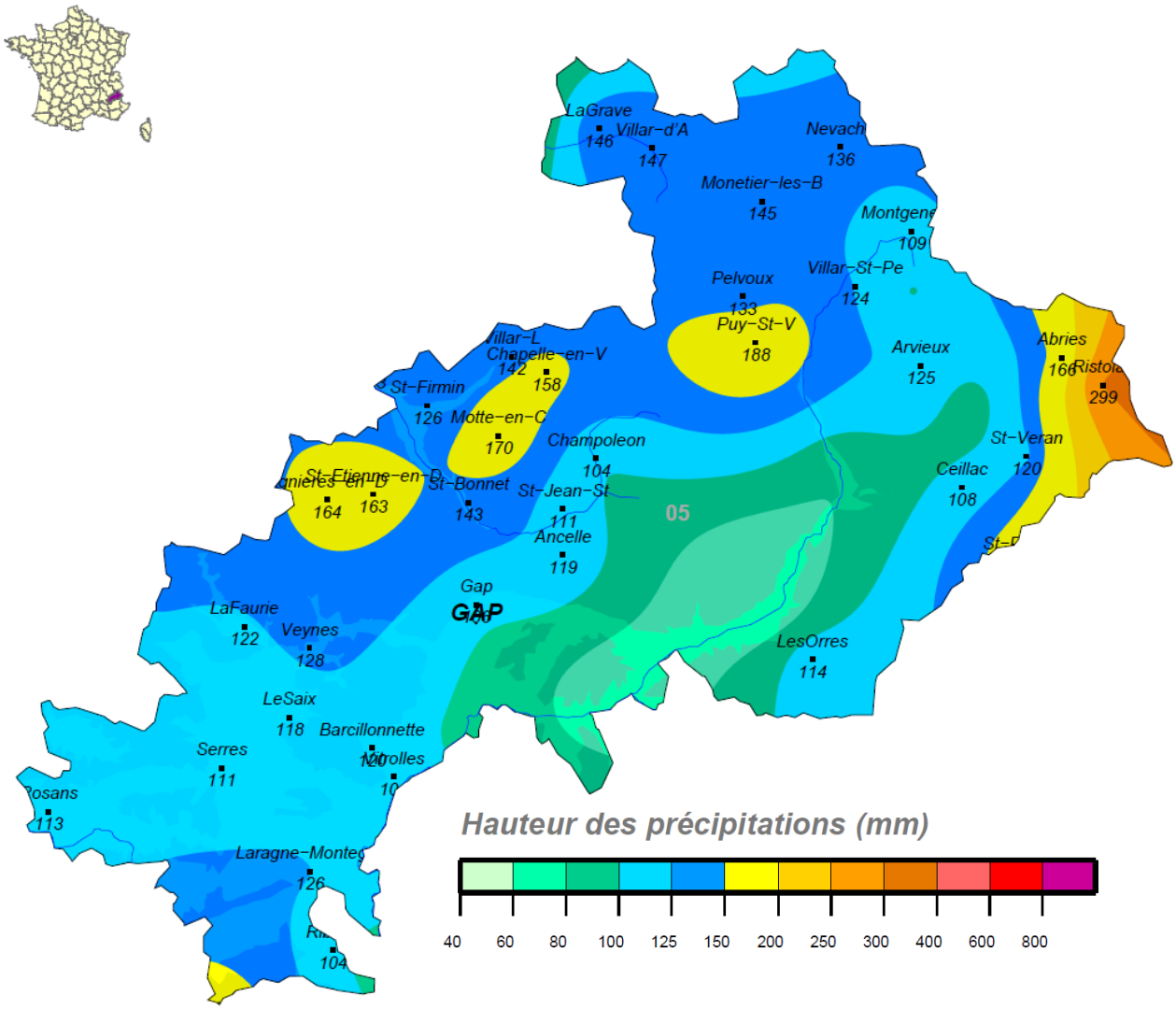


Figure 18 : Cumul de précipitations en octobre 2000 (METEO France 2011).

Les précipitations relevées lors de cet épisode sont les suivantes :

Poste	24-mai	25-mai	26-mai	27-mai	28-mai	29-mai	30-mai	Cumul
Abriès	**6,2**	**13,8**	**12,3**	**16,5**	**17,7**	**96,6**	**3,0**	**166,1**
Arvieux la Chalp	6.5	29.0	10.9	6.7	10.4	48.4	0.9	112.5
Arvieux Brunissard	9.4	32.4	13.6	9.4	12.2	46.2	1.4	124.6
Agnières-en- Dévoluy	7,7	60,4	30,1	25,7	16,2	10,1	13,5	163,7
Ceillac	8.0	24.8	13.1	11.5	10.1	37.3	2.9	107.7
Chapelle-en-Valgaudemar	31,2	59,2	37,2	2,2	14,3	8,1	5,8	158,0
Motte-Molines	34,8	80,5	20,8	1,1	12,6	11,2	9,1	170,1
Puy-St-Vincent	20,2	66,0	40,0	11,3	10,5	36,0	4,0	188,0
Ristolas	**6,2**	**17,0**	**15,0**	**36,7**	**32,7**	**185,9**	**5,6**	**229,1**
St-Etienne-en-Dévoluy	10,5	73,6	22,5	20,4	12,7	12,9	10,3	162,9
St Paul sur Ubaye	**11.3**	**32.8**	**16.6**	**29.9**	**24.4**	**56.0**	**2.0**	**173.0**
St Véran	3.3	20.0	14.6	20.5	19.1	41.7	1.2	120.4

Dans le Queyras, ces précipitations ne présentent pas de caractère exceptionnel avec une pluie journalière de 186 mm à Ristolas et de 97 mm à Abriès, soit une période de retour approximativement décennale. Notons que les valeurs très élevées sur Ristolas montrent la forte variation des précipitations et sont particulièrement intéressantes. Malheureusement, cette station est aujourd'hui encore trop récente pour permettre un traitement statistique.

Météo France présente une analyse de la chronologie des précipitations particulièrement intéressante :

> *Sur les Hautes-Alpes, les pluies qui ont débuté le 24 se sont généralisées l'après-midi en devenant soutenues puis se sont poursuivies le 25 et en matinée du 26.*
> *Une accalmie temporaire s'est produite en mi-journée avant la reprise d'une forte instabilité avec des averses orageuses le soir.*
> *Les zones à l'ouest de la Durance (massifs du Pelvoux, du Champsaur, du Dévoluy et du Thabor) ont été plus particulièrement concernées.*
> *Puis un phénomène de «retour d'est» s'est mis en place durant la nuit du 28 au 29 et a perduré jusqu'au 30 en début de matinée. Les nuages venus d'Italie poussés par un vent de sud-est, puis d'est assez fort en altitude, ont débordé de la chaîne frontalière et affecté principalement les massifs à l'est de la Durance et tout particulièrement le secteur du Haut-Guil et du Viso.*
> *Sur l'épisode, la lame d'eau sur le Queyras a été comprise entre 50 mm sur l'ouest et jusqu'à plus de 220 mm à l'extrême est, Ristolas en particulier avec 185,9 mm en 24 h pour la seule journée du 29.*

D'après les éléments transmis par EDF, la durée importante de l'épisode et son extension sur tout le bassin versant de la haute Durance ont conduit - à Serre Ponçon - à un épisode dont le débit de

pointe présenterait une période de retour de l'ordre de 15 ans alors que la période de retour du volume de la crue atteignait 50 à 100 ans.

Dans le Queyras, cette crue serait à peine décennale, au moins, en restant bien inférieure à celles de juin 1957 et juin 2000. Selon les informations transmises par EDF au service RTM, le débit maximum instantané à la Maison du Roy serait de 130 m^3/s, ce qui est très inférieur au débit décennal estimé à 200 m^3/s. Cependant, la crue était déjà presque totalement formée à Aiguilles. Ainsi, le RTM retient les débits suivants qui semblent tout à fait cohérents avec la répartition des précipitations. :

- 100 m^3/s à Aiguilles.
- 115 m^3/s à Château Queyras.

D'autre part, le torrent des Sibières, à Vars, a connu une forte crue avec des dégâts au niveau des bâtiments de la station.

2.2.7. Crue de juin 2011

La crue de juin 2011 ne présente pas de caractère exceptionnel à l'échelle du Queyras. Par contre, elle illustre l'exposition remarquable de la commune de Ristolas aux fortes précipitations. La figure suivante montre la répartition très classique de ce type d'épisode concentré dans la haute vallée du Guil alors que les précipitations sont insignifiantes en dehors de la crête frontalière :

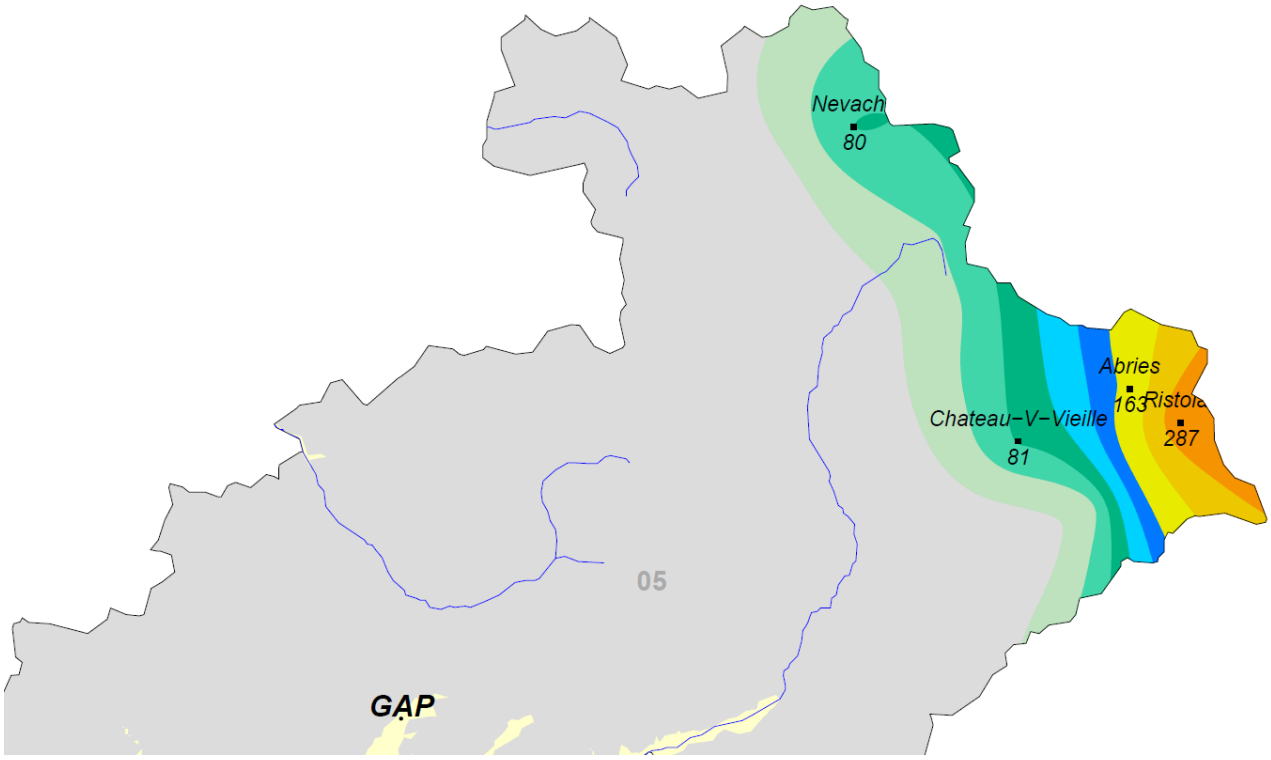


Figure 19 : Cumul de précipitations en juin 2011 (METEO France 2011).

Le graphique suivant de Météo France montre la répartition des précipitations à Ristolas :

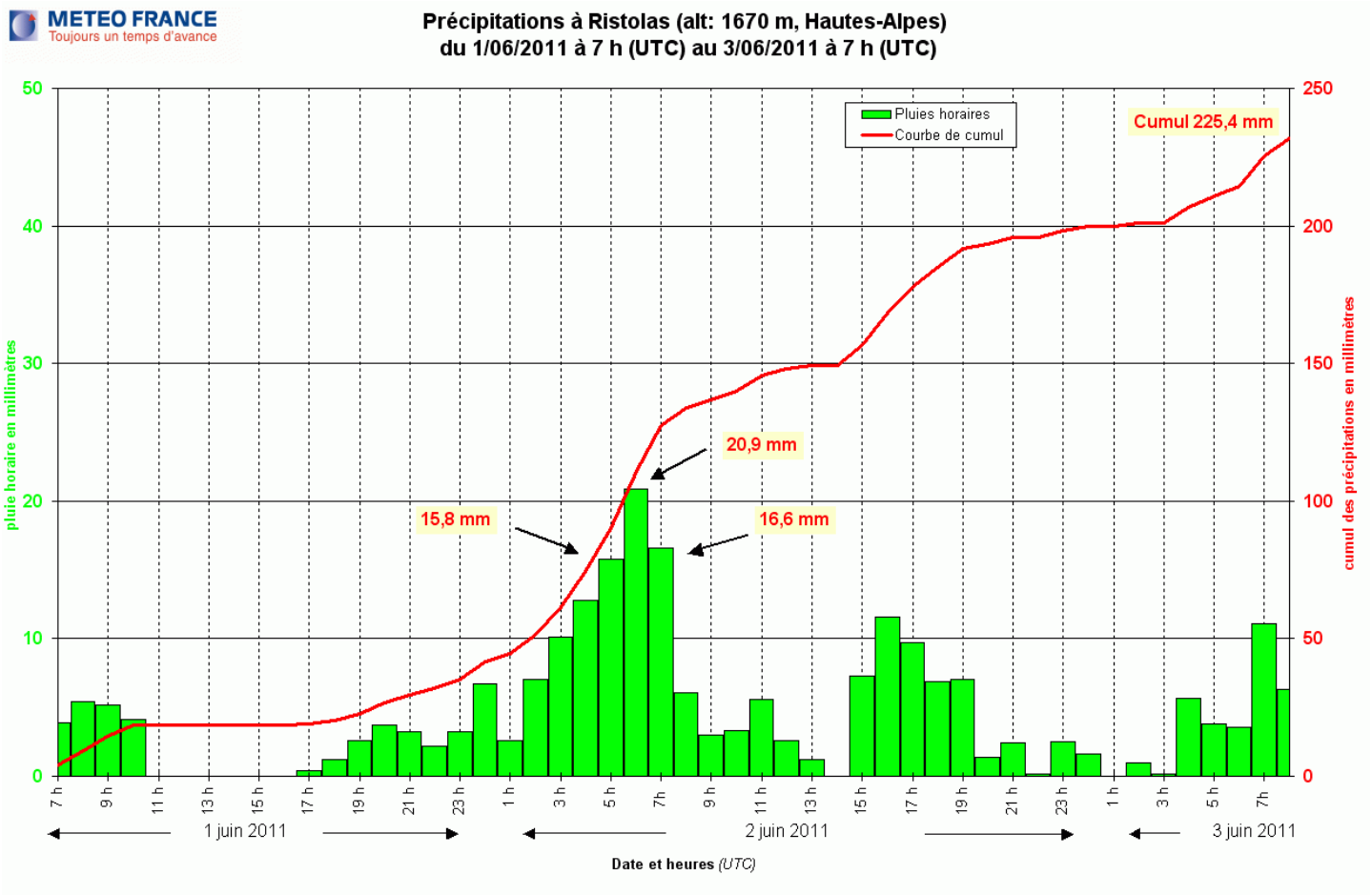


Figure 20 : Pluies à Ristolas en juin 2011.

2.2.8. Comparaison des crues

Chaque crue présente des caractéristiques spécifiques qui montrent qu'il ne faut pas retenir pour les aménagements un seul type de phénomène, mais plutôt une palette de scénarios. Il est cependant possible de dégager des traits communs aux différentes crues :

- Toutes les crues présentent un fort gradient Est –Ouest. Il semblerait que, plus l'épisode est marqué, plus son extension géographique est étendue. Ainsi, la crue de juin 1957 a atteint la vallée des Aigue et Ceillac (et même Vars), alors que les précipitations d'octobre 2000 sont restées – pour l'essentiel – limitées à l'amont d'Abriès. Enfin, la crue de 2002 – la plus faible – est aussi la moins étendue puisque même le poste d'Abriès est relativement épargné, comme en 2011.
- Les épisodes présentent tous une durée totale de l'ordre de 4 ou 5 jours avec une journée particulièrement intense. La figure suivante indique les cumuls de précipitations sur 5 jours pour les cinq crues connues :

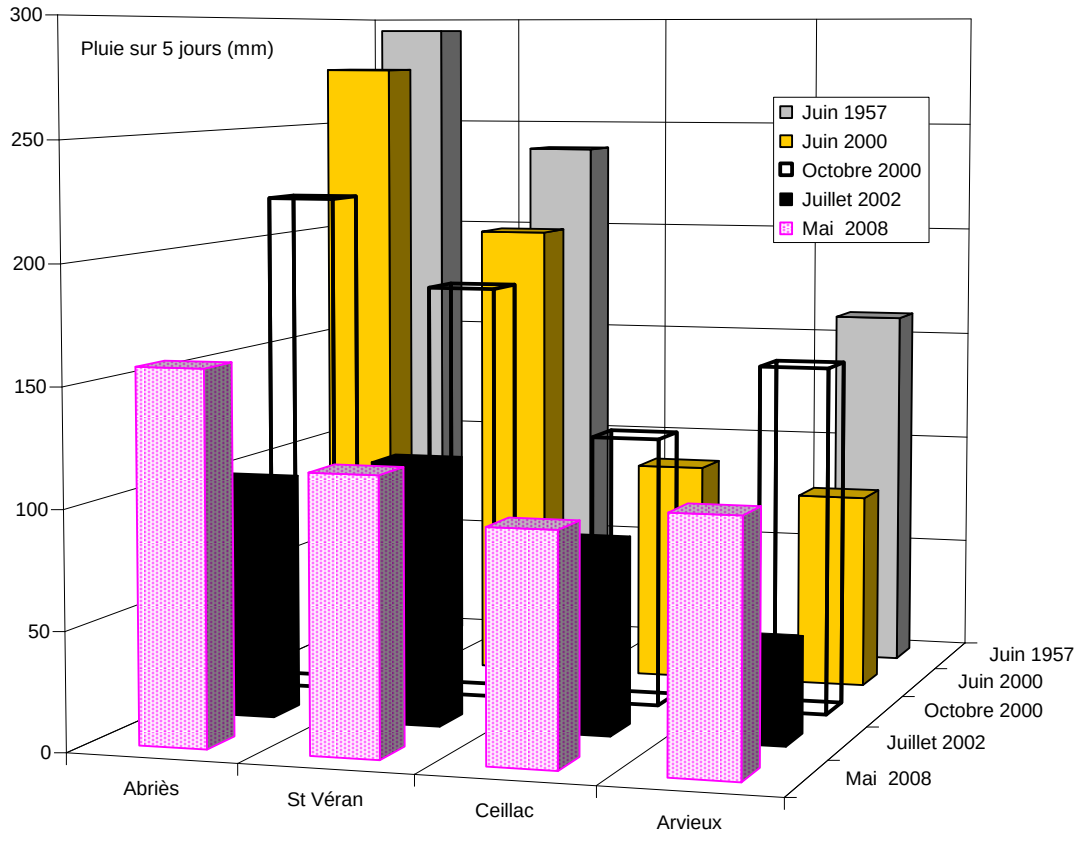


Figure 21 : Cumul de précipitations sur 5 jours.

Les cumuls de précipitations sont très élevés et dépassent, pour les trois fortes crues, 270 mm à Abriès, et vraisemblablement nettement plus dans les vallées frontalières. Ainsi, la seule mesure disponible à Ristolas, lors de la crue de mai 2008 - pourtant peu intense - est de 287 mm !

Pour la crue de 1957, le cumul de précipitation sur l'ensemble de l'épisode (7 jours) est un peu plus fort, surtout à Abriès où les 320 mm sont atteints.

Cette figure montre que la crue de 1957 a partout été la plus forte, et qu'elle a connu une extension importante, les précipitations sur Ceillac n'étant pas connues mais probablement très

importantes. La crue d'octobre 2000 ne dépasse que celle de 2002, mais elle a conduit à des précipitations un peu plus fortes dans la partie Ouest du Queyras. La crue de mai 2008 présente une forte homogénéité des pluies - sauf dans le haut Guil - déjà mises en évidence.

- L'analyse des pluies journalières conduit à des résultats différents :

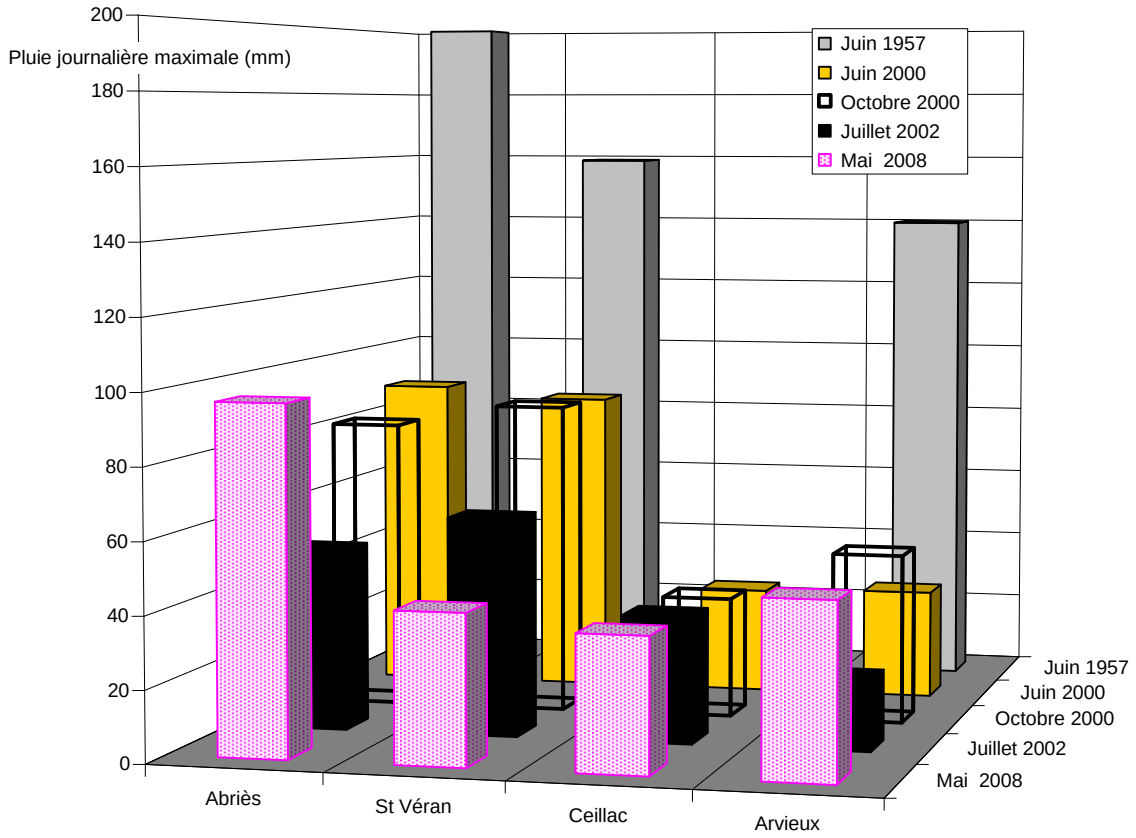


Figure 22 : Précipitations journalières maximum.

La crue de 1957 se distingue nettement des quatre autres. Cela correspond sans doute à des précipitations plus intenses, mais il faut avoir à l'esprit que les périodes de fortes intensités ont été à cheval sur deux jours lors des deux crues de 2000. Avec un pas de temps glissant, les précipitations journalières à Abriès ont été de 109 mm en juin et de 142 mm en octobre. Ces valeurs sont fortes, mais restent bien inférieures aux précipitations de 1957.

La distinction entre les postes proches de la frontière et ceux qui en sont un peu plus éloignés apparaît encore plus nettement que pour les précipitations cumulées sur cinq jours. Notons que le nouveau poste de Ristolas a recueilli une lame d'eau de 186 mm le 29 mai 2008.

Les intensités de pluies sont fortes mais pas extrêmes (pas plus de 35 mm/h en 1957 selon les témoignages). Le graphique suivant permet de comparer les précipitations observées à Abriès pour les deux épisodes de 2000 :

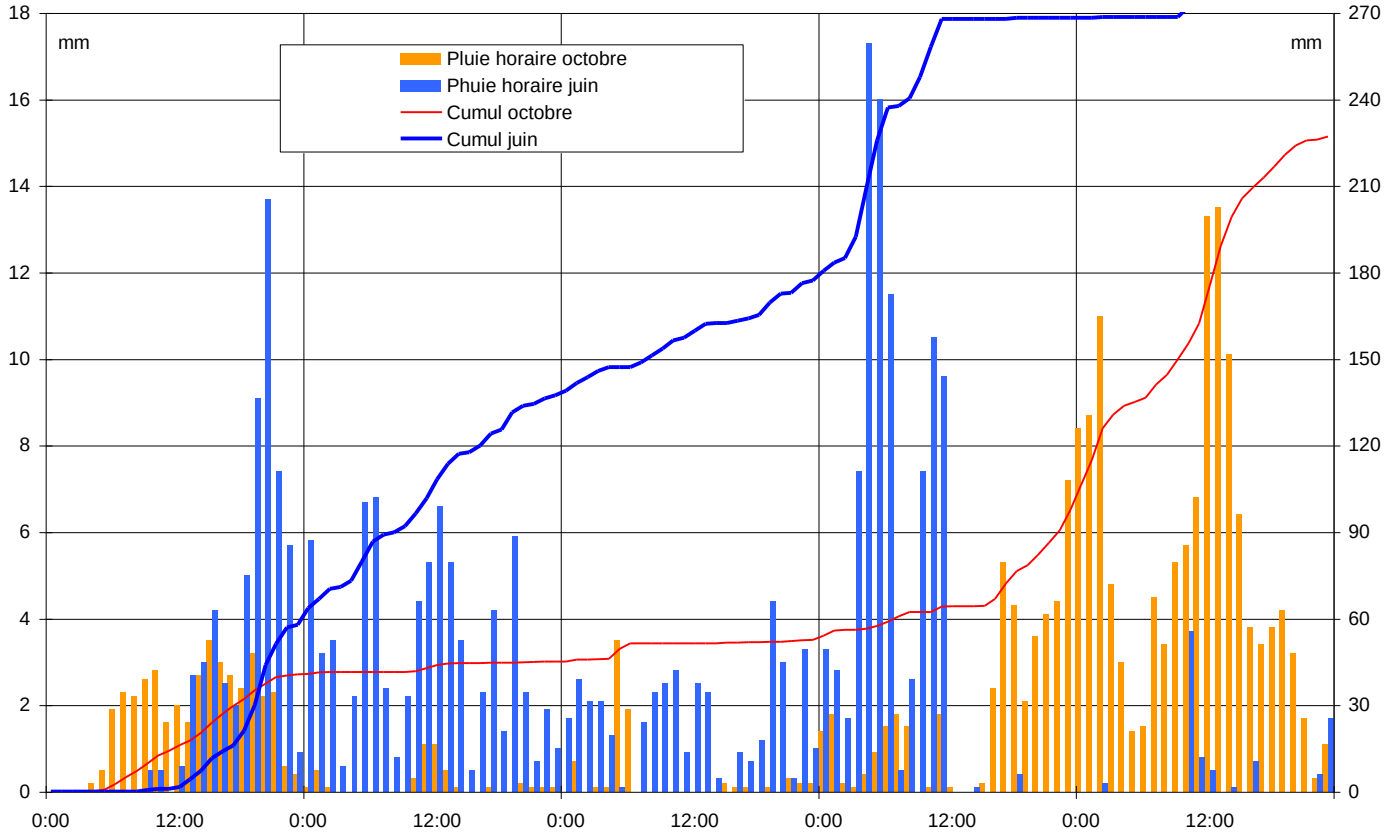


Figure 23 : Hyétogrammes comparés des crues de Juin et Octobre 2000.

Ce graphique montre qu'une intensité de 10 mm/h n'a été que rarement dépassée et que, pour les deux crues, la valeur de 18 mm/h n'a pas été atteinte. Ce résultat explique que les torrents présentant un bassin versant très réduit n'ont pratiquement pas été touchés par la crue (à l'exception du ravin de Maloqueste au début de la crue de juin 2000).

2.3. Étude locale des pluies journalières

Une première étape consiste à ajuster les précipitations extrêmes à une loi de Gumbel. On sait en effet que, de façon très générale, les pluies extrêmes suivent cette loi de probabilité qui s'écrit :

$$P_T = P_{T_0} + g\left[-\ln\left(-\ln\left\{\frac{T-1}{T}\right\}\right) + \ln\left(-\ln\left\{\frac{T_0-1}{T_0}\right\}\right)\right]$$

Avec

P_T	Pluie de période de retour T
P_{T0}	Pluie de période de retour T_0
g	Gradex de la pluie (mm)

La figure suivante indique l'ajustement de Gumbel sur les précipitations journalières :

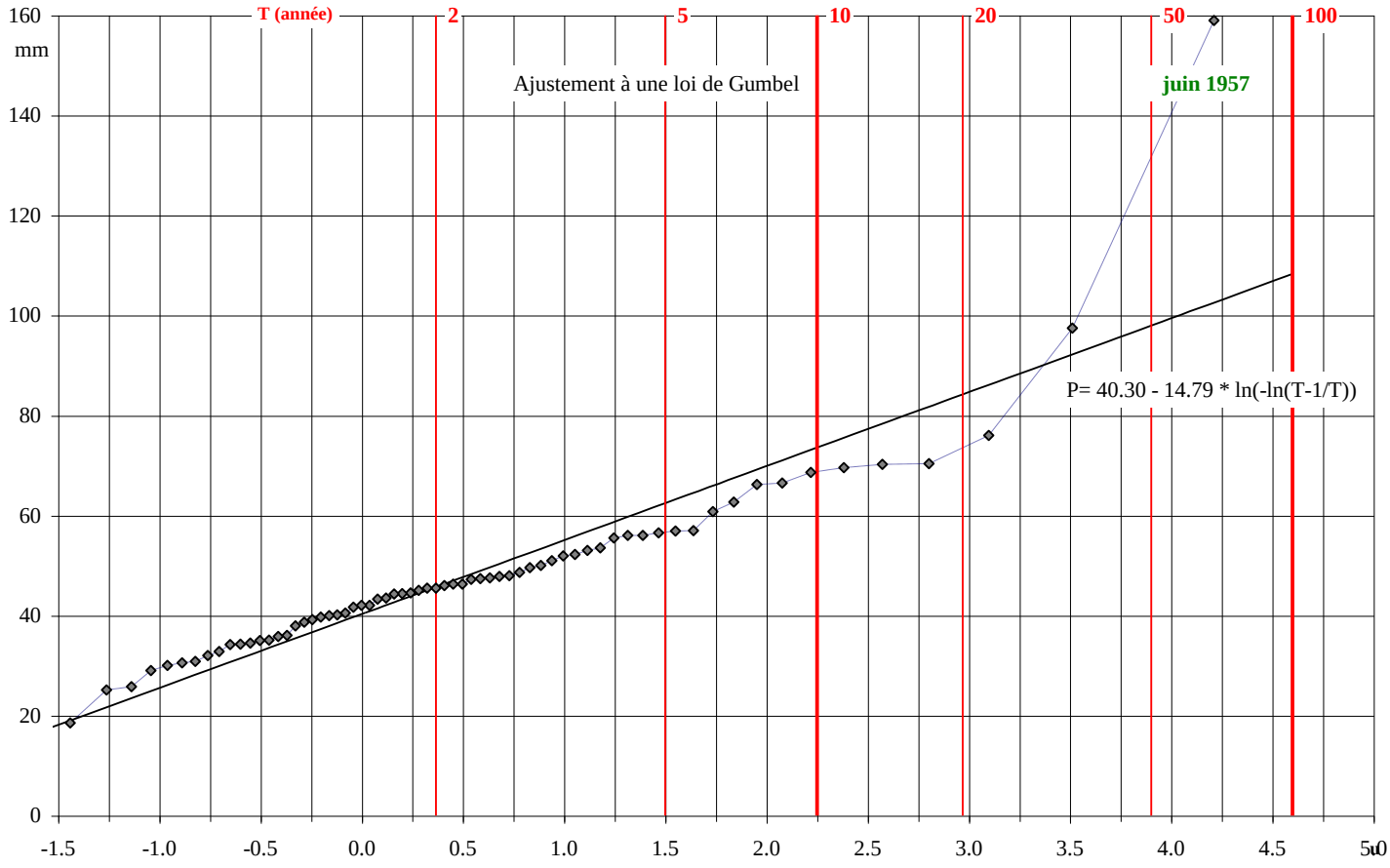


Figure 24 : Précipitations journalières à Ceillac.

Cette figure illustre bien la spécificité du Queyras :

- La plupart des valeurs sont médiocres si l'on fait abstraction de la crue de 1957. A part la crue du 10 juin 1937 (97.5 mm), la plus forte précipitation relevée sur 66 ans est de 76 mm. La pluie décennale expérimentale est de 68 mm, ce qui est faible, surtout pour un poste à cette altitude.
- La pluie de juin 1957 est nettement supérieure aux autres, avec une valeur de 159 mm, soit plus de 2.3 fois la pluie décennale. Si l'on se restreint à l'ajustement ci-dessus, la période de retour d'un tel événement dépasse largement 1000 ans.

Les crues de 2000 n'ont aucune influence sur cette statistique à Ceillac. En effet, les plus fortes précipitations relevées en 2000 correspondent au 23 juillet (probablement un orage), sans aucun rapport avec les deux crues observées cette année là. La hauteur recueillie est alors très médiocre (39 mm). De même, les pluies de 2008 ne paraissent pas assez importantes pour modifier significativement cette approche.

Le traitement du poste d'Abriès permet de prendre en compte les valeurs observées en 2000. La figure suivante indique les observations correspondant aux deux crues de 2000, la précipitation la plus forte correspondant toujours à la crue de 1957 :

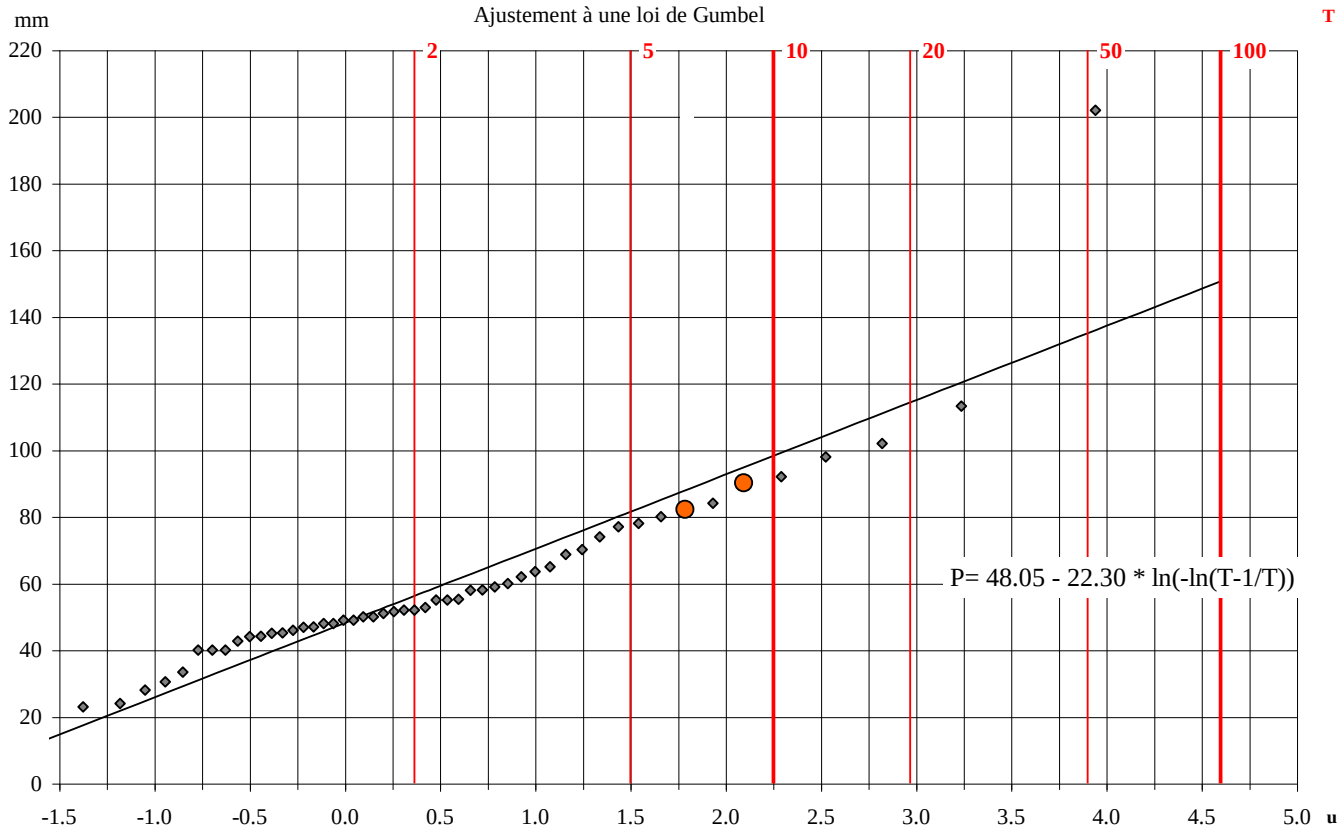


Figure 25 : Ajustement de Gumbel sur Abriès.

Les précipitations journalières observées s'intègrent tout à fait à l'ensemble des valeurs et correspondent à des observations ordinaires, la période de retour étant nettement inférieure à 10 ans.

De même, les précipitations sur St Véran en 2000 ne changent pas l'ajustement de Gumbel de façon significative.

Ce résultat est directement lié au découpage – très artificiel – des précipitations intenses sur deux jours.

Évidemment, l'analyse des données du poste de Ristolas serait particulièrement intéressante, mais ce poste est encore beaucoup trop récent.

Si l'on considère que le rapport entre pluie journalière à pas de temps glissant et pluie journalière à pas de temps fixe est de 114 % en moyenne, on obtient les résultats suivants :

	Pluie journalière (mm) Pas de temps glissant	Pluie journalière (mm) correspondant à un pas de temps fixe	Période de retour (années)
Juin	110	96	9
Octobre	143	125	30

Il apparaît alors que les précipitations journalières au poste d'Abriès ont été beaucoup plus exceptionnelles en octobre qu'en juin, ce qui est cohérent avec la forte crue du Bouchet mais pas avec l'ampleur générale des deux crues.

2.4. Précipitations locales sur plusieurs jours

De la même façon que précédemment, une analyse peut être conduite sur Abriès pour les pluies de 5 jours :

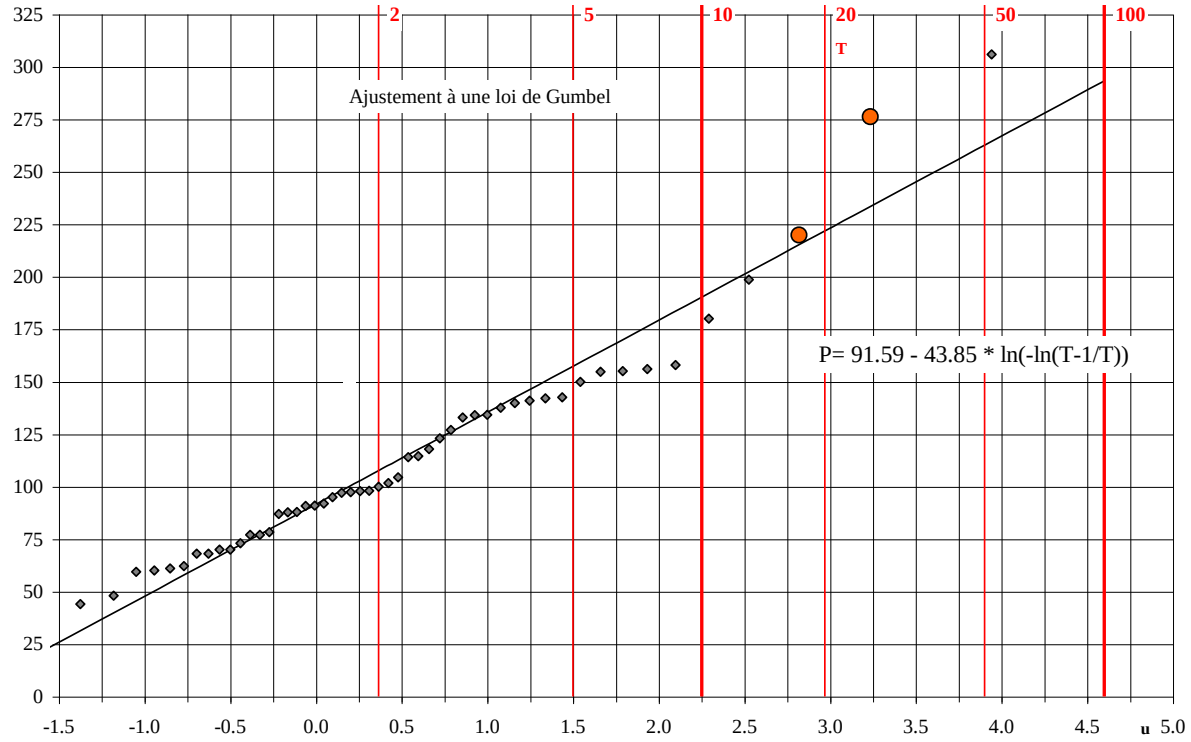


Figure 26 : Précipitations sur 5 jours à Abriès.

Dans ce cas, la "hiérarchie" des crues est bien retrouvée avec une crue de 1957 qui est la plus forte, puis celle de juin 2000 et enfin celle d'octobre. La précipitation de 2008, avec 150 mm parait ici très médiocre.

Si l'on considère que l'ajustement de Gumbel est valide même pour les plus fortes valeurs, la période de retour des précipitations observées est indiquée dans le tableau ci-dessous :

	Pluies de 5 jours à Abriès Période de retour (années)
Juin 1957	133
Juin 2000	65
Octobre 2000	19

Les résultats obtenus sur les pluies de 5 jours sont très différents de ceux correspondant aux pluies journalières.

La figure suivante illustre les ajustements réalisés pour des durées de 1 à 10 jours sur Ceillac en tenant compte - ou non - des précipitations de juin 1957 :

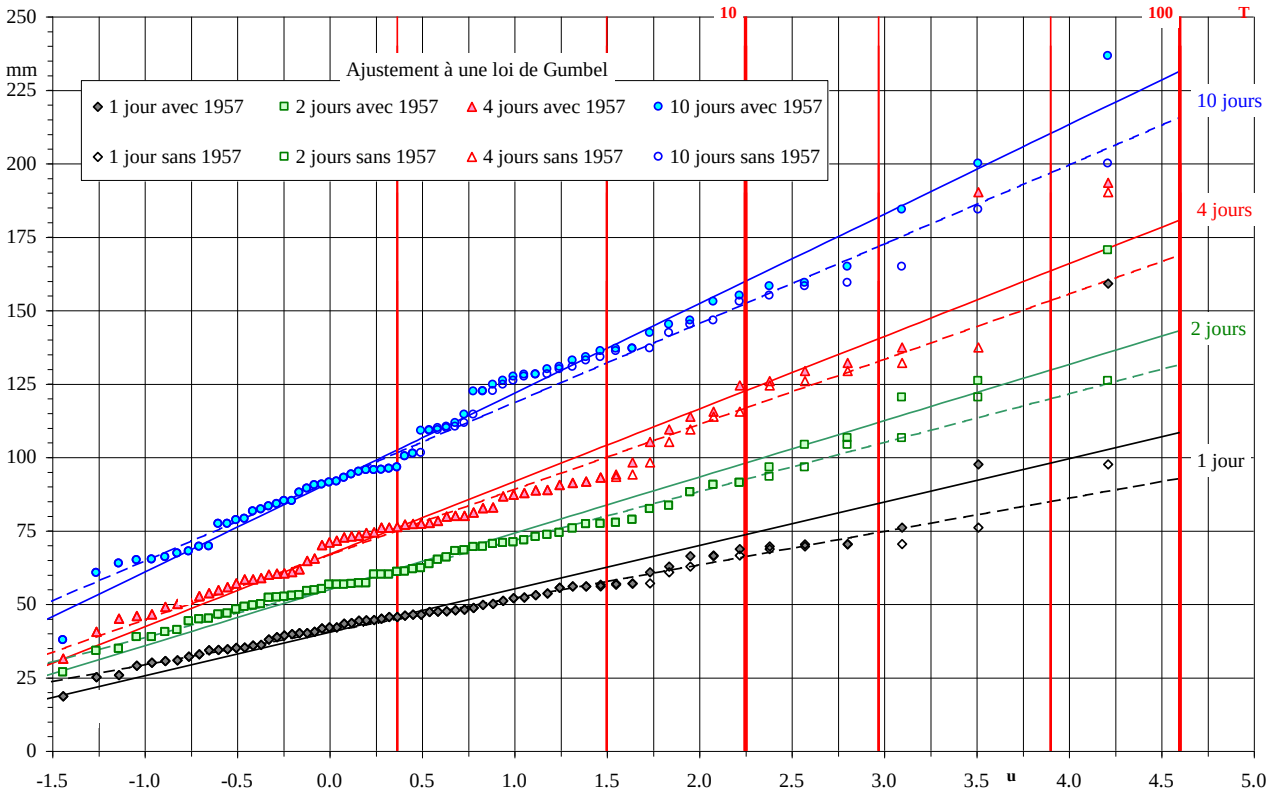


Figure 27 : Cumuls de précipitations sur plusieurs jours.

Ce graphique confirme les résultats précédents. Il montre aussi que la crue de 1957 a d'abord été exceptionnelle pour les pluies à faible durée, mais qu'elle a généré aussi la période la plus pluvieuse sur une durée de 10 jours.

A partir de ces résultats nous avons tenté un ajustement à une loi de Montana :

$$P = a\, d^{1-b}$$

P	Intensité moyenne de la pluie (mm/j)
d	Durée de la pluie (jour)
a, b	Coefficients de Montana

La figure suivante illustre un tel ajustement sur les précipitations de Ceillac :

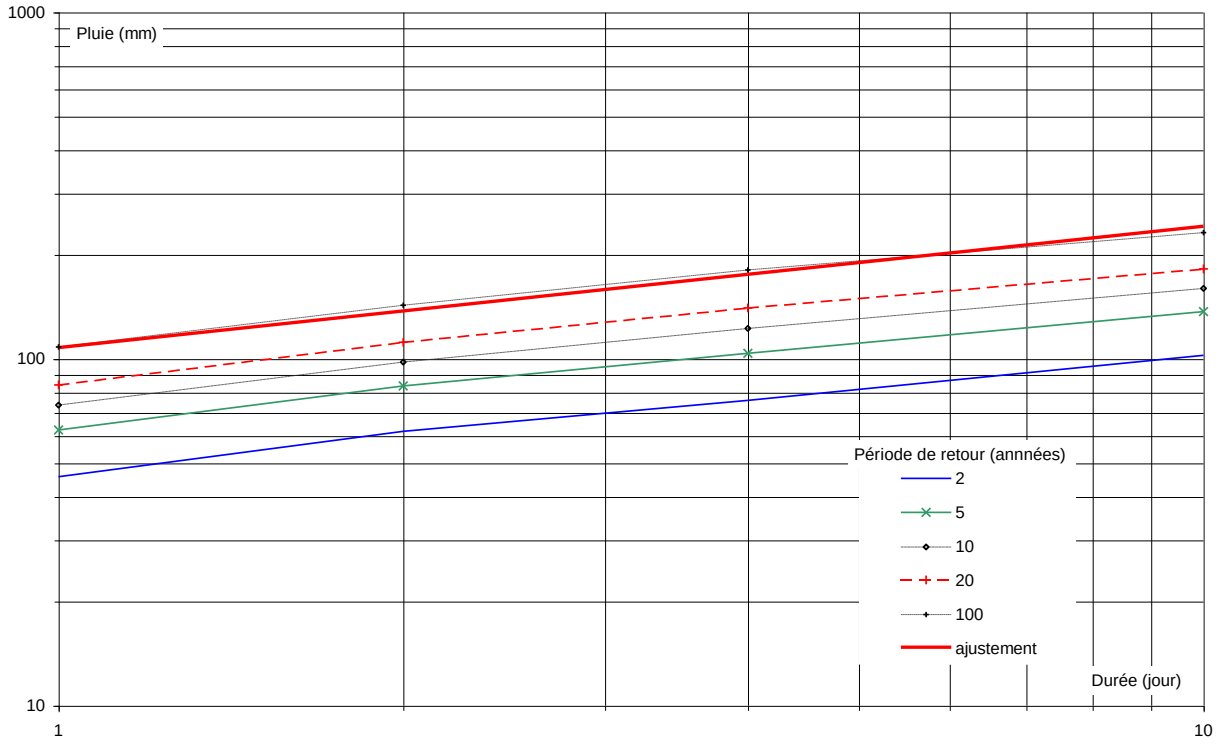


Figure 28 : Ajustement de Montana à Ceillac.

Sur Ceillac, l'ajustement est satisfaisant, pour toutes les durées observées ici, en retenant un coefficient b de 0.65.

Sur Abriès, le coefficient b est de 0.59, ce qui montre que les précipitations fortes durent plus longtemps qu'à Ceillac. Ce résultat est tout à fait cohérent avec la situation d'Abriès directement exposé au phénomène de retour d'Est.

2.5. Étude régionale des pluies journalières

2.5.1. Données disponibles

Nous nous sommes procurés les précipitations maximales sur des postes relativement proches du Queyras et - surtout - subissant des précipitations comparables.

Le tableau suivant précise les données disponibles :

	Poste	Durée exploitable
Sud	St Paul sur Ubaye	30
	Vars Ste Catherine	29
	Ceillac	67
	Guillestre	42
	St Véran	57
	Château Ville Vieille	72
	Abriès	51
	Arvieux	48
	Cervières	30
	Montgenèvre	29
	Termignon	30
	Bessans	49
Nord	Bonneval	27

Dans l'ensemble, les périodes de mesure sont longues (jusqu'à 72 ans), principalement dans le Queyras. Le poste de Ristolas serait évidemment très intéressant, mais il est encore beaucoup trop récent.

2.5.2. Traitement réalisé

A partir de ces données, nous avons réalisé un ajustement de Gumbel sur l'ensemble des données disponibles. Il n'est pas apparu d'évolution marquante en fonction de la saison, si ce n'est que l'automne - et quelques fois le printemps - paraissent plus favorables à l'apparition de fortes précipitations.

Par ailleurs, nous avons regroupé l'ensemble des données afin de créer une station fictive qui regroupe plus de 300 maxima mensuels. Il convient d'être prudent car il s'agit du regroupement de populations qui ne sont pas semblables. Ce regroupement est destiné à mettre en évidence une tendance générale que l'on retrouverait sur plusieurs stations.

La figure suivante regroupe la répartition des maxima sur un graphique de Gumbel pour les principales stations :

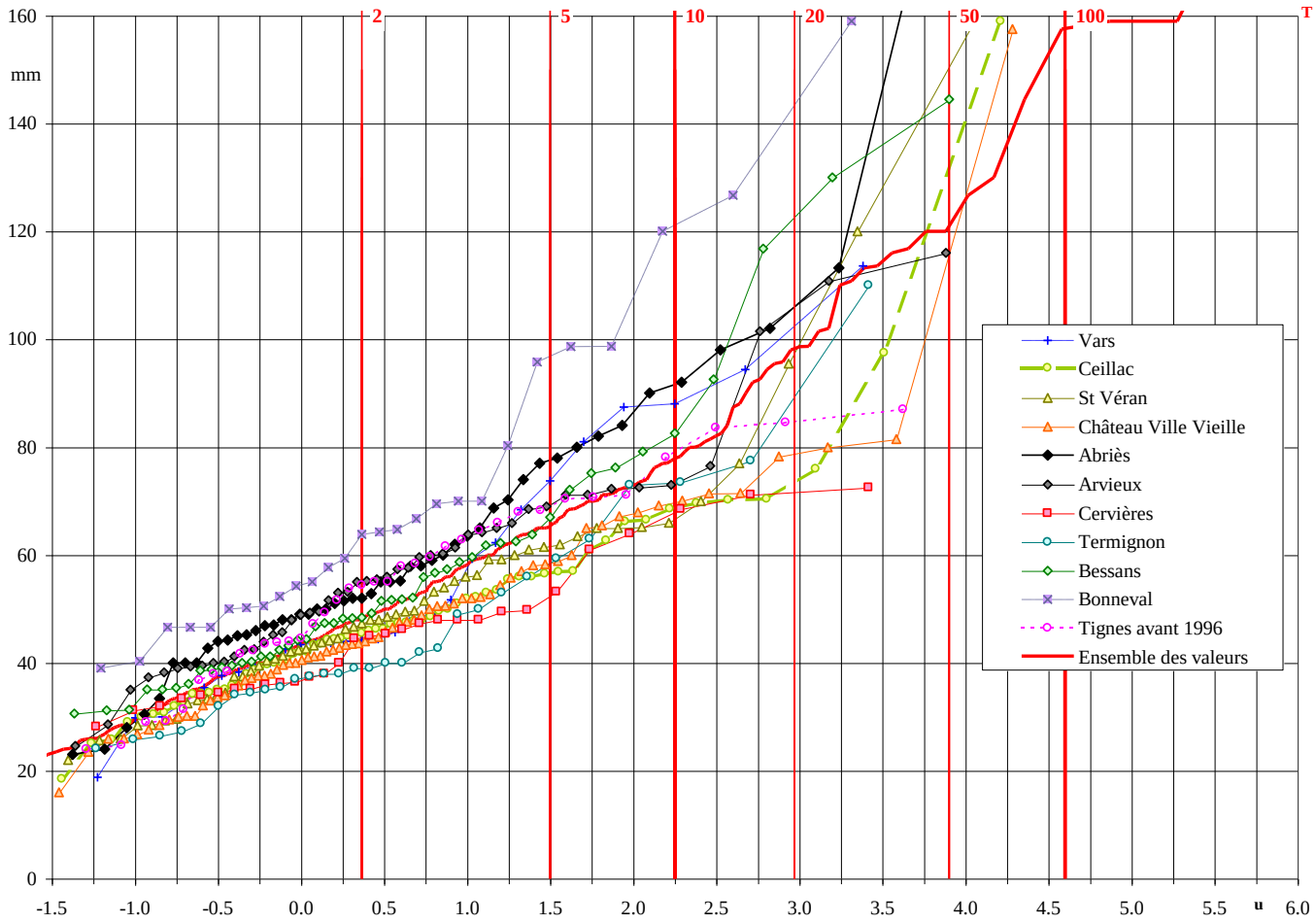


Figure 29 : Ajustement de Gumbel sur l'ensemble des stations.

Ce graphique conduit aux résultats suivants :

- Pour les périodes de retour inférieures à 10 ans, les stations ont un comportement relativement comparable, à l'exception de la station de Bonneval.
- Alors que pour la plupart des stations (en particulier dans le Queyras), l'ajustement de Gumbel semblait satisfaisant (à l'exception d'un ou deux points), il se dégage ici une tendance générale d'une rupture de pente pour une période de retour proche de 10 à 20 ans.
- Les valeurs situées dans la zone à forte pente ne correspondent pas seulement à la crue de 1957 mais intègrent d'autres crues.
- La courbe de l'ensemble des valeurs montre bien l'évolution des précipitations en fonction de la période de retour : les points se regroupent assez nettement suivant deux droites avec rupture de pente pour une pluie de 80 mm environ. Le replat constitué des trois plus fortes valeurs correspond aux crues de 1957 sur trois postes différents. Il s'agit donc d'un artifice.
- Les postes de Haute Maurienne semblent plus exposés au phénomène de Lombarde que dans le Queyras où la crue de 1957 semble très isolée. C'est pour ces postes que la rupture de pente est la plus précoce.

Nous avons rapproché les postes de St Véran et Abriès des deux postes (Bessans et Bonneval) les plus exposés au phénomène de Lombarde, comme le montre la figure suivante :

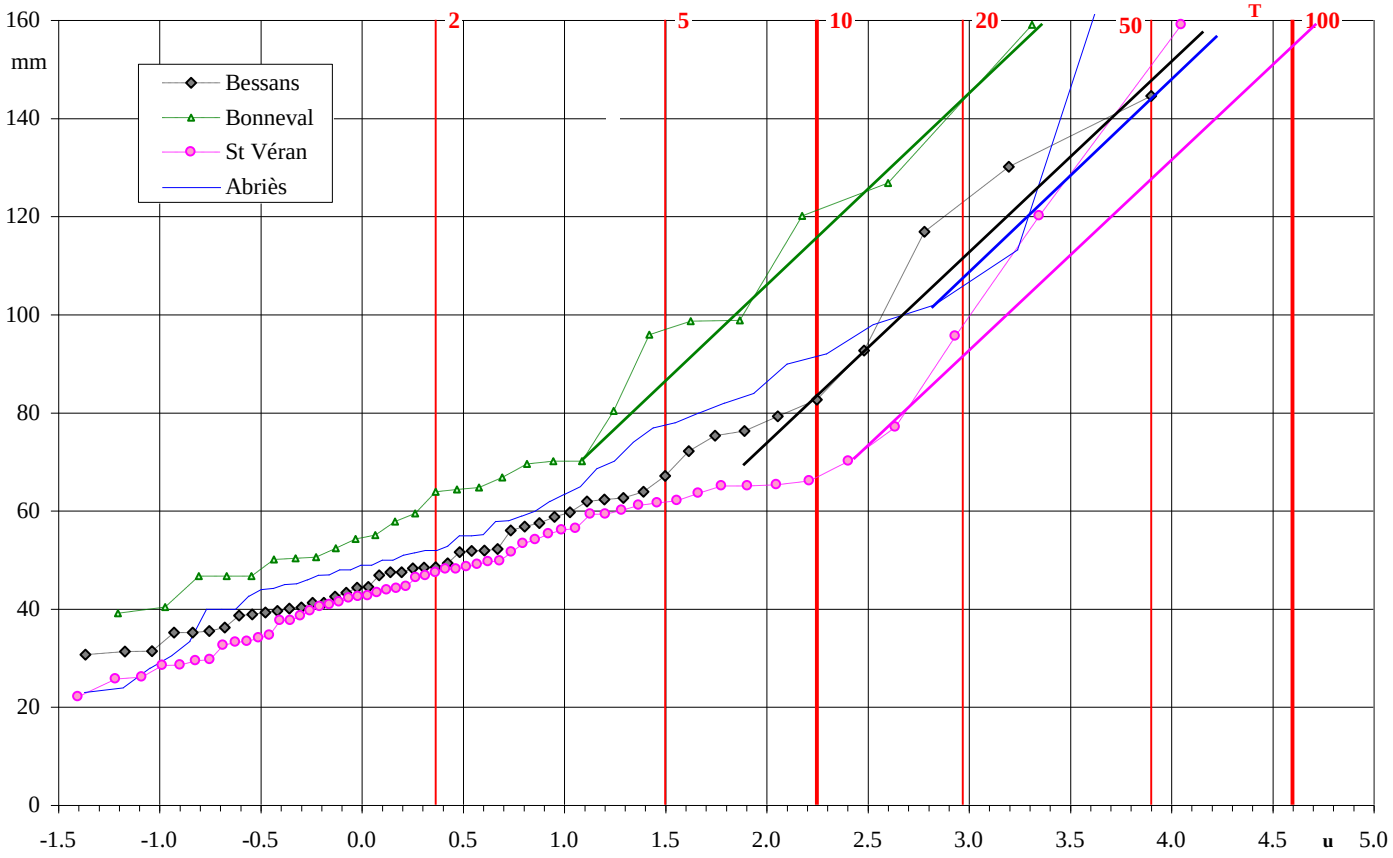


Figure 30 : Ajustement des Valeurs extrêmes en Haute Maurienne et dans le Queyras.

Cette figure montre que, sur les deux stations les plus exposées, les pluies extrêmes présentent la même pente sur le graphique. Il ne paraît pas impossible de considérer que cette pente corresponde au phénomène de Lombarde.

On peut alors reporter la même droite[3] à partir de la rupture de pente observée sur Ceillac. On observe alors que la pluie de 1937 s'ajuste très correctement avec cette nouvelle courbe. La pluie de 1957 est toujours exceptionnelle, mais sa période de retour est alors proche de 200 ans.

---

3 Il est évidemment tentant de réaliser la même analyse à partir des postes du Queyras. Cependant, cette zone étant plus abritée, les points correspondant à la rupture de pente sont moins nombreux : la pente ainsi déterminée n'est alors plus représentative.

Par contre, l'application de cette pente aux autres postes conduit à des résultats satisfaisants à l'exception du poste de Vars pour lequel on ne dispose que de 29 années de mesures. Dans l'ensemble, la pente ainsi déterminée est inférieure à celle que l'on observe avec les deux ou trois points correspondants. Cette constatation montre le caractère exceptionnel de la crue de 1957, très représentée dans les valeurs extrêmes des postes du Queyras.

Il ne s'agit là que d'une hypothèse qui doit être considérée avec prudence. Elle est cependant plus crédible que l'ajustement d'une loi de Gumbel unique sur l'ensemble des valeurs.

Elle nous semble aussi mieux correspondre à l'extrapolation directe des valeurs extrêmes formant la seconde droite.

Dans le cas d'Abriès, cet ajustement est encore acceptable, mais il n'est pas validé par la distribution des points, le point correspondant à la crue de 1957 restant très isolé.

Un tel ajustement en deux secteurs paraît le mieux adapté au vu des connaissances actuelles, même si la détermination des pluies extrêmes doit être réalisée avec prudence.

2.6. Pluies à faible pas de temps

Le bassin versant réagissant à des précipitations de l'ordre de quelques heures, il est nécessaire de définir les précipitations pour de faibles pas de temps. Malheureusement, les données sont beaucoup plus rares que pour les précipitations journalières. En particulier, il n'existe aucune donnée sur les pluies de 1957.

Selon Tricard, les précipitations à Abriès n'auraient pas dépassé 35 mm/h (sur une heure ?). Il n'a pas été possible de retrouver d'autres données sur ce poste ni d'autres estimations d'intensité.

Les données disponibles à proximité du Queyras sont les suivantes :

poste	Altitude (m)	Durée disponible (années)
Embrun	870	39
Arvieux	1550	12
La Condamine	1310	42
St Véran	2010	12

Les deux postes situés dans le Queyras sont aussi ceux pour lesquels les durées d'exploitation sont les plus faibles. Le poste de Ristolas, encore plus récent, n'est pas encore significatif et n'a donc pas été analysé.

La figure suivante regroupe les pluies de fréquence décennale et le gradex calculées par un ajustement direct de la droite de Gumbel :

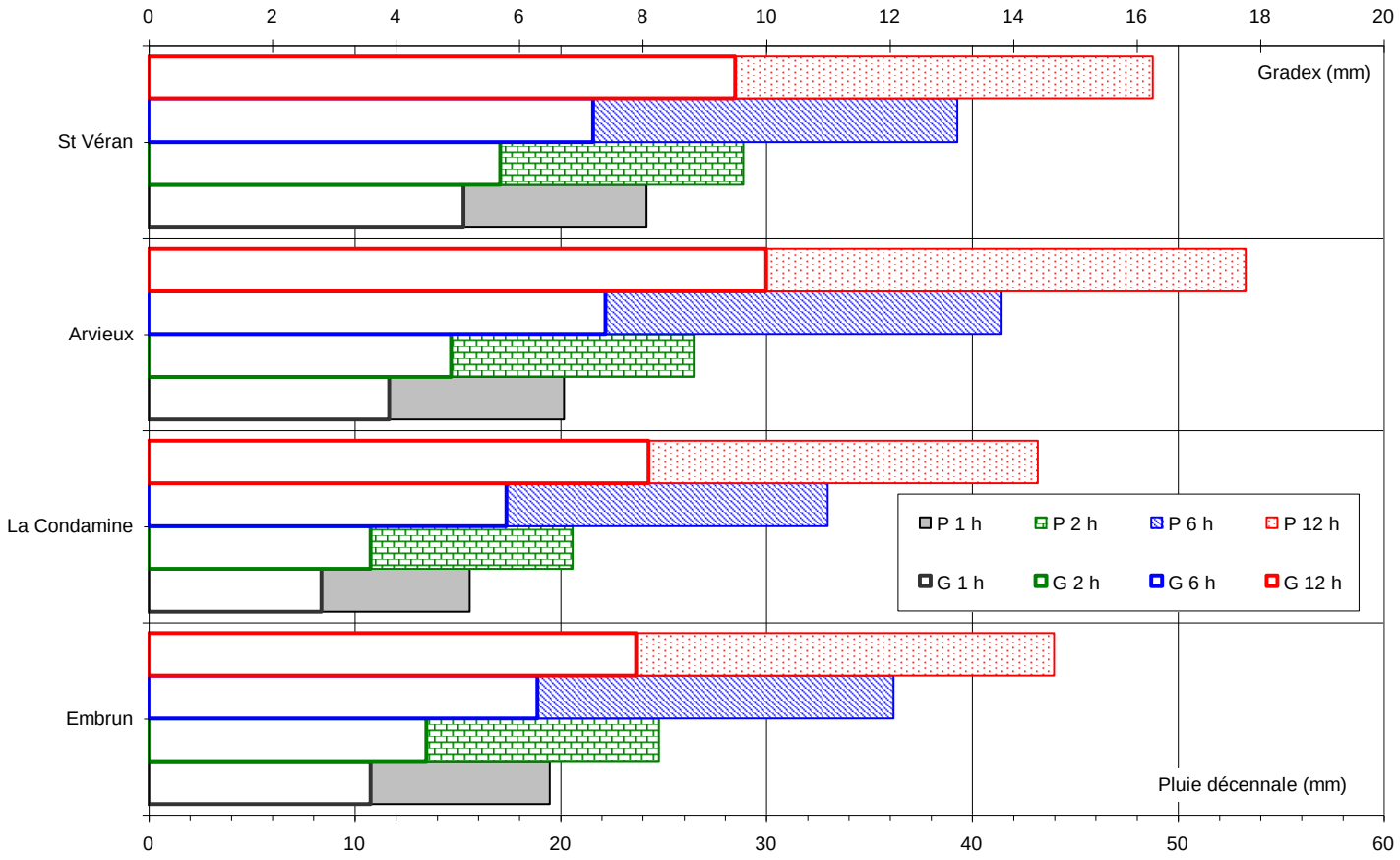


Figure 31 : Ajustement sur les pluies à faible pas de temps.

Il apparaît que les stations dans le Queyras présentent les précipitations les plus intenses, en particulier St Véran au cœur du massif. Le poste de la Condamine semble trop abrité pour être représentatif.

La figure suivante indique le coefficient b de Montana :

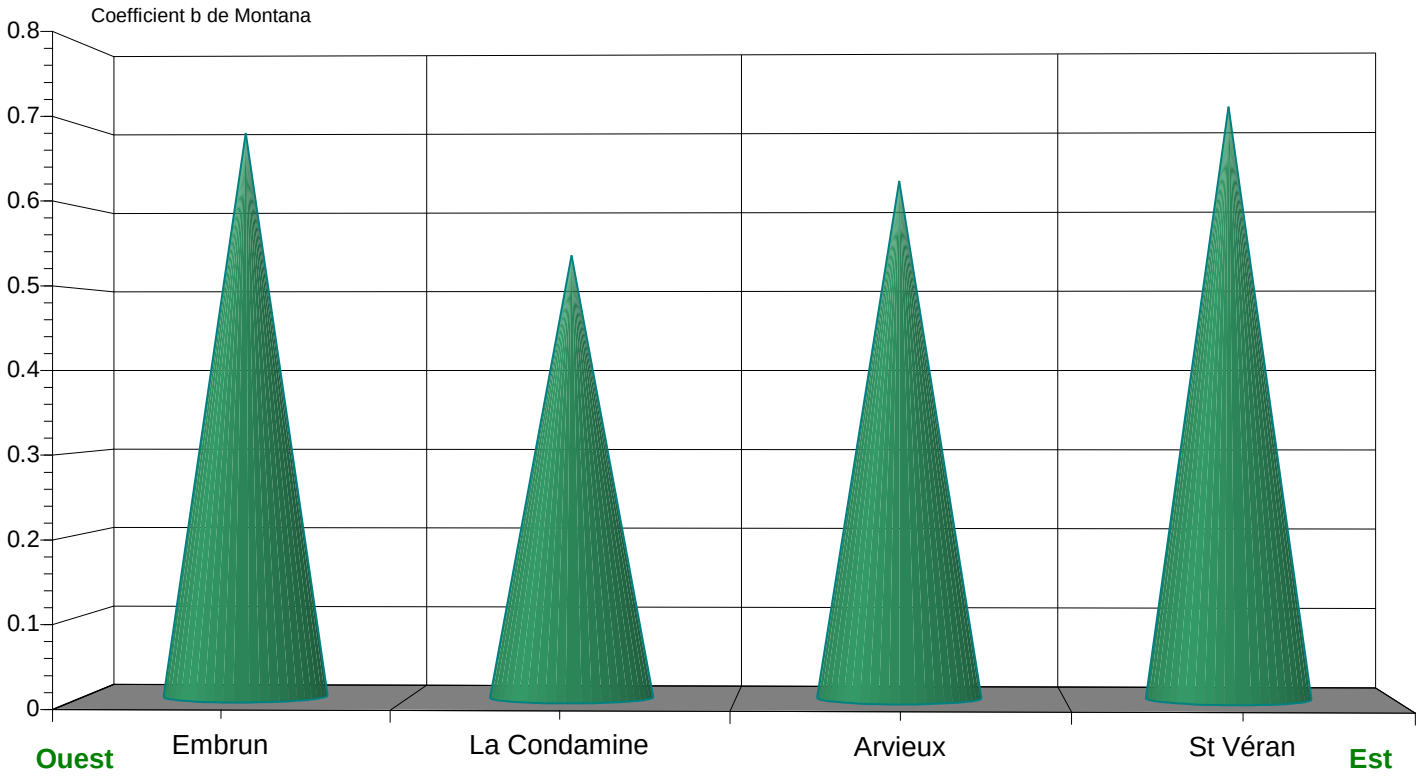


Figure 32 : Coefficient de Montana sur les pluviographes.

Dans l'ensemble, les coefficients sont peu variables et - en moyenne - le coefficient b est de 0.645.

Rappelons que sur une durée de 1 à 5 jours, le coefficient b atteint 0.59 à Abriès.

2.7. Valeurs retenues

2.7.1. Principe de détermination

Il n'est évidemment pas possible de retenir une même pluie pour l'ensemble du bassin versant. La démarche retenue est alors de la définir en différents points où seront calculés les débits de crue.

Il est possible de retenir trois zones relativement homogènes :

- Abriès. Les précipitations sont définies à Abriès, mais elles connaissent des variations importantes en allant de l'amont vers l'aval. Cette variabilité sera prise en compte lors de l'analyse des débits.
- Vallées des Aigue (St Véran et Molines) et haute vallée du Chagne.
- Queyras aval. Il s'agit de l'ensemble de la zone qui est plus abritée par rapport au phénomène de retour d'est. Cette zone inclut la vallée du Cristillan.

Ce travail est destiné à fournir des ordres de grandeur des débits de crue. Le dimensionnement d'un ouvrage particulier nécessite la réalisation d'une étude spécifique.

2.7.2. Abriès

Le tableau suivant indique les valeurs retenues, qui sont évidemment très élevées :

Durée	Jour	Jour centré	1 h
P_{10} (mm)	92	105	30.2
P_{100} (mm)	175	200	57.5
Gradex (mm)	35	40	11.6
coefficient de Montana	0.60		

Les valeurs journalières centrées[4] sont obtenues classiquement en majorant les valeurs à pas de temps fixe de 14 %. On a fait l'hypothèse que le rapport P_{100}/ P_{10} était le même pour une durée d'une heure que pour une durée d'une journée.

---

[4] Deux définitions peuvent être retenues pour la durée de la pluie :

- Le pas de temps fixe est indépendant des précipitations. C'est le cas des précipitations relevés sur les pluviomètres, qui correspondent à une période fixe de 24 h, généralement de 8 h à 8 h.
- Le pas de temps centré est défini de façon à obtenir la précipitation la plus intense sur la durée considérée. Les valeurs correspondantes sont plus représentatives des phénomènes physiques.

2.7.3. Vallée des Aigue et haute vallée du Chagne

Les valeurs indiquées ci-dessous sont directement issues de l'analyse du poste de St Véran :

Durée	Jour	Jour centré	1 h
P_{10} (mm)	70	80	23.0
P_{100} (mm)	160	182	52.6
Gradex (mm)	38	44	12.6
coefficient de Montana	0.65		

La haute vallée du Chagne est complexe car elle est généralement à l'abri des retours d'Est… sauf les plus violentes, comme les crues du Chagnon ont pu le montrer en 1856 et 1957. Par contre, ce torrent n'a pas subi de crue significative durant les dernières décennies.

2.7.4. Bas Queyras

Il s'agit d'une vaste zone qui connaît des variations locales, qui peuvent être très importantes en fonction de l'influence des phénomènes de retour d'Est :

Durée	Jour	Jour centré	1 h
P_{10} (mm)	73	83	24.0
P_{100} (mm)	150	171	49.3
Gradex (mm)	33	37	10.8
coefficient de Montana	0.65		

3. Analyse des débits de crues

3.1. Analyse des crues historiques

3.1.1. Objet

Il s'agit ici d'utiliser les connaissances sur les crues anciennes afin de mettre en évidence le fonctionnement du Guil.

L'analyse est essentiellement conduite sur les cinq dernières fortes crues car une quantification sur les autres crues est très difficile, surtout pour le débit de pointe.

L'historique des autres crues fait l'objet du chapitre 3 du document 2 - Analyse du bassin versant.

3.1.2. Crue de 1957

L'ampleur de la crue et les mouvements du lit expliquent qu'aucune mesure de débit ne soit disponible dans le Queyras lors de cet épisode.

L'étendue des dégâts permet cependant de se faire une idée de l'ampleur de la crue :

- La crue du Guil a été très forte dans la partie amont.
- Ce sont surtout les "gros affluents" du Guil qui ont causé des dégâts importants, essentiellement par engravement. Les crues de ces torrents valident l'hypothèse de précipitations beaucoup plus fortes sur une courte période que lors des crues de 2000. Les principaux sont les suivants :
  - Torrent de Ségure à Ristolas,
  - Torrent du Lombard à Aiguilles,
  - Aigue Blanche à Ville Vieille,
  - Cristillan à Ceillac et à la Maison du Roy.
- La seconde influence des torrents affluents en 1957 est la quantité très importante de matériaux apportés au lit du Guil. Ces matériaux ont considérablement facilité le débordement et les divagations, sur le cône de déjection des affluents, mais aussi dans le Guil. Les divagations constituent la cause première des dégâts observés lors de la crue.
- Malgré l'absence de mesure, un large consensus se forme pour une estimation du débit de pointe de 700 à 800 m^3/s à la Maison du Roy. C'est la seule estimation disponible sur l'ensemble du bassin versant.

3.1.3. Crue de Juin 2000

Une estimation des débits maxima écoulés lors de cette crue a été faite[5] à partir des laisses de la crue. On retiendra qu'il ne s'agit que d'ordres de grandeur. En regard des valeurs, nous avons calculé le coefficient empirique **A** caractérisant l'intensité de la crue sur un bassin de morphologie et précipitations homogènes :

$$A = \frac{\text{Débit max}}{\text{Superficie}^{0.75}}$$

Site	Débit (m^3/s)	Superficie (km^2)	A
Guil à la Monta (pont)	100	50	5.3
Guil à Abriès (caravaning)	120	89	4.1
Guil à Aiguilles (seuil aval du pont du Preyt)	180	162	4.0
Guil à la Maison du Roy	280[6]	580	2.4
Aigue Agnelle à Pierre Grosse	40	34	2.8
Aigue Blanche à Ville vieille	50	98	1.6

Ces chiffres corroborent l'observation des désordres : ceux ci sont maxima à l'amont de Ristolas, restent importants jusqu'à Aiguilles et décroissent nettement ensuite.

Les valeurs sur l'Aigue Blanche sont relativement faibles, surtout au confluent avec le Guil, ce qui laisse penser que la crue de l'Aigue Blanche a été modérée, mais cela n'est pas confirmé par les données pluviométriques de Saint Véran.

3.1.4. Crue d'Octobre 2000

Deux estimations de l'ordre de grandeur des débits ont été conduites sur le Bouchet :

- La première par ETRM en aval immédiat de Valpréveyre à partir des laisses de crues à l'entrée des gorges. Le débit estimé est alors de 50 m^3/s soit un coefficient A de 6.25.
- La seconde par le RTM à Abriès conduit à un débit de 50 à 80 m^3/s soit un coefficient A de 4.25 "seulement".

Il convient de noter que les observations, même si elles sont imprécises, montrent que la crue était nettement plus forte à Valpréveyre qu'à Abriès, ce qui s'explique par une crue du torrent de la Montette beaucoup plus modeste en octobre (au contraire de la situation au mois de juin).

---

5 Parc Naturel du Queyras - Crue du Guil du 13 juin 2000 - Expertise hydraulique - Juillet 2000 – Ph. Lefort & ETRM.

6 Ce chiffre, obtenu oralement, n'a pu être confirmé par EDF.

L'observation des lits après la crue conduit aux observations suivantes :

- La crue a - encore - été forte sur la haute vallée du Guil (Ristolas) en restant tout de même bien inférieure à celle de juin. Les dégâts observés (route en face du confluent avec le torrent de Bouchouse, parking de l'Echalp, plan d'eau de la Garcine) illustrent plus la vulnérabilité des aménagements réalisés suite à la crue de juin que le caractère très exceptionnel de la crue.
- Le Bouchet a connu une très forte crue, surtout dans le Vallon de Valpréveyre. A proximité du hameau, les dégâts semblent supérieurs à ceux visibles sur les photographies aériennes prises après la crue de 1957. Le lit a été totalement bouleversé entre Valpréveyre et le Roux. Plusieurs décennies seront nécessaires avant de retrouver une stabilisation du lit et des versants, encore profondément bouleversés par de vastes glissements de terrain.
- En aval d'Abriès, les débits n'ont que faiblement augmenté, mettant en évidence les points critiques déjà connus (camping du Gouret, pont de Peynin à l'amont d'Aiguilles, cône de déjection du Peynin…). En aval du confluent avec l'Aigue Blanche à Ville Vieille, la crue du Guil paraît avoir été beaucoup plus faible et n'a pas causé de dégâts remarquables si ce n'est la destruction des protections de berges dans la zone la plus étroite et particulièrement vulnérable.

3.1.5. Crue de mai 2008

Malgré des volumes de crue importants lors de cet épisode dans le haut bassin versant du Guil, cette crue n'apporte aucun élément nouveau susceptible de remettre en question les approches précédentes. Elle confirme la répartition spatiale des crues moyennes avec de fortes précipitations dans la haute vallée du Guil… et une décroissance très nette en aval d'Abriès.

Comme indiqués précédemment, les débits de pointe seraient assez médiocres :

- 130 m^3/s à la Maison du Roy ce qui est faible.
- 115 m^3/s à Château Queyras.
- 100 m^3/s à Aiguilles.

3.1.6. Synthèse

L'étendue des dégâts correspond bien à celle des précipitations et leur irrégularité. En juin comme en octobre 2000, tout le bassin versant inférieur (y compris Ceillac) a été épargné par la crue.

Il est possible de regrouper l'ensemble des résultats disponibles pour mettre en évidence l'évolution du débit en fonction de la superficie du bassin versant. La figure suivante regroupe ces données :

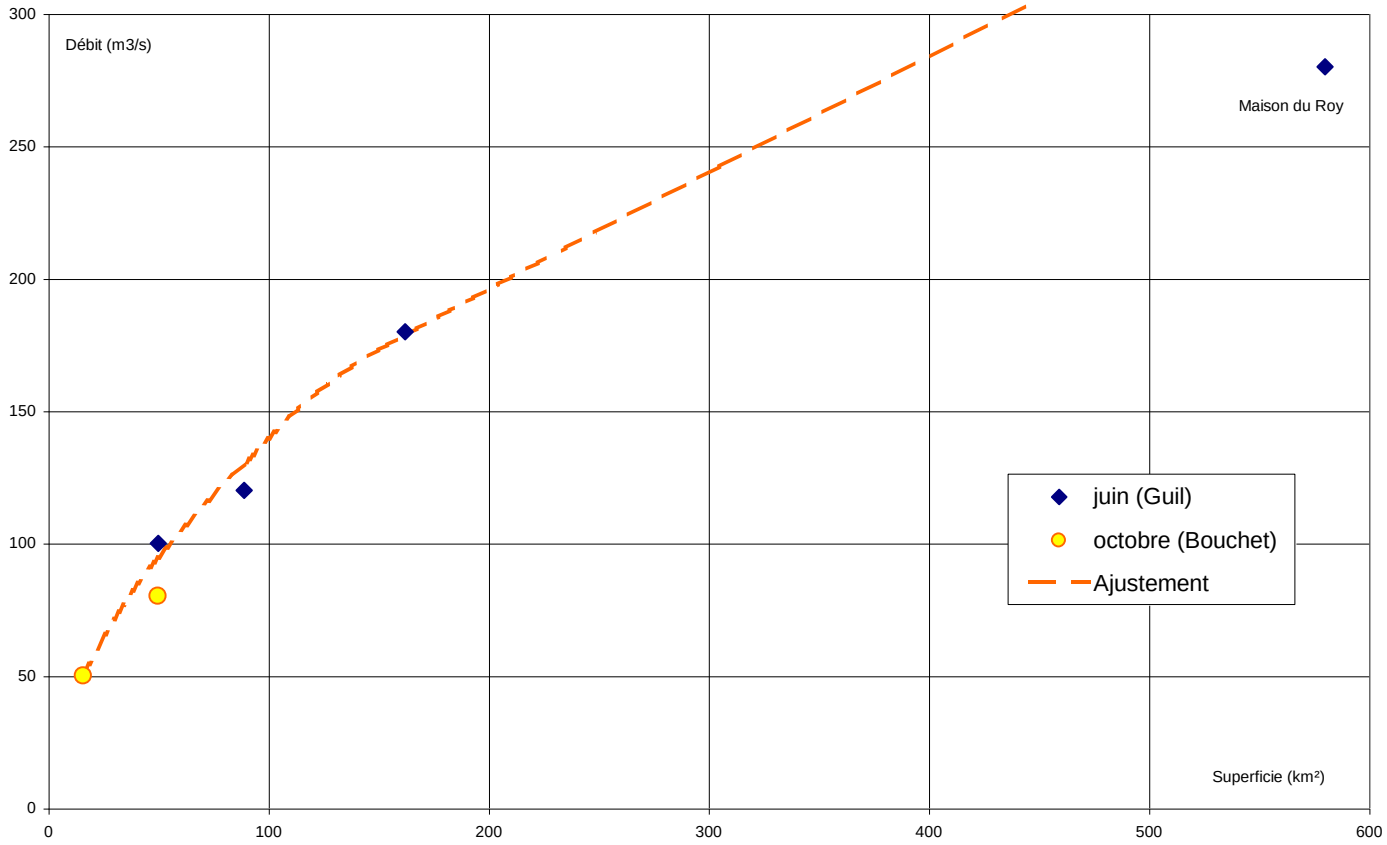


Figure 33 : Évolution des débits observés en fonction de la superficie du bassin versant.

Ce graphique a été construit en ne tenant pas compte des zones de moindre précipitation comme dans la vallée des Aigue. De plus, l'ajustement a été réalisé sans prendre en compte les débits à la Maison du Roy, car en aval d'Aiguilles, les précipitations ont été très modestes en juin 2000.

Pour ces deux épisodes, il est possible d'obtenir un bon ajustement en considérant la superficie du bassin versant à la puissance 0.55, ce qui est particulièrement faible. La crue de juin 1957, beaucoup plus généralisée, aurait conduit à un exposant supérieur (mais toujours inférieur à 0.75).

3.2. Données hydrométriques

Il n'existe qu'un seul poste dans le bassin versant du Guil : la maison du Roy, au confluent du Guil et du Cristillan. Ce poste a été totalement engravé par les apports du Cristillan lors de la crue de 1957.

Ce poste a fait l'objet de plusieurs analyses.

SOGREAH s'est basée sur l'étude[7] EDF pour le barrage situé à la Maison du Roy. Les valeurs proposées par EDF sont cependant modifiées en tenant compte des éléments suivants :

- La rétention nivale n'a pas de signification pour les crues liées au phénomène de Lombarde. Elle ne doit donc pas être prise en compte.
- Le gradex[8] initialement retenu (12 mm) est trop faible par rapport à "diverses études hydrologiques" qui proposent plutôt 14 à 18 mm pour le Queyras. Notons que nous avons retenu - dans les zones d'influence directe des phénomènes de retour d'Est - un gradex de 30 mm pour les phénomènes extrêmes (il est beaucoup plus faible pour les pluies relativement courantes).
- Le débit centennal sur l'Arc est estimé à 540 m^3/s sur l'Arc à Avrieux pour 580 km^2. En effet, la haute Maurienne est très comparable au Queyras pour les phénomènes de retour d'Est.
- L'étude EDF estime les périodes de retour de 1948 et 1957 à - respectivement - 125 et 550 ans, ce qui semble très surestimé.

En conclusion, à la Maison du Roy, SOGREAH estime à 600 m^3/s le débit de pointe centennal (contre seulement 480 m^3/s pour EDF) et à 230 m^3/s le débit décennal (contre 200 m^3/s pour EDF).

Ces arguments sont fondés pour les crues extrêmes. Par contre, ils perdent de leur pertinence pour les crues plus ordinaires, telles que la crue décennale. Au contraire, il apparaît dans le Queyras une rupture de comportement au-delà de la crue décennale. Ainsi, la méthode d'estimation mise en œuvre par EDF pour la détermination du débit décennal paraît plutôt satisfaisante.

---

[7] EDF - Mars 1979 - Évaluation des débits extrêmes de crue du Guil à la prise d'eau d'Eygliers.

[8] Ce paramètre correspond à l'évolution des précipitations en fonction de la période de retour. Il est défini à la formule page 34.

Nous avons repris les données disponibles à la Maison du Roy en appliquant un coefficient de 1.7 pour le rapport en débit de pointe et débit moyen journalier. La figure suivante correspond à cette analyse :

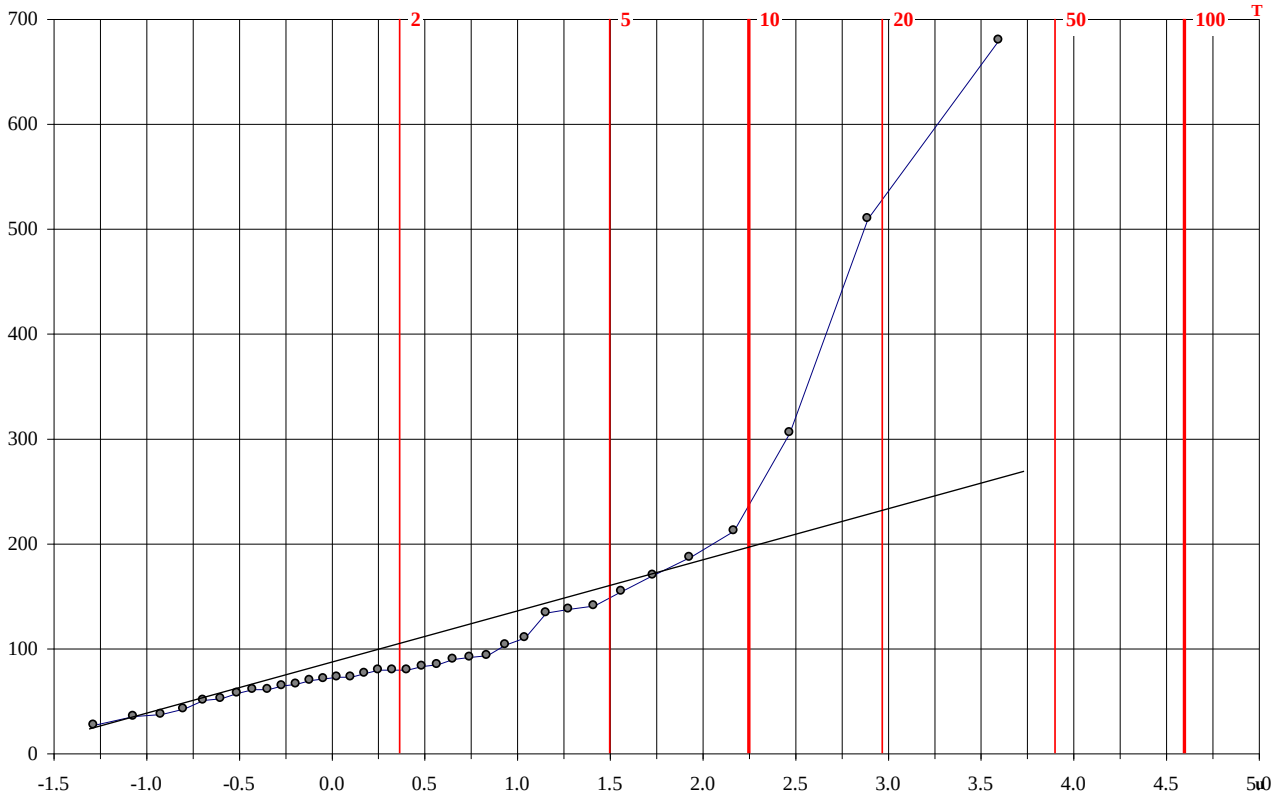


Figure 34 : Ajustement des débits observés à la Maison du Roy.

Cet ajustement brille surtout par sa mauvaise qualité et le choix d'un débit décennal de 200 m³/s paraît très arbitraire.

Nous avons effectué une comparaison avec l'estimation du débit décennal de l'Ubaye à Barcelonnette. Celui-ci est bien connu car la station est en service presque depuis le début du XXème siècle. D'autre part, l'Ubaye est très comparable au Guil, au moins pour les crues moyennes.

L'estimation du débit de pointe décennal sur l'Ubaye est de 167 m³/s pour 540 km², soit pour le Guil à la Maison du Roy, 177 m³/s. Rien ne permet d'affirmer que ce débit soit plus proche de la réalité que les 200 m³/s estimés par EDF. Par contre, il nous incite à conserver le débit de 200 m³/s au lieu des 230 m³/s retenus par SOGREAH.

On retient alors les débits suivants à la Maison du Roy :

- débit décennal : 200 m³/s
- débit centennal : 600 m³/s.

Le rapport débit centennal / débit décennal est important (3) et correspond bien à l'écart considérable entre les précipitations décennales et centennales.

3.3. Estimation des débits aux points critiques

3.3.1. Principe retenu

L'estimation générale des débits dans le Queyras est basée sur la démarche suivante :

- Le débit décennal et le débit centennal sont estimés en quelques points particuliers.
- Les volumes ruisselés sont aussi approchés en considérant les volumes de précipitations sur le bassin versant et un coefficient de ruissellement. Cette approche permet de prendre en compte la durée importante de la crue.

Les résultats précédents sont ensuite étendus à l'ensemble du Queyras en fonction de l'évolution des différents paramètres.

Les points particuliers sont les suivants :

- Guil à l'amont du Bouchet à Abriès (caravaning),
- Guil à l'amont d'Aiguilles,
- Guil à la Maison du Roy,
- Cristillan en aval de Ceillac,
- Chagne à Guillestre.

3.3.2. Guil à la Maison du Roy

Les débits de pointe ont été estimés précédemment à partir de l'analyse des données existantes sur le site. Ils sont indiqués ci-dessous :

- Débit décennal : 200 m^3/s
- Débit centennal : 600 m^3/s
- Crue de 1957 : 700 à 800 m^3/s.

Le volume transité en crue peut être estimé à partir des hypothèses suivantes :

- Le bassin versant est découpé en fonction de la pluviométrie et les précipitations représentatives du bassin versant sont déterminées. On considère les pluies de 5 jours pour les périodes de retour décennale et centennale et le cumul de précipitation pour la crue de 1957.
- On considère un coefficient de ruissellement sur l'ensemble de l'épisode de 0.3 pour la crue décennale, de 0.5 pour la crue centennale et de 0.6 pour la crue de 1957.

Cette approche conduit aux ordres de grandeurs suivants à la Maison du Roy :

Type de crue	Volume écoulé (million de m^3)
Décennale	24
Centennale	77
1957	91

3.3.3. Guil à l'amont d'Aiguilles

Une étude réalisée en 1999 par ETRM a permis la détermination des crues à Aiguilles. Plusieurs méthodes ont été employées :

- Analyse des crues historiques.
- Utilisation des relations pluie - débit en fonction des résultats précédents.
- Exploitation des données hydrométriques.
- Comparaison avec d'autres bassins versants.

Les résultats sont les suivants :

Superficie (km^2)	162
Débit décennal (m^3/s)	80
Débit centennal (m^3/s)	**260**
Crue de 1957 (m^3/s)	315

Pour les volumes de crue, la même méthode qu'à la Maison du Roy a été appliquée. Elle conduit aux résultats suivants :

Type de crue	Volume écoulé (million de m^3)
Décennale	8
Centennale	24
1957	31

3.3.4. Guil à Abriès (caravaning)

Une première analyse consiste à se baser sur l'analyse des pluies. Le poste d'Abriès constituant le point bas du bassin versant (a priori le moins arrosé), les précipitations de ce poste sont majorées de 20 % pour tenir compte des très fortes pluies sur le relief. Cette majoration est évidemment arbitraire et seul un réseau de pluviographes (ou un radar) permettrait de la quantifier. Les données sur Ristolas permettront de préciser ce point… d'ici quelques années, lorsque plusieurs crues importantes auront été observées.

Il est alors possible d'utiliser des relations entre pluie et débit pour l'estimation des débits caractéristiques. Cette méthode est détaillée page suivante.

Guil à Abriès

Calcul du temps de concentration et du débit décennal

Caractéristiques du bassin versant (calcul du débit décennal)

Surface du bassin versant (km2)	Pluie décennale journalière (mm)	Coefficient régional Crupedix	Dénivelée spécifique (m)	Hauteur d'infiltration (Méthode SCS)	$Pluie = \frac{a\ duré\ e}{(duré\ e + c)^b}$ a	b	c
89	**110**	**1.2**	**800**	**100**	**30**	**0.65**	**0**

Caractéristiques du bassin versant (calcul du temps de concentration)

			caractéristiques sol (Méthode de Zeller)				
Coefficient de Passini	Longueur du talweg (km)	Pente moyenne (%)	Coefficient de débit	Coefficient de ruissellement	Longueur d'écoulement en nappe (m)	Vitesse d'écoulement estimée (m/s)	q* (méthode SCS)
1.5	**10**	**6**	**0.06**	**0.3**	**1000**	**3**	**0.03**

Calcul du temps de concentration

	temps de concentration calculé (en heure)
Formule de Passini	5.9
Formule de Giandotti	3.7
Méthode de Zeller	3.0

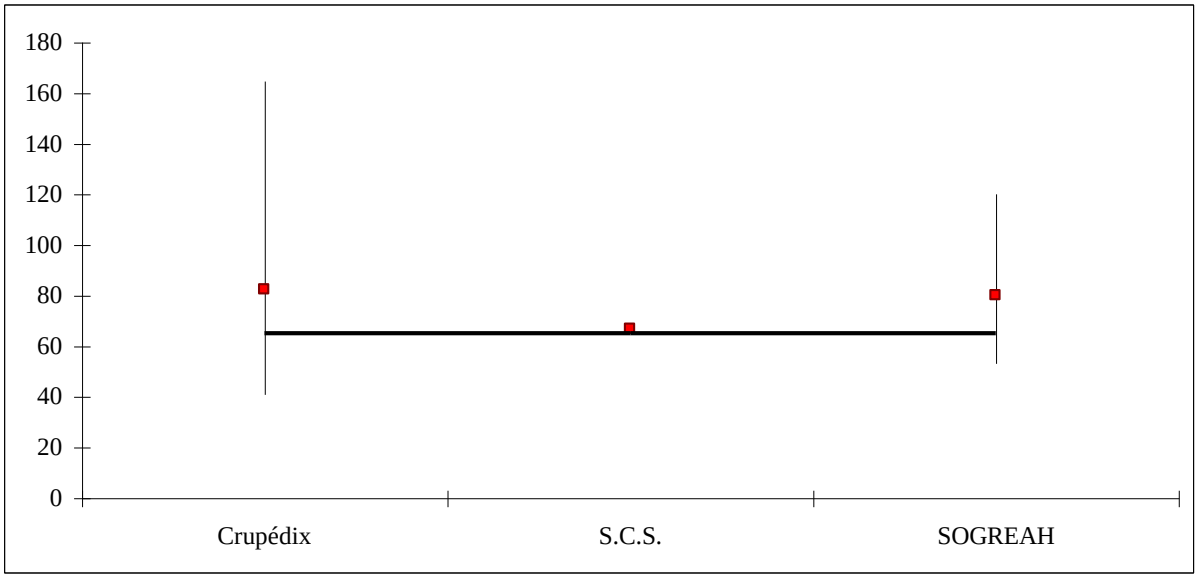
temps de concentration retenu (en heure)	**4**

Calcul du débit décennal

Nom de la méthode	débit de pointe calculé (m3/s)
Crupédix	82
S.C.S.	67
SOGREAH	80

débit de pointe décennal retenu (en m3/s)	**65**

Débits calculés avec l'intervalle de confiance et valeur retenue :



Guil à Abriès

Calcul des débits de différentes périodes de retour

Caractéristiques du bassin versant (méthode du gradex)

$Gradex = \frac{a' \, duré \, e}{(duré \, e + c')^{b'}}$			Rapport du débit de pointe au débit moyen durant la crue
a'	b'	c'	
14.0	**0.65**	**0**	**1.5**

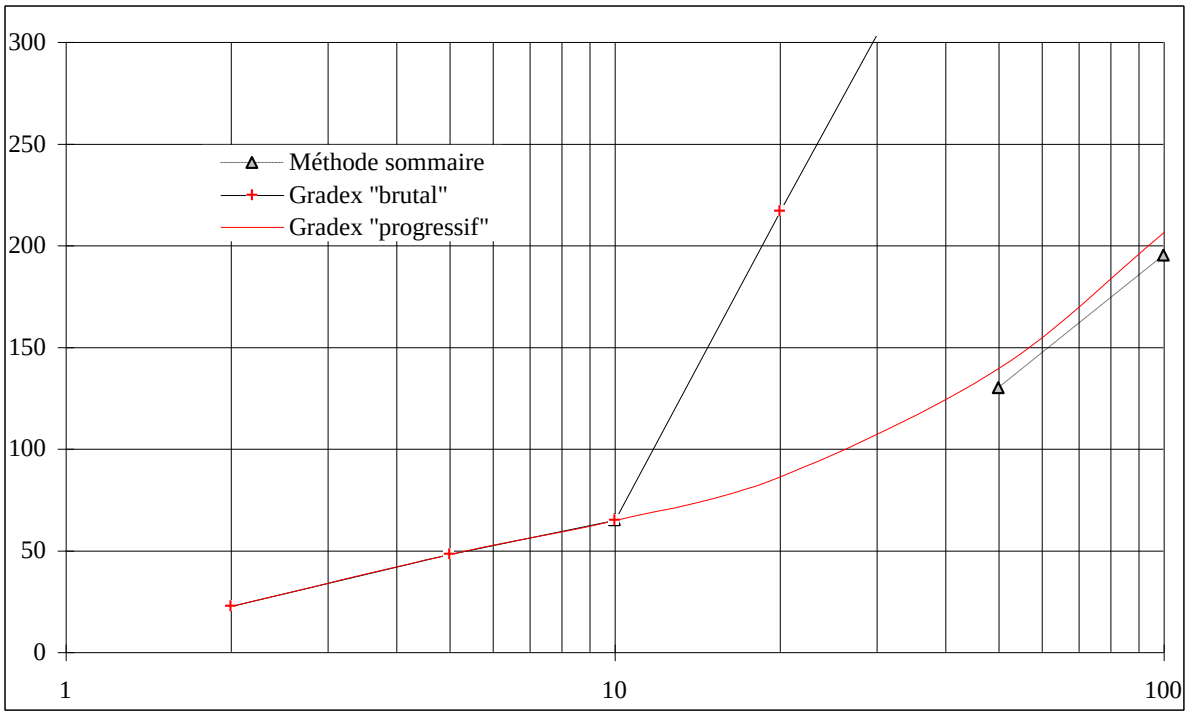
Calcul du gradex des débits

Période de retour inférieure à 10 ans	22
Période de retour supérieure à 10 ans	211

Calcul des débits de pointe

Période de retour (années)	Méthode sommaire	Gradex "brutal"	Gradex "progressif"
2		23	23
5		48	48
10	65	65	65
20		217	86
50	130	413	140
100	195	561	207

Période de retour	**Débit retenu**
10	**65**
100	**200**



Une autre approche consiste à considérer que le débit de pointe est proportionnel à la superficie du bassin versant à la puissance 0.55 en amont d'Aiguilles, comme constaté lors des crues de 2000. Les résultats sont alors les suivants :

	Estimation par rapport aux pluies	Estimation par rapport à Aiguilles
Débit décennal (m^3/s)	65	58
Débit centennal (m^3/s)	**200**	**187**
Crue de 1957 (m^3/s)	-	227

Les deux estimations conduisent à des résultats assez proches, les valeurs issues des relations pluies débits étant un peu supérieures, ce qui est directement lié au coefficient majorateur sur les précipitations par rapport aux observations à Abriès. Il est possible de retenir une valeur intermédiaire, comme indiqué dans le tableau ci-dessous :

Superficie (km^2)	89
Débit décennal (m^3/s)	60
Débit centennal (m^3/s)	**190**
Crue de 1957 (m^3/s)	220

Pour les volumes de crue, la même méthode qu'à la Maison du Roy a été appliquée. Elle conduit aux résultats suivants :

Type de crue	Volume écoulé (million de m^3)
Décennale	5
Centennale	16
1957	21

3.3.5. Cristillan en aval de Ceillac

Une étude[9] a été réalisée en 1999 à Ceillac. Elle reste d'actualité et les débits retenus sont les suivants en aval de Ceillac :

Superficie (km²)	68.3
Débit décennal (m³/s)	40
Débit centennal (m³/s)	145
Crue de 1957 (m³/s)	180
Temps de concentration (heure)	4

Pour les volumes de crue, la même méthode qu'à la Maison du Roy a été appliquée. Elle conduit aux résultats suivants :

Type de crue	Volume écoulé (million de m^3)
Décennale	3
Centennale	8
1957	9

3.3.6. Le Chagne à Guillestre

Une étude[10] a été réalisée en 1999 à Guillestre. Elle reste elle aussi d'actualité et les débits retenus sont les suivants au confluent Chagne / Guil :

Superficie (km²)	120
Débit décennal (m³/s)	82
Débit centennal (m³/s)	221

Pour les volumes de crue, la même méthode qu'à la Maison du Roy a été appliquée. Elle conduit aux résultats suivants :

Type de crue	Volume écoulé (million de m^3)
Décennale	5
Centennale	18

[9] ETRM & SOGREAH - DDE des Hautes-Alpes - Étude des dispositions de prise en compte des risques torrentiels concernant le chef-lieu de CEILLAC - Mars 2000.

[10] SOGREAH – Commune de Guillestre – Etude hydraulique des bassins versants du Chagne et du Rif Bel – Octobre 1999.

3.4. Estimation des débits sur les différents sites

3.4.1. Méthode mise en œuvre

A partir des résultats précédents, il est possible de déterminer un ordre de grandeur des débits en différents points du bassin versant en faisant les hypothèses suivantes :

- On considère pour chaque détermination de débit le point hydrologiquement le plus proche.
- Le rapport des débits de pointe est proportionnel à la superficie du bassin versant à la puissance α, comme l'indique la formule suivante :

$$Q_2 = Q_1 \left(\frac{S_2}{S_1}\right)^{\alpha}$$

- Le coefficient α prend généralement les valeurs suivantes (une adaptation au cas par cas paraît cependant nécessaire) :
  - α égal 0.65 dans la partie basse du bassin versant.
  - α égal 0.55 dans la partie haute du bassin versant (amont d'Aiguilles, vallée des Aigue).

  Ce coefficient α prend en compte deux phénomènes différents : l'atténuation spatiale des pluies ainsi que l'augmentation du temps de concentration avec la surface du bassin versant (ces phénomènes correspondent à une valeur de l'ordre de 0.75) et l'augmentation des précipitations lorsque l'on s'approche de la frontière. Il doit donc être analysé avec discernement.

3.4.2. Résultats obtenus

Lieu	Superficie (km²)	Débit décennal (m^3/s)	Débit centennal (m^3/s)	débit type 1957 (m^3/s)
Guil à Ristolas (amont Ségure)	62	50	156	180
Guil à Ristolas (aval Ségure)	80	57	180	207
Guil à Abriès (amont Bouchet)	**89**	**60**	**190**	**220**
Guil à l'amont d'Aiguilles	**162**	**80**	**260**	**315**
Guil à Château Queyras	317	135	405	506
Guil à la Maison du Roy	**580**	**200**	**600**	**750**
Torrent de Ségure à Ristolas	17	24	76	89
Torrent du Bouchet à Abriès	50	44	138	160
Aigue Agnelle à Molines	35	34	112	136
Aigue Blanche à Ville vieille	98	61	197	239
La Rivière au confluent	51	33	120	149
Cristillan en aval de Ceillac	**68**	**40**	**145**	**180**
Chagne à Guillestre	**120**	**82**	**221**	**275**
Chalps (ou Monarel)	13	12	25	30
Palps	7	10	20	25
Rif Bel	42	37	100	125

Ces résultats sont destinés à éclairer le fonctionnement du bassin versant du Guil. Une analyse détaillée est nécessaire pour une analyse précise d'un site, par exemple pour le dimensionnement d'un ouvrage.

4. Analyse des profils en long

4.1. Objectif

La pente est – de loin – le premier paramètre explicatif du transport solide. Son évolution est donc un élément essentiel pour l'étude du comportement de la rivière.

L'analyse est réalisée en deux étapes :

- Le profil en long doit être analysé dans son ensemble afin de faire ressortir les principales caractéristiques du Guil et de ses principaux affluents.
- Dans une seconde étape, les évolutions depuis le début du siècle peuvent être analysées afin de mieux connaître les évolutions de la rivière.

4.2. Données disponibles

On dispose sur le Guil d'un ensemble remarquable de données :

- Le profil en long de 1907 permet de mettre en évidence le fonctionnement général. Il a été levé par le Service de Nivellement Général de la France pour le compte du Service des Grandes Forces Hydrauliques.
- Le profil en long de 1990 a été levé à l'occasion du schéma d'Aménagement du Guil. Sur Aiguilles, un levé datant de 1984 a été utilisé, aucune forte crue ne s'étant produite entre ces deux dates.
- Le profil en long de 2001 correspond à l'ensemble du Guil en amont de Château Queyras. Il permet de mettre en évidence l'ensemble des évolutions liées aux crues de 2000.
- Le profil en long de 2012 obtenu par LIDAR dans le cadre de cette étude. Ce levé fourni un ensemble important d'information :
  - Il a été possible de réaliser une comparaison très fine des niveaux par rapport aux levés de 2001. En effet, le tracé en plan était connu pour les deux levés. Les niveaux du fil d'eau d'étiage de 2012 ont pu être projetés sur le tracé de 2001, permettant de compenser l'effet des divagations de la rivière.
  - Le profil en long de nombreux affluents - mais aussi du Guil dans les gorges - a pu ainsi être facilement levé, permettant une comparaison avec le profil en long des Grandes Forces Hydrauliques. Cela permet de dresser un bilan actuel du bassin versant mais le recalage des abscisses est alors beaucoup plus imprécis.
- Outre ces profils en long généraux, d'autres profils ont été levés plus localement à l'occasion d'études particulières :
  - Guil à Château Queyras et Montdauphin en 1957, après la crue,
  - Guil et Peynin à Aiguilles en 1999.

- Guil au Gouret en juillet 2000.
- Guil à Ristolas en juillet 2000.
- Cristillan et Mélezet à Ceillac en 1999.

Cet ensemble de données permet une approche assez complète des évolutions du lit, même si des données plus complètes – et plus précises – auraient été souhaitables immédiatement après la crue de 1957.

4.3. Analyse du profil en long général

4.3.1. Objectif

Le profil en long du Guil est analysé sur l'ensemble de son linéaire en mettant en évidence les points critiques. Ces différents tronçons sont détaillés ci-dessous. Les évolutions des niveaux sont analysées dans une seconde étape, au paragraphe 4.4 page 79. Il s'agit avant tout de préciser le fonctionnement général du bassin versant.

Les graphiques indiquent les éléments suivants :

- Profil en long du Guil dans la zone d'étude,
- Profil en long des principaux affluents,
- Principaux points de repère (ponts, confluents…),
- Pente du lit du Guil. Cette pente est calculée en chaque point. L'échelle correspondante est indiquée sur le coté droit du graphique,
- Droite ajustée mettant en évidence les principales zones de variations de pente.

Les évolutions du lit - faibles et sans influence sur la structure générale des pentes - seront analysées dans une seconde partie, en mettant en évidence les évolutions lors de la dernière décennie.

4.3.2. Profil en long d'ensemble

La figure suivante est un profil en long général du Guil sur l'ensemble de son cours mais aussi de des principaux affluents levé dans le cadre de cette étude :

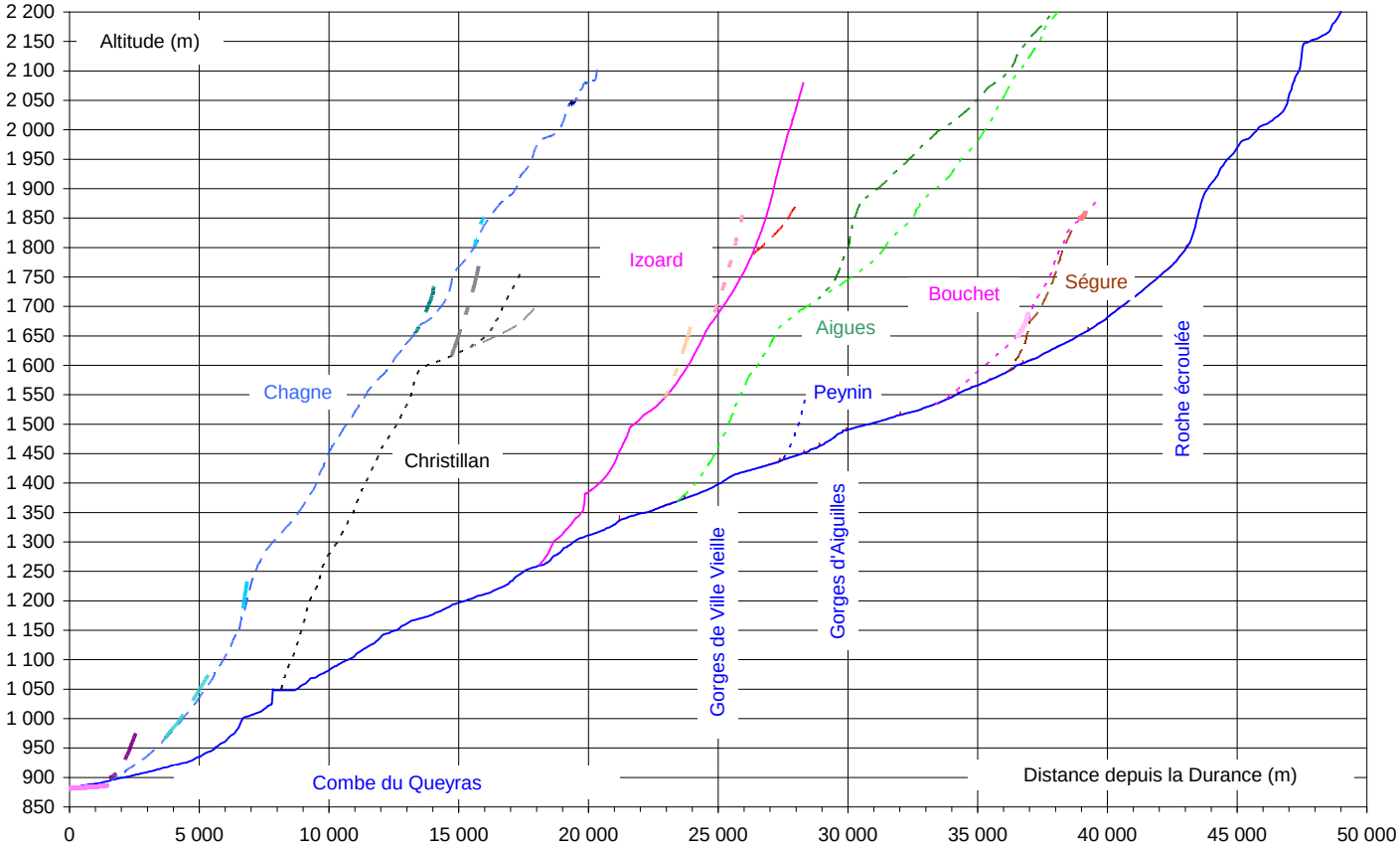


Figure 35 : Profil en long général du Guil.

Cette figure permet de mettre en évidence les secteurs suivants :

- **Amont de la Roche écroulée.** Dans son cours amont, le Guil est un véritable torrent avec des pentes fortes et irrégulières.
- **Amont des Gorges d'Aiguilles**. La pente est régulièrement décroissante, et le Guil ne subit pas d'influence extérieure prépondérante, hormis les affluents qui apportent des matériaux mais qui n'imposent pas de fortes variations de pente. Ce long tronçon alluvionnaire se termine par les gorges d'Aiguilles. Le torrent de Ségure présente de très fortes pentes, alors que le Bouchet forme une "plaine" alluvionnaire en aval du Roux.
- **Traversée Aiguilles**. La plaine d'Aiguilles est calée entre deux gorges, celle à l'amont étant la plus raide. Dans les gorges, le lit est pavé par de gros blocs, ce qui n'exclut pas des mouvements des blocs, mais qui en réduit l'ampleur et la fréquence. La plaine d'Aiguilles est influencée par le torrent du Lombard en rive droite et surtout par le Peynin en rive gauche.
- **Plaine de Château Queyras**. Cette plaine débute à la sortie des gorges en amont de Ville Vieille et se termine brutalement par le verrou de Château Queyras. L'Aigue Blanche est l'affluent prépondérant pour les débits liquides mais surtout pour les débits solides. Le profil en long met en évidence la zone alluvionnaire de l'Aigue Blanche localisée entre Molines et St Véran.

- **La Combe du Queyras**. Alors que, dans son cours amont, le Guil ne subit que localement des influences extérieures prépondérantes, il s'écoule dans des gorges marquées sur la quasi-totalité de son cours, depuis Château Queyras jusqu'à l'amont de Guillestre. Le substratum rocheux est localement affleurant dans le lit. Surtout, des blocs imposent les niveaux du lit. Ces blocs peuvent provenir directement d'éboulement ou être apportés par les laves torrentielles des torrents affluents. Le lit est alors très stable. Le torrent d'Izoard draine un bassin versant étendu mais les pentes du lit sont très variables sous l'effet du pavage du lit. Le Cristillan présente des gorges sur l'essentiel de son linéaire… sauf sur le plateau de Ceillac où il reçoit le Mélezet.
- **Cône de déjection** du Guil à Guillestre. Dans cet ultime tronçon, le Guil retrouve une pente d'équilibre avant de confluer avec la Durance. Celle-ci est influencée par les apports du Cristillan en amont, les apports du Chagne et les évolutions de la Durance en aval. Le Chagne présente sur l'essentiel de son linéaire une pente forte et un lit pavé, sauf dans son cours terminal.
- **Chagne sur son cône de déjection** avec une réduction de pente régulière et étonnamment importante. Cette particularité suggère un lit non alluvionnaire dans la partie amont du cône de déjection. Ce point est détaillé au paragraphe 5.3.4.1 page 108.

4.3.3. Amont des Gorges d'Aiguilles

La figure suivante indique le profil en long du Guil dans ce tronçon :

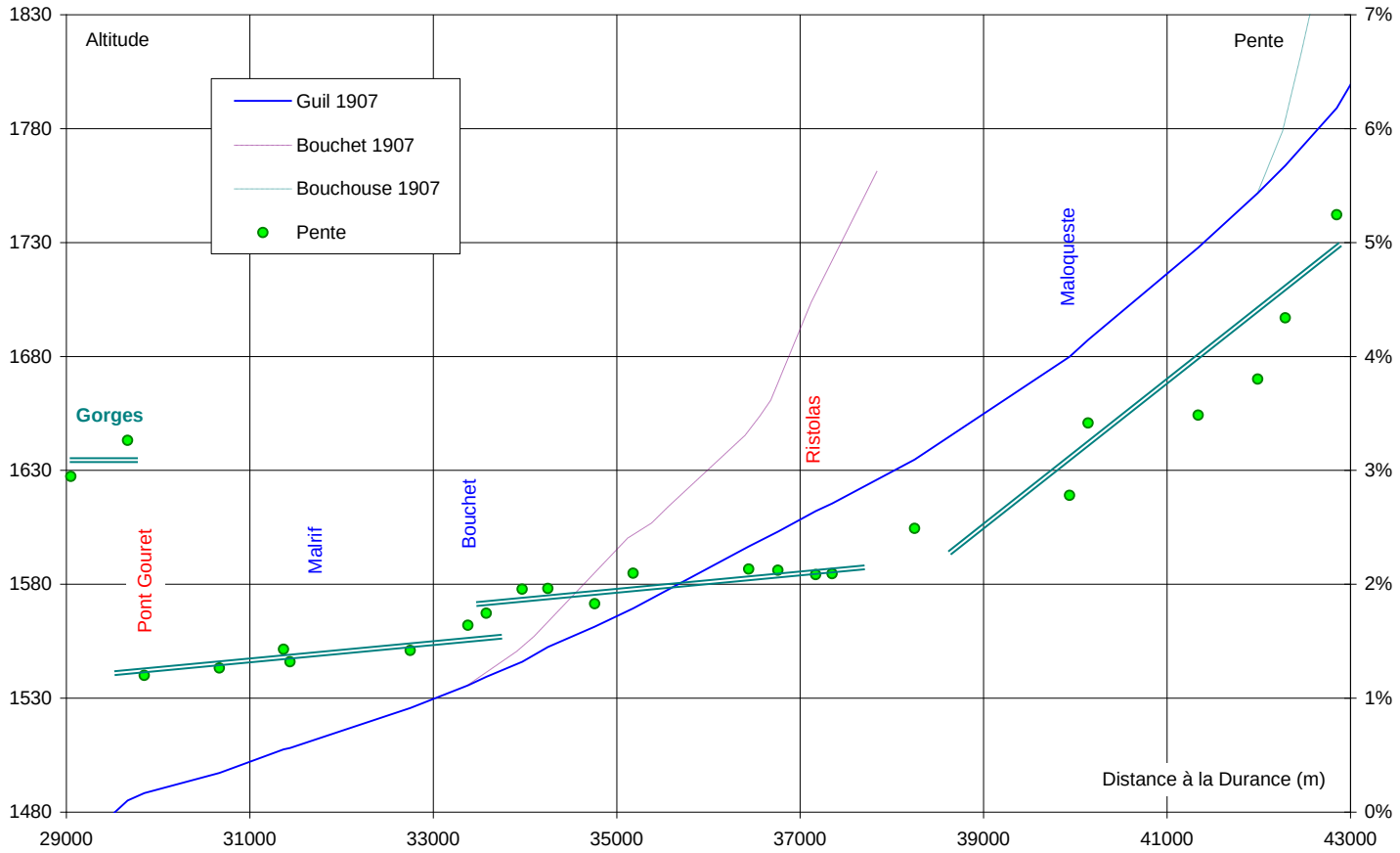


Figure 36 : Profil en long en amont du Gouret.

Ce graphique conduit aux résultats suivants :

- En amont de Ristolas, la pente diminue nettement, passant de 5 % à la Roche Écroulée à 2.5 % à Ristolas. En amont, le Guil sort des gorges situées en amont de la Roche Écroulée. Il est alors en "prise directe" avec les gorges. Cette situation explique un transport solide intense, une forte granulométrie des matériaux et donc une pente élevée en rapport avec un pavage partiel. Le torrent de Bouchouse, en aval immédiat de la Roche écroulée, présente des caractéristiques assez similaires mais constitue un apport liquide de premier ordre. En aval, les apports solides sont réduits et le Guil peut divaguer largement. Il y a donc une nette réduction de la pente d'équilibre. De plus, le Guil reçoit les apports liquides importants des versants. Ces eaux relativement peu chargées contribuent au transport solide et expliquent aussi que la pente diminue.
- En aval de Ristolas, la pente est beaucoup plus régulière et ne diminue que de 2.1 à 1.2 % au Gouret. Cette réduction de pente plus modérée indique que le phénomène prépondérant est le transit. Le Bouchet impose une faible réduction de la pente d'équilibre globale. Ce résultat n'est pas très surprenant si l'on remarque que le bassin versant du Bouchet couvre une superficie qui est plus de la moitié de celle du Guil en amont du confluent. Les deux rivières ont donc des comportements assez proches, même si le Bouchet est un peu plus raide sur son cône de déjection (2.8 %). Il n'apporte que des matériaux de taille relativement réduite. L'augmentation du débit liquide est ici prépondérante car elle permet un transport solide plus fréquent et donc une pente d'équilibre plus faible pour assurer la continuité du transport.
- L'entrée des gorges d'Aiguilles se caractérise par des pentes beaucoup plus fortes en aval de la prise d'eau pour la centrale électrique. Les phénomènes sont alors totalement différents avec un fort pavage. Les évolutions récentes dans cette zone sont analysées par la suite.

4.3.4. Traversée d'Aiguilles et gorges amont et aval

La figure suivante correspond au profil en long dans ce secteur :

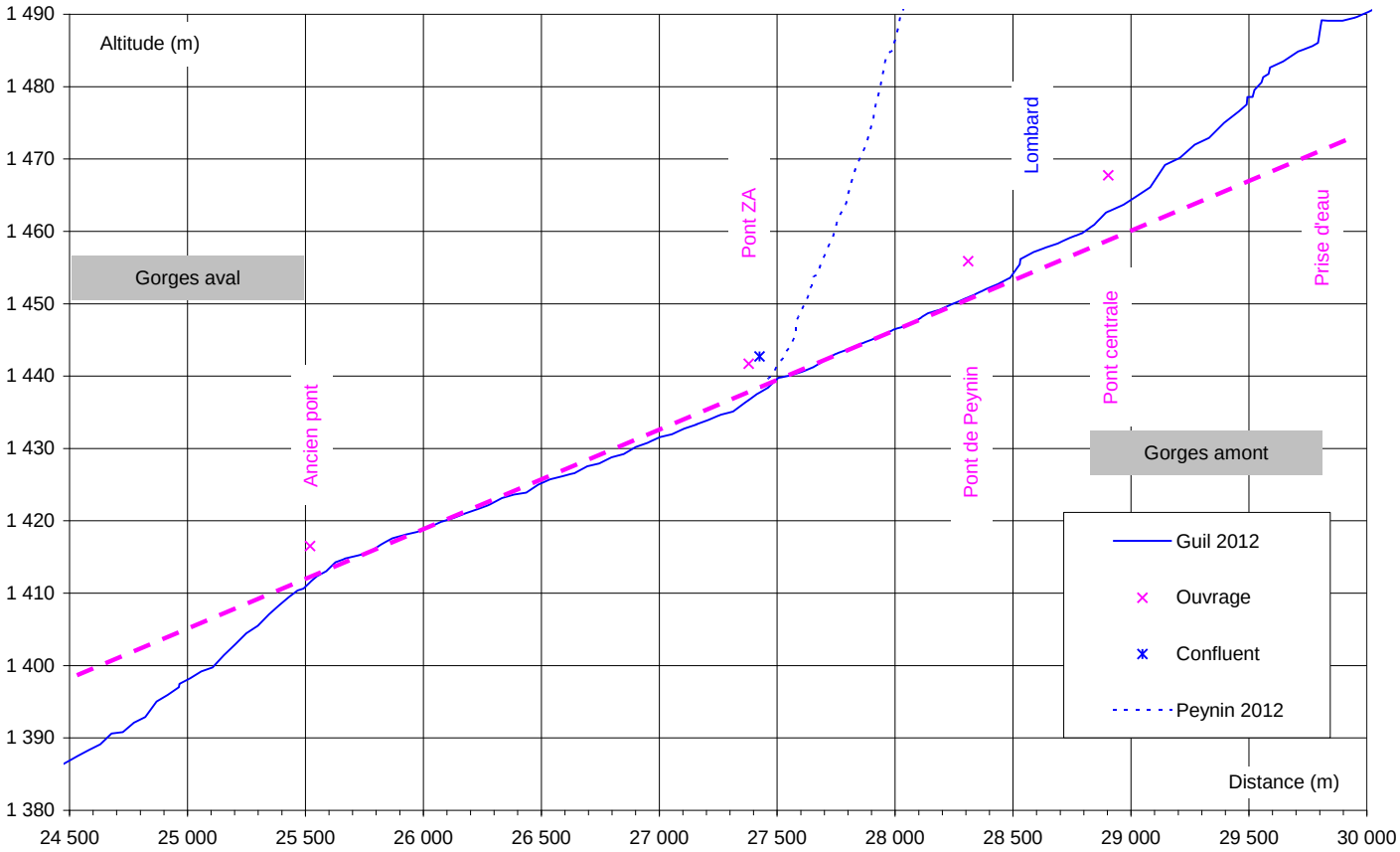


Figure 37 : Profil en long dans la traversée d'Aiguilles.

Les gorges qui bornent la plaine d'Aiguilles se traduisent évidemment par des tronçons à forte pente, le lit y étant pavé. Le trait pointillé indique la pente globale dans la zone alluvionnaire… nettement inférieure à celle des gorges.

La plaine d'Aiguilles débute dès l'aval de la centrale électrique. Le profil en long montre que la pente est régulière dans l'ensemble de la traversée. Elle est de l'ordre de 1.4 %, soit exactement la pente que l'on observe en amont, au droit du Gouret.

Les deux affluents majeurs n'ont alors qu'une très faible influence sur le profil en long. Seul le Peynin impose des irrégularités, vraisemblablement liées à la respiration au confluent avec le torrent.

Le vieux pont matérialise l'entrée des gorges de Ville Vieille. La pente y augmente nettement pour approcher 3 %, le lit étant de nouveau pavé par des blocs.

4.3.5. Plaine de Château Queyras

Cette plaine présente une structure comparable à celle d'Aiguilles, entre les gorges de Ville Vieille et le défilé très étroit de Château Queyras. Le profil en long suivant correspond à ce tronçon :

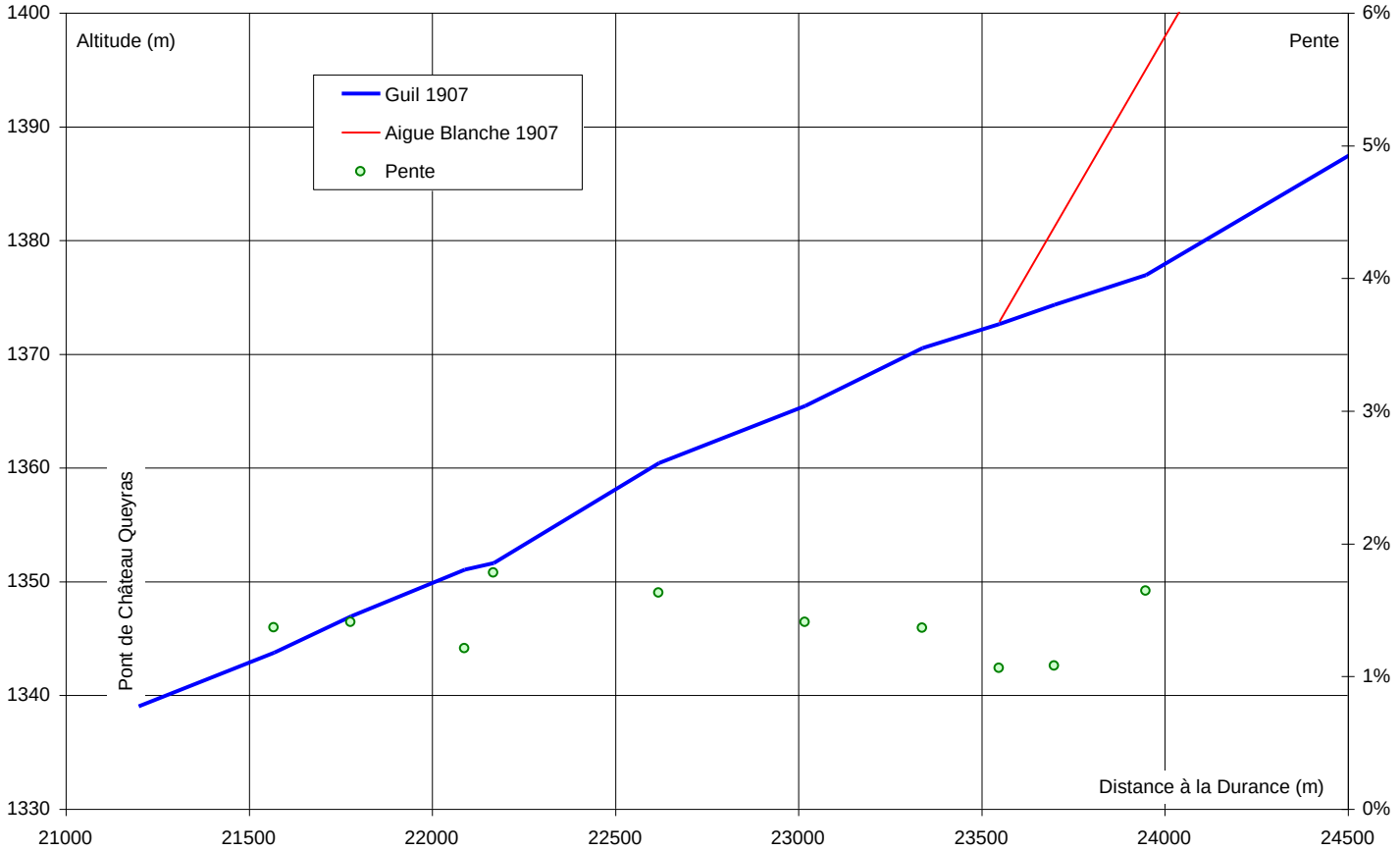


Figure 38 : Profil en long du Guil à Château Queyras.

Ce tronçon montre une pente globalement très régulière. Il apparaît cependant un gonflement du profil en long dans la zone de confluence qui pourrait correspondre à une reprise seulement partielle des matériaux grossiers apportés par l'Aigue Blanche mais surtout au torrent de Platenq, aujourd'hui corrigé, qui semble avoir été l'élément prépondérant sur l'évolution du profil en long du Guil.

En aval de ces confluences, la pente est plus faible qu'en amont, ce qui correspond, là encore, à une augmentation du débit liquide par l'Aigue Blanche et de la fréquence du transport solide par charriage et donc une réduction de la pente d'équilibre.

Dans l'ensemble, sur une longue période, le phénomène prépondérant est donc le transit même si des évolutions locales et temporaires du lit peuvent prendre ici une ampleur remarquable, la crue de 1957 ayant été ici formidable.

4.3.6. La Combe du Queyras

Il s'agit d'un secteur où les influences extérieures sont prépondérantes avec un pavage du lit du Guil. Ainsi, le profil en long est nettement plus chahuté qu'en amont, la pente étant dictée par les apports de blocs, les apports de laves torrentielles ou les affleurements de substratum, a priori sans rapport direct avec le fonctionnement du Guil et son transport solide.

La figure suivante indique les caractéristiques principales du profil en long dans ce tronçon :

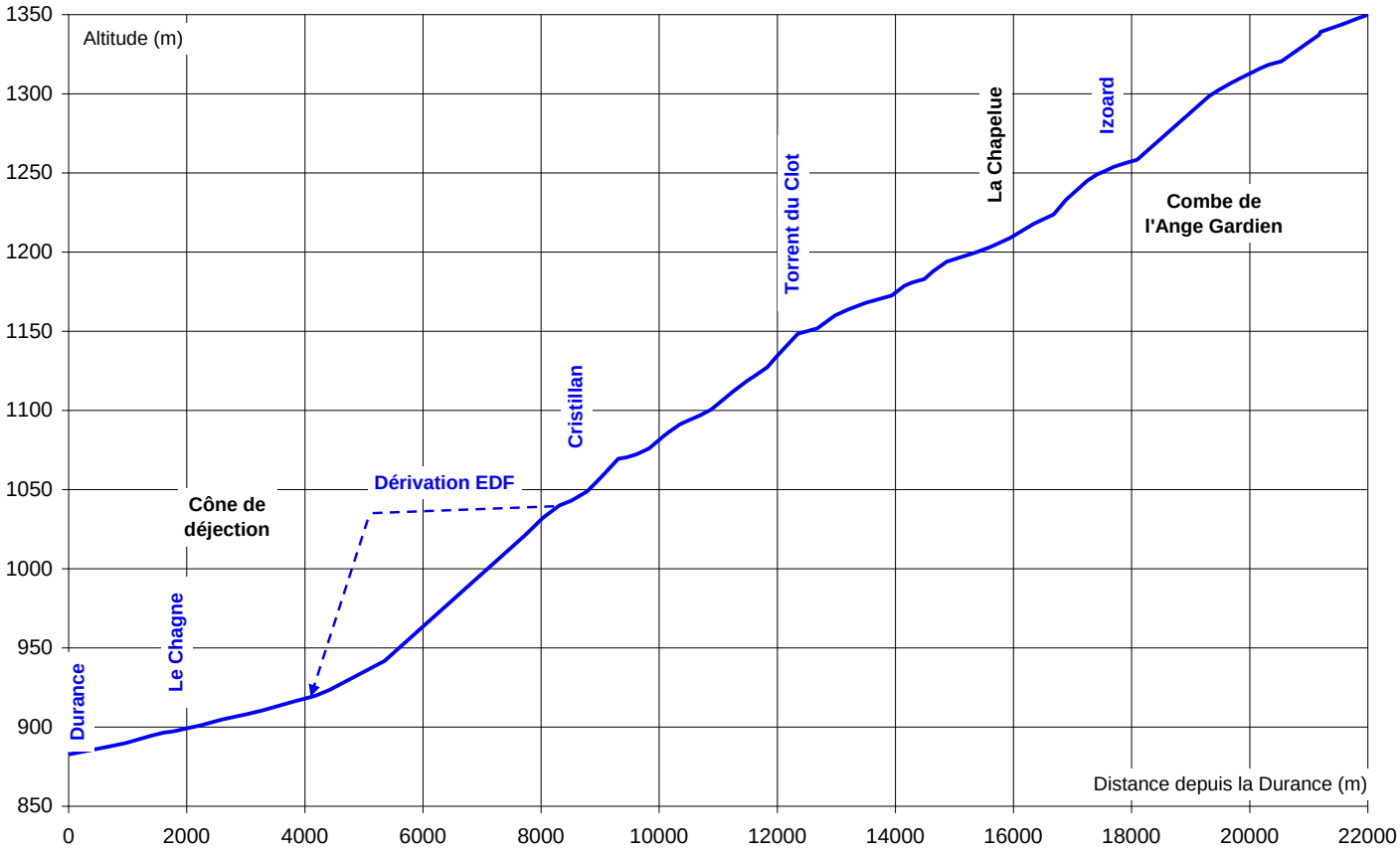


Figure 39 : Profil en long du Guil dans la Combe du Queyras.

Ce profil en long permet de mettre en évidence les particularités suivantes :

- La pente est toujours forte, mais peu de secteurs se distinguent par des valeurs très fortes : le Guil possède une puissance suffisante pour assurer un lissage de la pente, même lorsque le substratum affleure ou que les rochers éboulés pavent la rivière.
- Le lit étant pavé et très structuré dans l'ensemble, les mouvements de lit sont exceptionnels et concentrés dans certaines plaines alluvionnaires. C'est le cas, par exemple en aval de la Chapelue ou en dessous de la confluence avec le torrent d'Izoard.
- Le secteur à plus forte pente correspond aux gorges aval, en aval de la Maison du Roy. Il n'est pas surprenant que le principal aménagement hydroélectrique exploite ce tronçon.
- Ces caractéristiques expliquent que le phénomène prépondérant dans ce tronçon soit le transit, c'est à dire que les apports au sommet du cône de déjection correspondent au transit à Château Queyras augmenté des apports latéraux (principalement le torrent d'Izoard et le Cristillan).

4.3.7. Basse vallée et cône de déjection du Guil

Au débouché des gorges, le Guil retrouve un lit alluvial en équilibre avec les apports solides grossiers. La pente du lit s'établit autour de 1% (plaine du Simoust, jusqu'au confluent du Chagne), puis diminue progressivement pour atteindre 0.8% à l'arrivée dans la Durance.

Deux éléments - complémentaires - expliquent cette réduction de pente

- Un effet de tri granulométrique sur le cône de déjection du Guil.
- Les apports liquides du Chagne qui - une fois encore - augmentent le débit liquide et donc la fréquence du transport solide. Cela entraine une réduction de la pente d'équilibre.

La figure suivante montre le profil en long du Guil dans son cours inférieur :

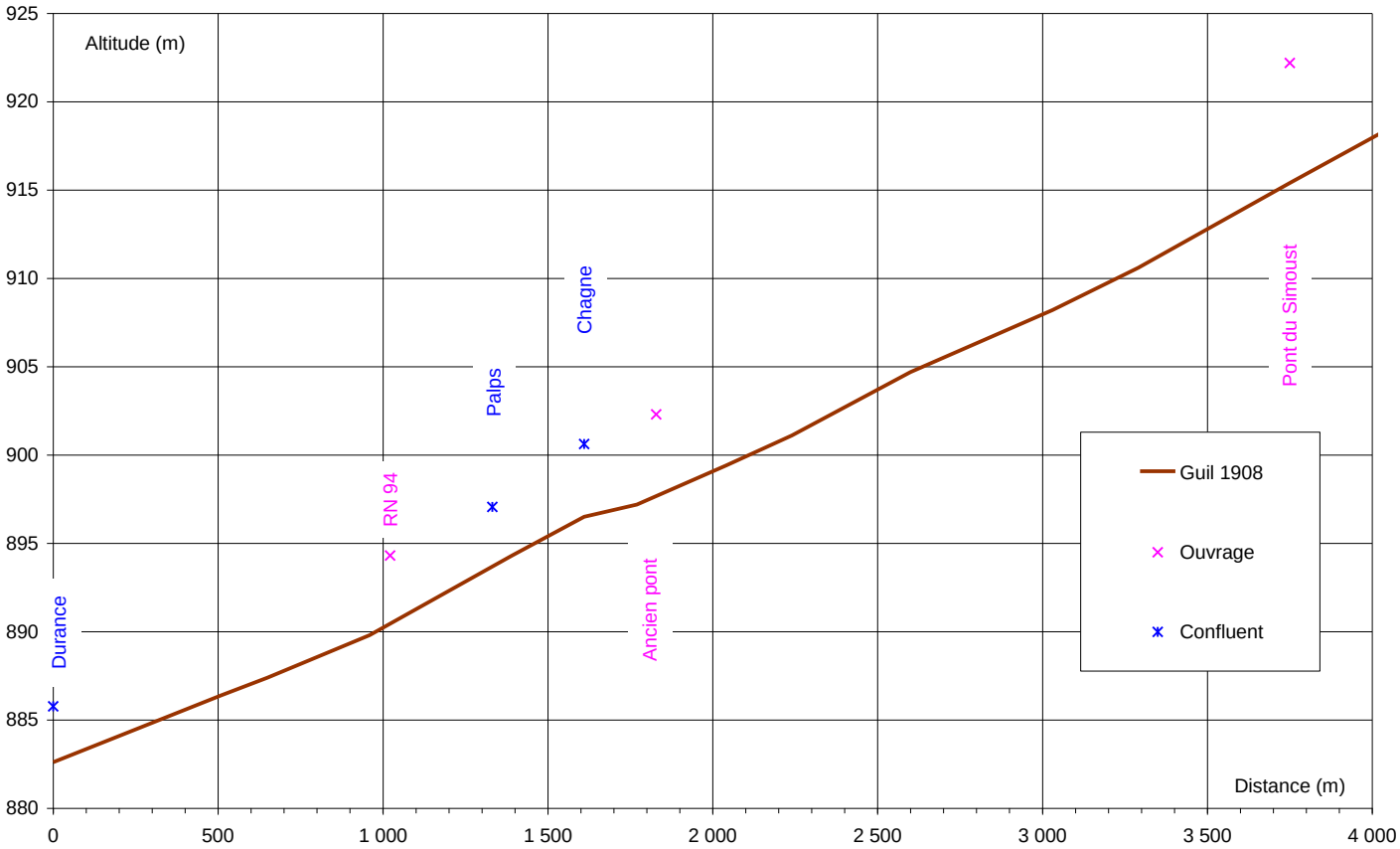


Figure 40 : Profil en long du Guil sur son cône de déjection.

4.3.8. Ségure à Ristolas

La vue suivante montre le profil en long du torrent de Ségure qui conflue avec le Guil à Ristolas :

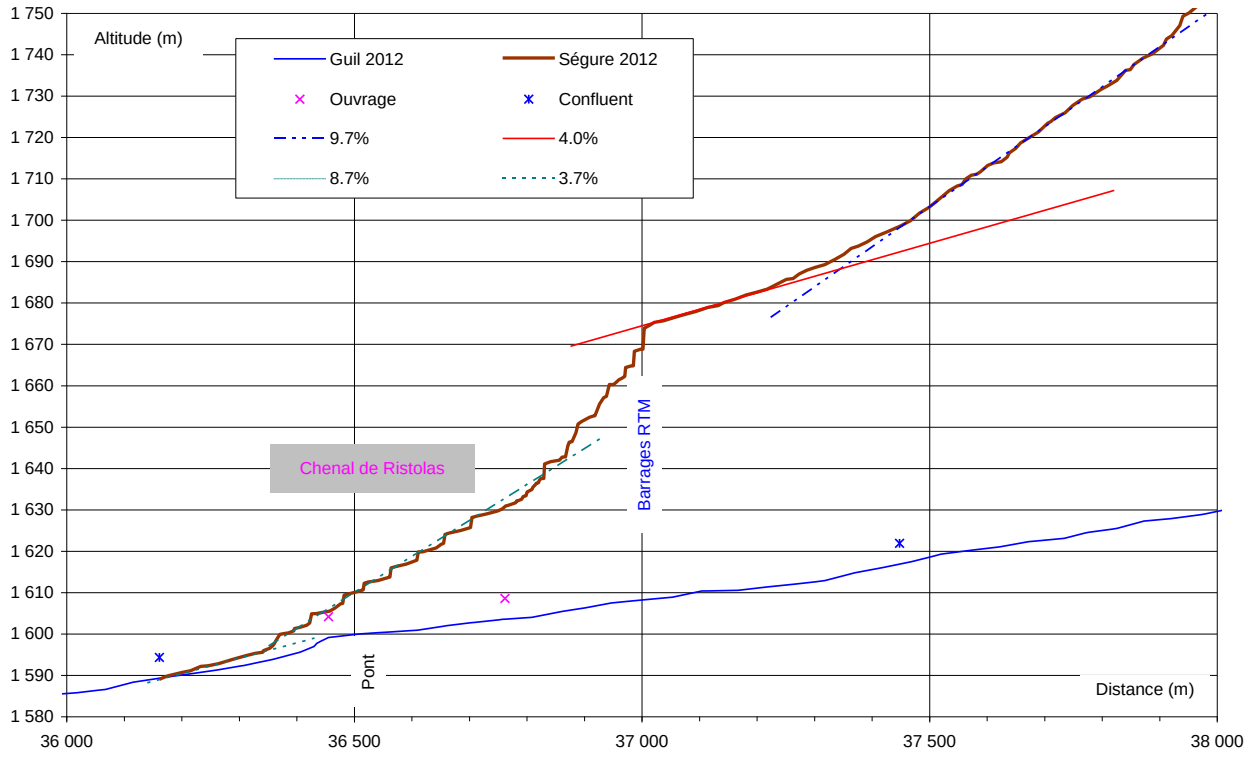


Figure 41 : Profil en long du torrent de Ségure.

Il n'existe pas - pour ce torrent - de profil en long ancien qui pourrait fournir une base de comparaison. Celle-ci serait d'un intérêt limité car après la crue catastrophique de 1957 sur ce torrent, ce dernier a été lourdement équipé avec un chenal qui impose un nouveau tracé sur l'ensemble du cône de déjection.

Ce chenal est fixé par une série de seuils, nettement visibles sur le profil en long. La pente moyenne est alors de 8.7 %, mais il est difficile de considérer qu'il s'agisse de la pente moyenne du cône de déjection et encore moins de la pente d'équilibre.

En aval du chenal et jusqu'à la confluence avec le Guil, le torrent présente une pente de 3.7 %. Ce tronçon est alluvionnaire, mais en juin 2000 il avait connu un dépôt important, et il parait très vraisemblable qu'une crue très chargée comme en 1957 conduise à un dépôt très massif. Cette pente de 3.7 % parait un minorant de la pente d'équilibre lors des fortes crues de ce torrent (mais pas des périodes ordinaires).

En amont du confluent, le torrent traverse des gorges raides, avec un glissement de terrain important. Une série de barrages RTM stabilisent le lit dans cette zone. Le plus important de ces barrages - à 1670 m d'altitude - crée une zone alluvionnaire marquée.

La zone alluvionnaire présente une pente de 4 %, qui correspond au fonctionnement ordinaire du torrent. Il s'agit vraisemblablement d'un minorant des apports solides lors des fortes crues. En amont, la pente est de 9.7 %, mais le lit est partiellement pavé.

La pente d'équilibre du transport solide de Ségure lors des crues extrêmes parait proche de 4.5 % mais sa détermination est très difficile et imprécise car dépendante de l'érosion dans le bassin versant.

4.3.9. Bouchet en aval du Roux

En amont du Roux, le Bouchet traverse des gorges raides où l'érosion est localement très active. Le profil en long traduit alors les influences extérieures plus que le fonctionnement de cet affluent. Par contre, à partir de la confluence avec la Montette, le lit est plus alluvionnaire.

La figure suivante est un profil en long du fil d'eau d'étiage du Bouchet en aval du Roux :

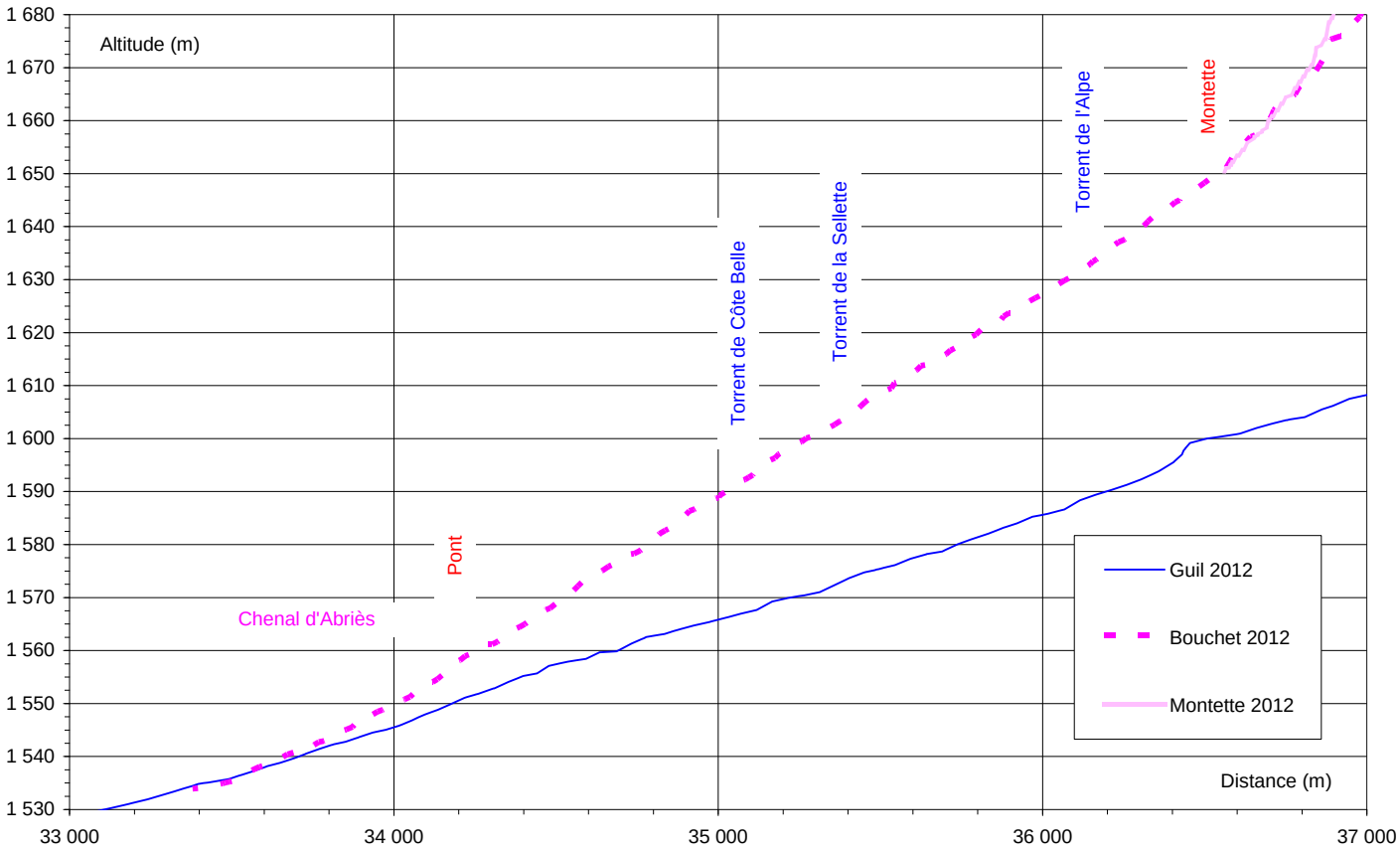


Figure 42 : Profil en long du Bouchet en aval du Roux.

Cette figure montre qu'il est possible de distinguer quatre secteurs :

- La zone de confluence, très raide, avec une pente de 4.7 %. Ce secteur où le lit est large s'étend jusqu'à l'amont de l'Oratoire St Joseph. Les divagations dans ce tronçon sont importantes, en lien avec les fluctuations d'apports solides par les affluents.
- Le secteur intermédiaire présente une pente de seulement 3.5 %. Le lit est plus étroit mais reste intégralement alluvionnaire. Il est probable que des dépôts se produisent dans ce tronçon.
- Le secteur aval est très influencé par la présence de substratum rocheux sur les berges mais aussi quelquefois sur le fond. La pente est alors de 3.7 %.
- Le cône de déjection correspond au chenal de la traversée d'Abriès. La pente n'y est plus que de 2.7 %. Il s'agit d'une zone de dépôt naturelle du Bouchet. C'est d'ailleurs dans ce secteur que les matériaux se sont déposés lors des dernières crues.

4.3.10. Peynin à Aiguilles

Le profil en long suivant indique les niveaux en 1999 - avant les crues - et les niveaux levés en 2012 :

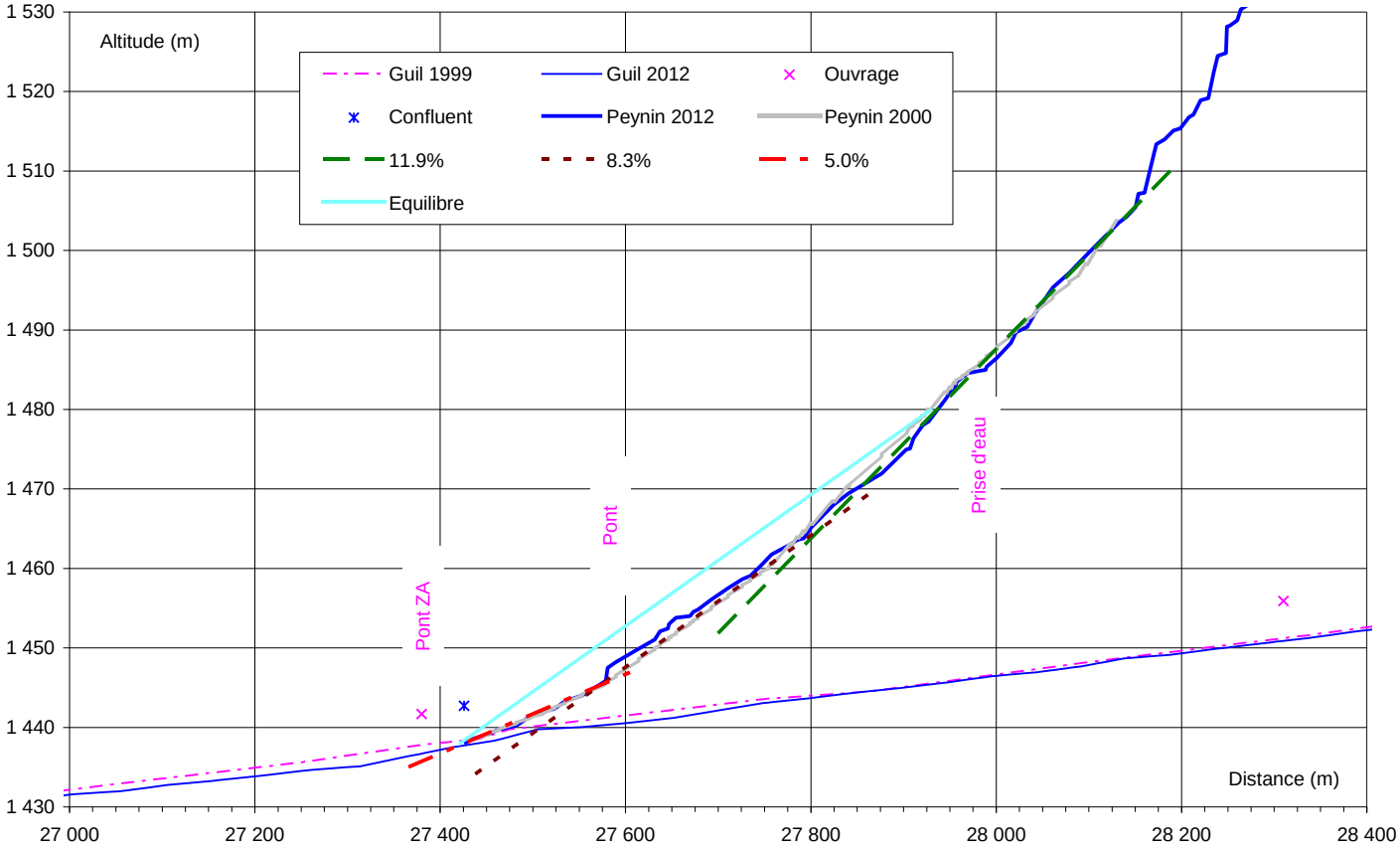


Figure 43 : Profil en long du Peynin en 1999 et 2012.

Ce profil en long montre que les évolutions du lit sur une décennie sont faibles. Ce constat n'apporte pas d'éléments sur le fonctionnement du Peynin, mais plutôt sur la réalisation des curages. Les principaux écarts sont liés à des aménagements, avec notamment, de l'amont vers l'aval :

- La prise d'eau au sommet du cône de déjection,
- Le passage à gué actuel,
- L'ancien pont qui constitue une remontée très importante des niveaux. Ses culées constituent un obstacle lors des fortes crues - au contraire des points précédents - mais devrait être prochainement détruit.

Le profil en long ci-dessous permet de dégager trois pentes sur le cône de déjection :

- Une pente de 11.9 % au sommet du cône de déjection, le lit étant partiellement pavé.
- Une pente de 8.3 % dans la partie centrale du cône de déjection. Cette pente couvre la zone des dépôts lors de la crue de 2000 et correspond à la pente d'équilibre.

- Une pente de 5 % dans le cours terminal qui permet le rattrapage du niveau du Guil depuis un lit particulièrement - et artificiellement - encaissé sur le cône de déjection. C'est ici que débute le dépôt de matériaux.

La photo suivante montre l'engravement généralisé après la crue de juin 2000, la stabilité des profils en long parait alors très illusoire :

Photo 5 : Engravement généralisé du Peynin après la crue de Juin 2000.

Cette photo montre un dépôt avec une pente proche de la pente dans la partie centrale du cône de déjection, ce qui montre que la pente d'équilibre lors de cette crue était de l'ordre de 8.3 %, comme dans ce tronçon central.

La crue de juin 2000 ne présente pas de forte particularité du point de vue du transport solide (zone d'érosion exceptionnelle, dépôt massif dans le bassin versant…). De plus, la pente des dépôts lors de cette crue est cohérente avec la morphologie du cône de déjection. Cette pente d'équilibre peut être retenue pour les prochaines crues.

Le graphique de la page précédente montre un niveau d'équilibre vers lequel temps le Peynin avec une pente de 8.3 %. Ce profil en long correspond très bien au niveau observé en 2000.

4.3.11. Aigue Blanche

Le graphique suivant indique le profil en long de l'Aigue Blanche et de l'Aigue Agnelle levé en 2012 :

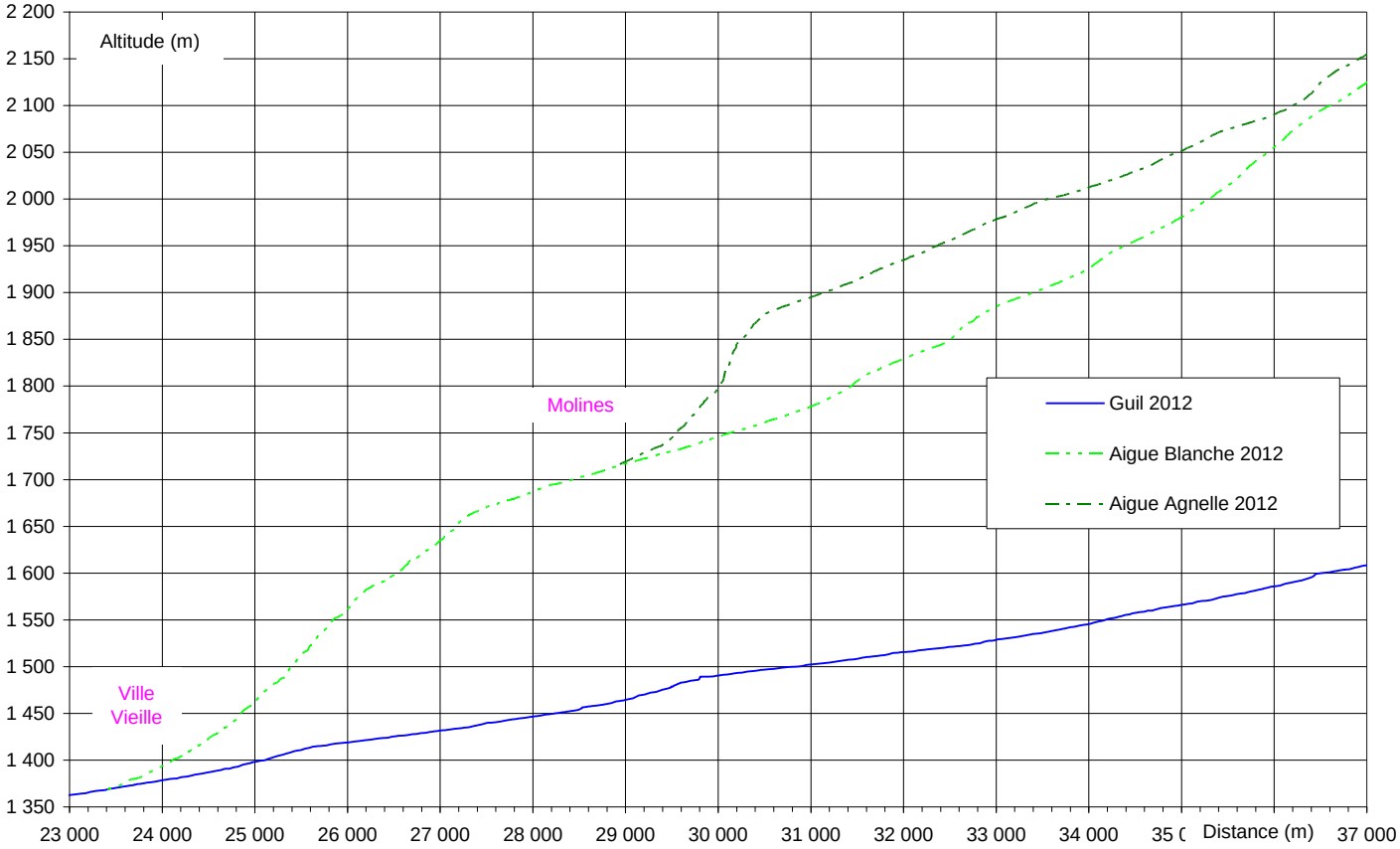


Figure 44 : Profil en long de l'Aigue Blanche et de l'Aigue Agnelle.

Ce graphique met en évidence les éléments suivants :

- L'Aigue Blanche montre dans son cours amont une pente globalement régulière mais localement perturbée par les confluences avec les torrents actifs de la rive gauche. Cette pente devient très régulière en amont de la confluence avec l'Aigue Agnelle en l'absence d'affluent majeur.
- En amont de Pierre Grosse, l'Aigue Agnelle présente une pente remarquablement constante - et forte - qui traduit un transport solide important mais très régulé. En aval, elle franchit des gorges de raccordement avec la vallée principale dans lesquelles le lit est pavé. Le "cône de déjection" entre ces gorges et l'Aigue Blanche est pavé dans la partie amont avant de retrouver la forte pente de la partie amont avec un lit quasiment alluvionnaire.
- À la confluence, les deux torrents présentent des pentes comparables. Cette pente modérée se prolonge jusque dans le secteur de la Rua où l'Aigue Blanche entre de nouveau dans des gorges de raccordement avec le Guil. Le lit y est ordinairement pavé, mais l'érosion y a sans doute été remarquable lors de la crue de 1957.
- Après un court cône de déjection, profondément modifié par la crue de 1957, l'Aigue Blanche conflue avec le Guil à Ville Vieille.

4.3.12. Torrent d'Izoard

Le graphique suivant indique le profil en long du Torrent d'Izoard et de ses principaux affluents :

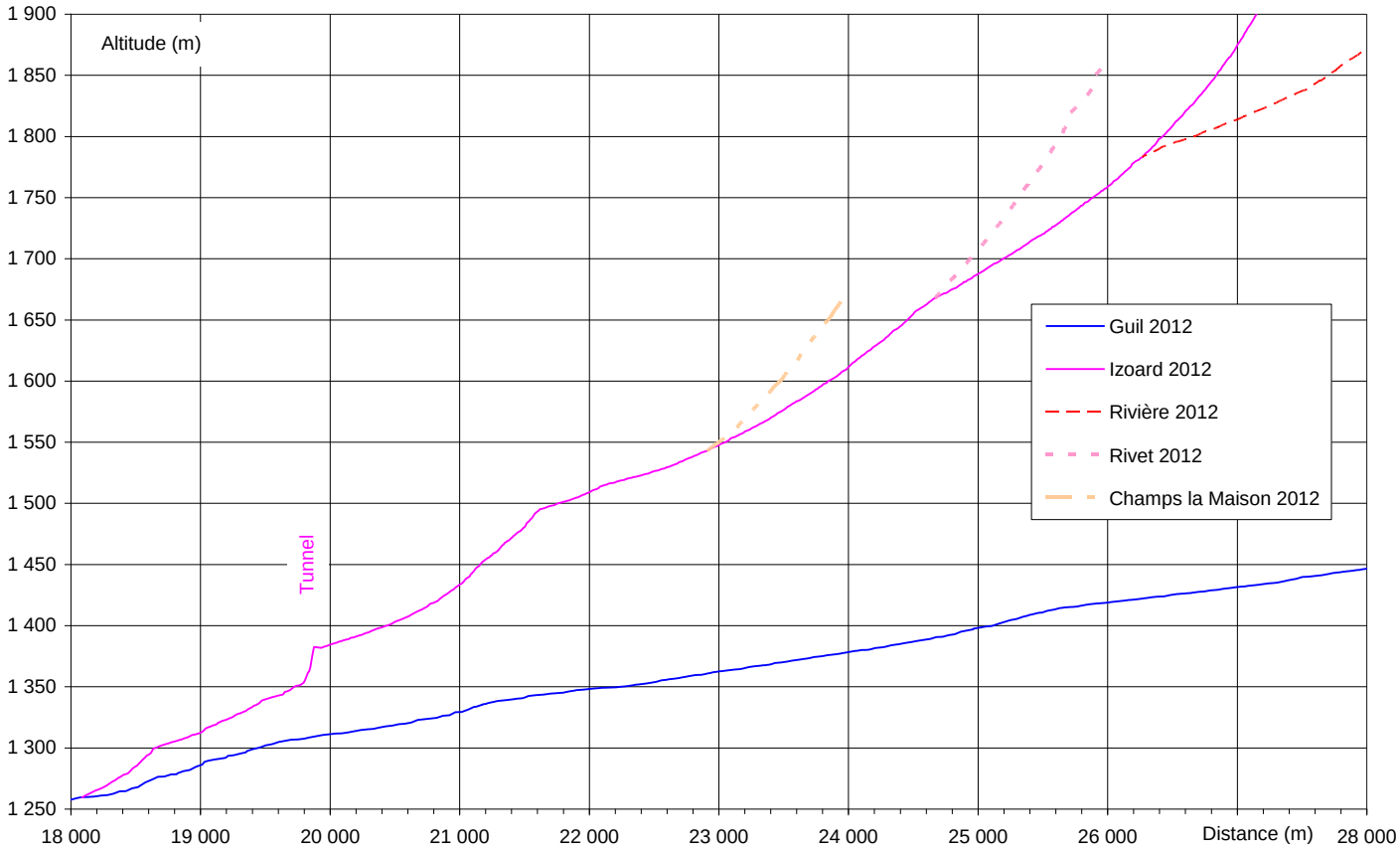


Figure 45 : Profil en long du torrent d'Izoard et de ses affluents.

Ce profil en long montre dans l'ensemble des tronçons de rivière avec une lente décroissance de pente, à l'exception - peut être - du torrent du Rivet dont la pente est plus régulière. Cette caractéristique traduit des bassins versants peu étendus et un tri granulométrique encore très actif. Le transport solide parait globalement modéré. Ce graphique montre les éléments suivants :

- La forte pente du torrent d'Izoard dans sa partie amont et notamment dans le secteur de la confluence avec le torrent de la Rivière. Cela traduit une forte activité de la partie amont de ce torrent, notamment dans le secteur de la Casse Déserte.
- La pente plus réduite du torrent de la Rivière qui correspond à un transport solide plus faible.
- La pente soutenue du torrent du Rivet et surtout l'augmentation de pente dans le secteur de la confluence. Cette augmentation de pente du torrent d'Izoard correspond aux apports volumineux et grossiers par les laves torrentielles du torrent du Rivet.
- Au contraire, le torrent de Champs la Maison présente une pente plus faible et les apports plus régulés et plus fins sont repris sans accroissement de pente par le torrent d'Izoard.
- Dans la partie aval, les pentes sont très variables ce qui traduit la traversée de gorges et même une chute au droit du tunnel de Déserteur, sous la route de Villardgaudin.
- Le "cône de déjection" est particulièrement raide et semble pavé, compliquant une quantification des apports solides.

4.3.13. Cristillan à Ceillac

Il est possible de distinguer deux tronçons très différents le long du Cristillan :

- La plaine de Ceillac avec une pente relativement faible, favorisant les dépôts de matériaux. Ce secteur est détaillé ci-dessous.
- Les gorges aval à très forte pente entre l'aval de Ceillac et le confluent avec le Guil à la Maison du Roy. Dans ce cas, il n'y a jamais d'équilibre entre la capacité de transport et les apports amont, ceux ci étant – heureusement – nettement plus faibles. Ce tronçon peut transporter des quantités de matériaux extrêmement importantes en aval, à l'image de ce qui s'est passé en 1957. L'érosion sur les versants – surtout en rive gauche – est alors particulièrement importante et de nombreux torrents affluents apportent des laves torrentielles. La route est évidemment très menacée dans ce tronçon.

La figure suivante est un profil en long des torrents à proximité de Ceillac :

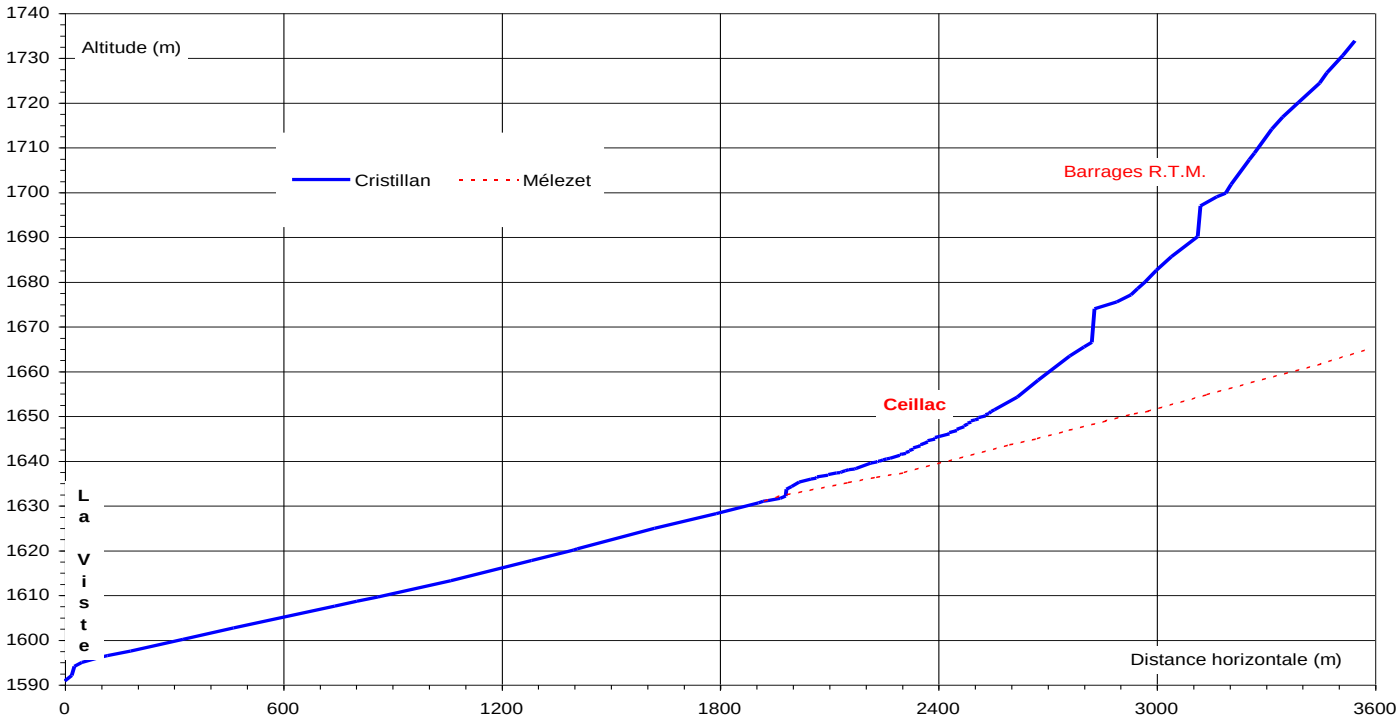


Figure 46 : Profils en long du Cristillan à proximité de Ceillac.

Cette figure met nettement en évidence la différence entre les deux torrents :

- Le Cristillan amont est caractérisé par de fortes pentes, même sur les atterrissements en amont des barrages, qui ne sont pas représentatives du transport solide. Le cône de déjection présente une pente forte (3 à 5 %), représentative d'un transport solide important. La réduction de pente est marquée, ce qui explique les dépôts massifs lors des fortes crues.
- Le Mélezet présente un profil en long beaucoup plus régulier et une pente faible, significative d'un transport solide modéré et peu variable sur l'ensemble de la zone.
- Le Cristillan aval présente une pente très régulière de l'ordre de 2 % jusqu'au défilé de la Vistre qui marque l'entrée du tronçon à très forte pente. Dans ce tronçon régulier, la tendance au dépôt est relativement réduite, car les dépôts se produisent préférentiellement dans le secteur du confluent avec le Mélezet, c'est à dire dans le village historique de Ceillac.

4.3.14. Le Chagne

Le Chagne présente un lit à forte pente sur l'ensemble de son linéaire. Outre les affluents à fort transport solide - au premier desquels apparaît le Chagnon - l'érosion est intense dans les gorges et le RTM a réalisé localement une déviation dans un tunnel pour prévenir l'érosion d'un glissement de terrain. La figure suivante montre le profil en long du Chagne sur l'ensemble de son cours ainsi que ceux de ses principaux affluents :

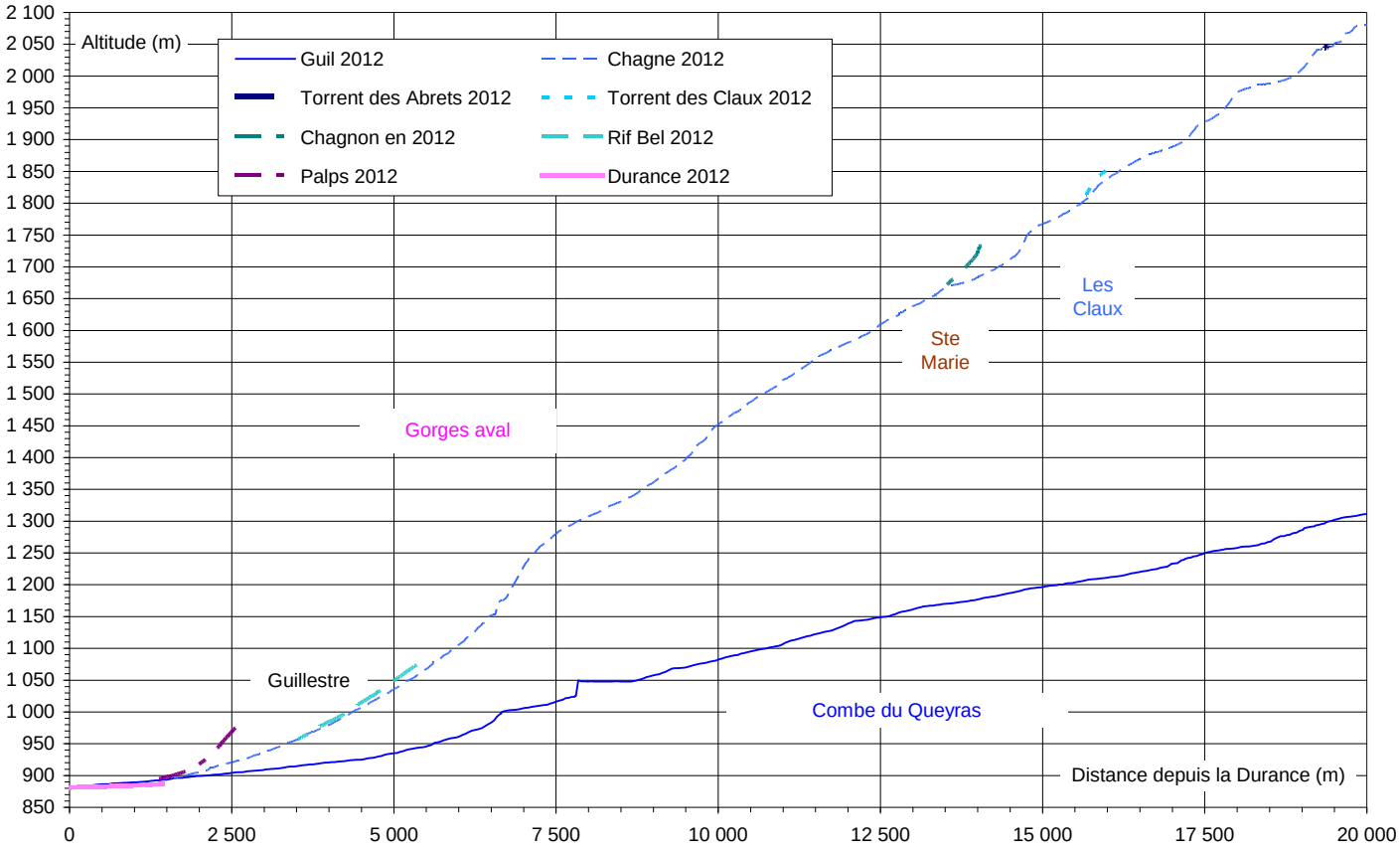


Figure 47 : Profil en long général du Chagne.

Ce profil en long met en évidence de fortes variations de pente sur l'ensemble du linéaire. L'effet du Chagnon à Ste Marie - mais aussi du glissement de terrain du Ruinas - est clairement visible mais il est ensuite noyé dans les fortes pentes des gorges qui séparent Vars de Guillestre.

La pente très forte dans les gorges - entre 1150 et 1250 m d'altitude, témoigne d'une érosion qui a été très intense. Cette forte pente permettrait, en cas d'érosion particulièrement active, des apports très importants sur le cône de déjection. Cela ne semble plus être le cas aujourd'hui.

La sortie des gorges peut être observée peu en amont de Guillestre et de la confluence avec le Rif Bel. Le Chagne arrive sur son "cône de déjection" avec une réduction de pente remarquable puisque celle-ci passe de 7 à 2 % environ comme le montre le graphique suivant :

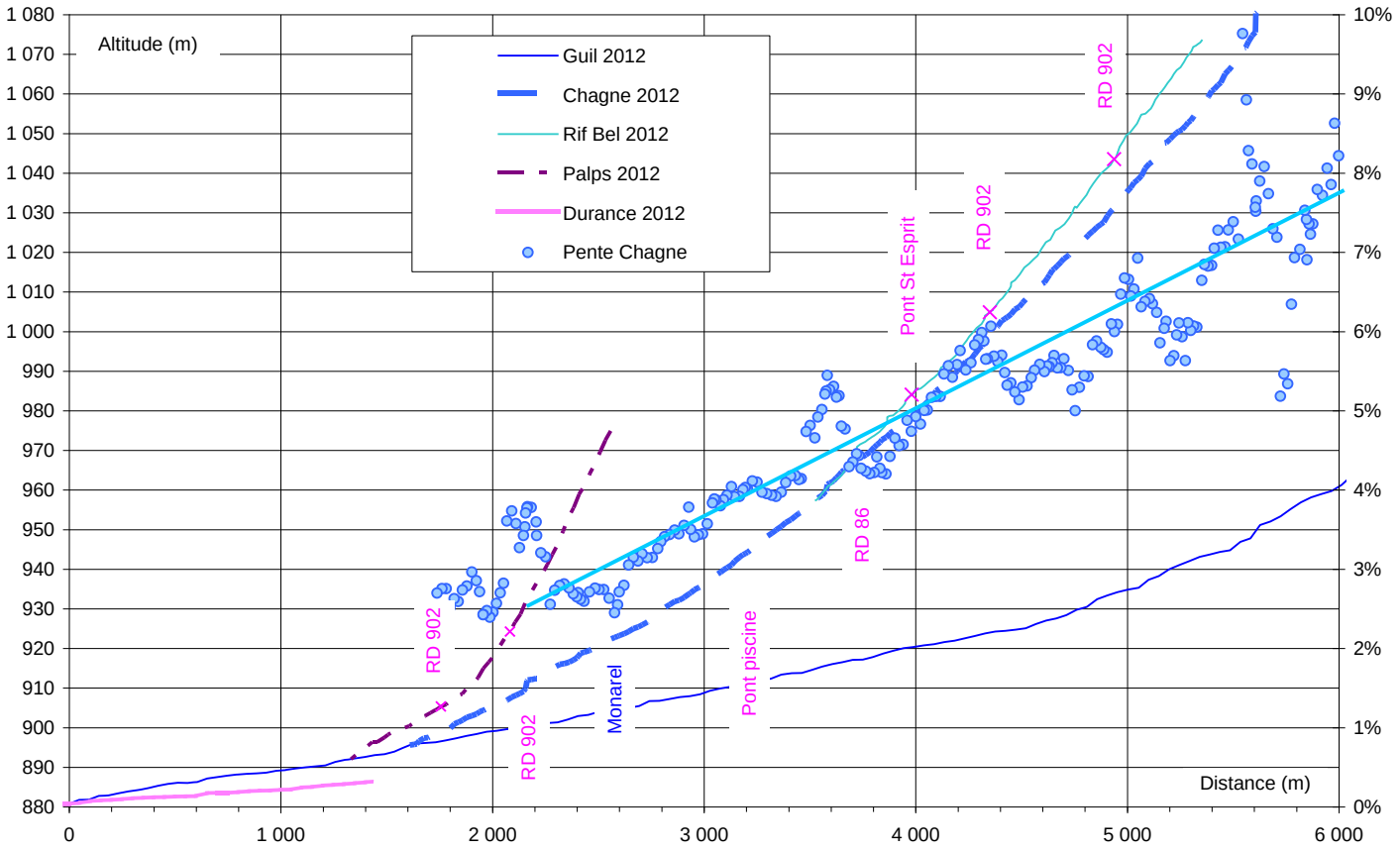


Figure 48 : Profil en long du Chagne du Rif Bel et du Palps à Guillestre.

Une réduction de pente aussi marquée ne correspond pas à un cône de déjection actif, et le lit parait pavé dans son cours supérieur. Ce point fera l'objet d'une analyse de détail par la suite au paragraphe 5.3.4.1 (page 108).

4.4. Évolution du lit

4.4.1. Objectif

Il est intéressant, à partir des éléments précédents, de comparer les profils en long existants et de mettre en évidence les évolutions depuis le début du siècle. Ce travail permet de mieux cerner l'effet des crues et de prévoir les évolutions probables lors des prochains événements.

La sectorisation mise en évidence précédemment est reprise ici mais avec une représentation plus détaillée afin de mettre en évidence les évolutions du lit.

Cette analyse est ici particulièrement intéressante car elle permet une comparaison précise des niveaux de 2001 et 2012.

4.4.2. Amont des Gorges d'Aiguilles

La figure suivante met en évidence l'évolution du lit en amont de Ristolas :

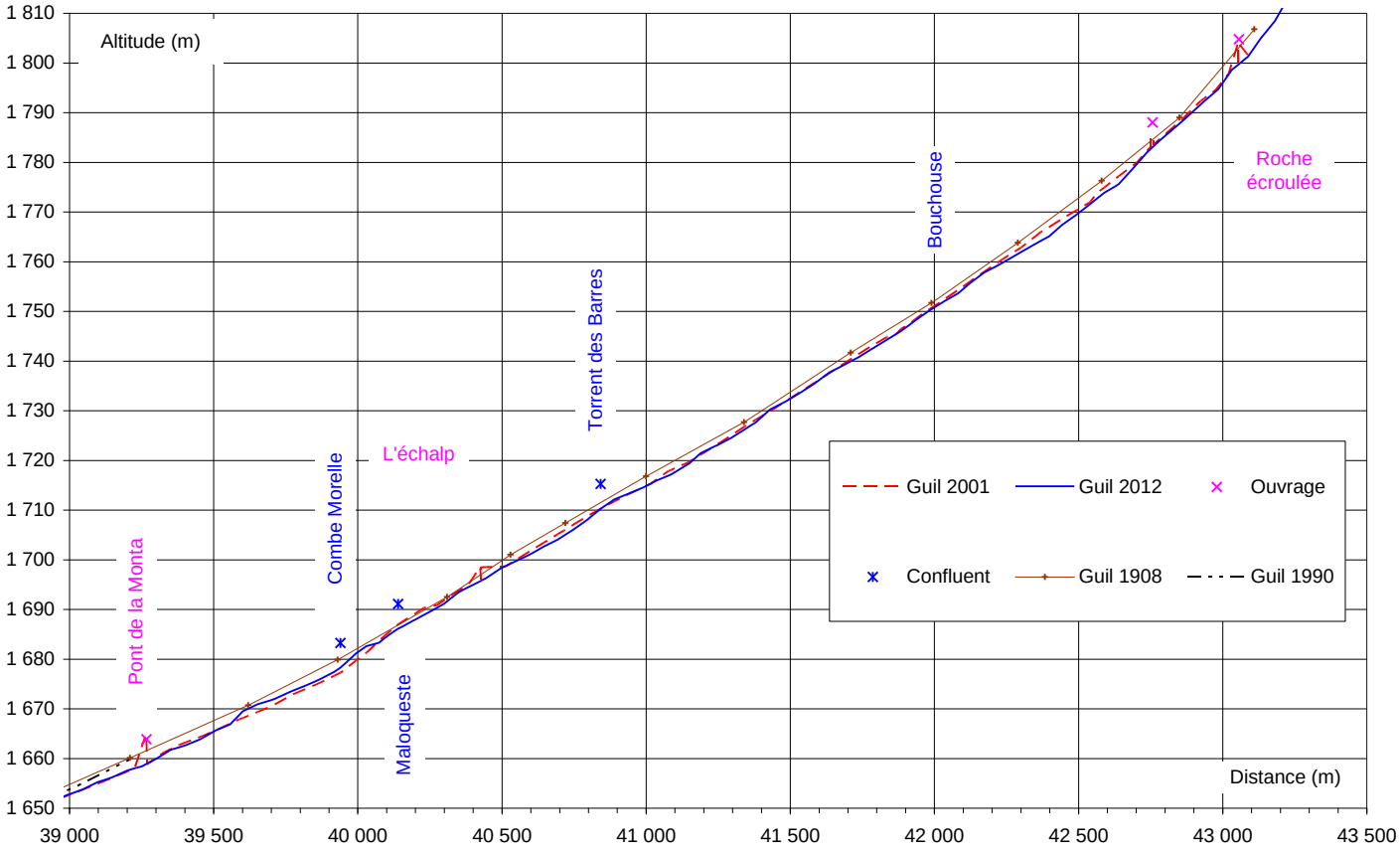


Figure 49 : Évolution du lit en amont de l'Échalp.

Les points de calage des abscisses sont assez rares, ce qui ne permet pas une comparaison précise des profils en long, sauf entre 2001 et 2012.

Néanmoins, plusieurs tendances peuvent être dégagées :

- Relative stabilité du lit en altitude en amont de l'Echalp. Il semblerait que le niveau en 1908 était supérieur au niveau actuel. Cela découle vraisemblablement de la difficulté de recaler ce profil en long ancien. Ce résultat montre cependant qu'il n'y a pas de tendance systématique à l'engravement du lit.
- L'évolution depuis 2001 est plus significative. Elle montre que globalement, **l'altitude du lit du Guil est très stable** sur le tronçon. Les principales évolutions sont les suivantes :
  - Faible enfoncement du lit entre la Roche Écroulée et le torrent de Bouchouse. Il s'agit plus de l'effet des travaux de rétablissement de la route que d'une tendance de fond.
  - Stabilité "parfaite" entre le torrent de Bouchouse et le torrent des Barres.
  - Légère tendance au creusement dans le secteur du parking de l'Échalp. Là encore, il s'agit vraisemblablement de l'effet localisé des travaux, mais les évolutions sont très réduites.
  - Faible remontée du lit en aval de la confluence avec le torrent de Maloqueste. Il s'agit vraisemblablement d'une influence des divagations dans cette zone et d'un niveau particulièrement bas en 2001 en aval du confluent avec la Combe Morel
  - Stabilité au pont de la Monta.

Il est intéressant d'analyser en détail les évolutions en amont du confluent avec le torrent de Ségure, Notamment à la suite de la rupture du pont aval et du seuil qui y est associé. La figure suivante correspond à un zoom dans ce secteur :

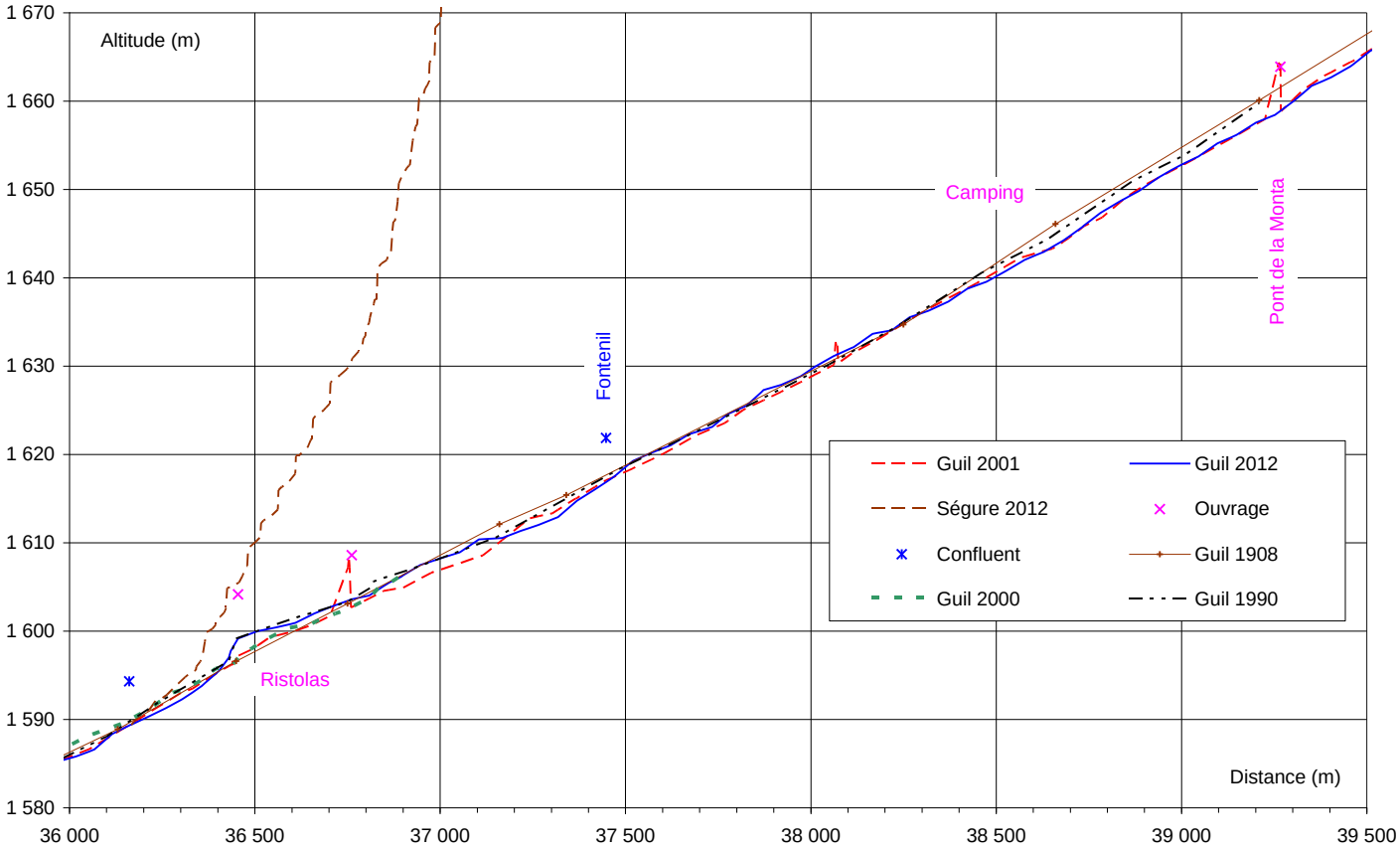


Figure 50 : Évolution du lit entre la Monta et Ristolas.

Ce graphique permet de mettre en évidence les évolutions suivantes :

- En aval du pont de la Monta, le lit est très stable depuis 2001. Par contre, il parait probable qu'il se soit sensiblement enfoncé depuis 1908 et même depuis 1990, même si l'écart sur le graphique est majoré par les incertitudes de calage. Les évolutions devraient être faibles dans ce secteur à moyen terme.
- En aval de la Monta, le camping du Chardonnet impose un rétrécissement très excessif du lit. Or, c'est dans cette zone que - classiquement - il est possible d'observer un creusement dans la zone étroite… et un dépôt en aval. Les évolutions restent cependant très modérées. Le lit est ensuite très stable jusqu'en amont de Ristolas, même par rapport au début du siècle. La figure suivante montre - de façon schématique - l'évolution du lit dans un secteur étroit lors des crues :

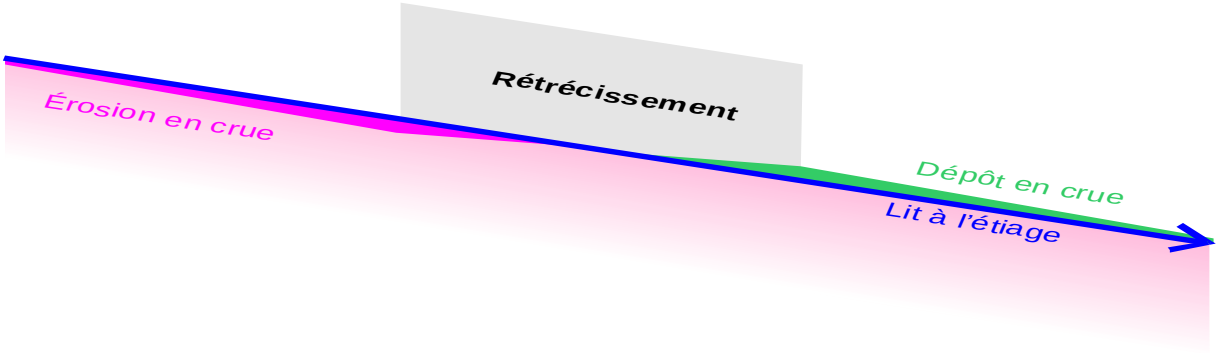


Figure 51 : Nouvelle pente d'équilibre en cas de réduction de la largeur du lit.

- Le lit en amont de Ristolas présente des variations importantes et difficiles à expliquer autrement que par un basculement du lit mineur suite aux travaux post-crue. Ces variations présentent vraisemblablement un coté aléatoire et artificiel, le dépôt depuis 2001 correspondant au surcreusement observé alors.
- Dans la traversée de Ristolas, l'élément prépondérant correspond à l'historique du seuil construit en aval du chenal :
  - En 1908, ce seuil n'existait pas - ni même le chenal. Le niveau du lit était donc particulièrement bas.
  - En 1990, le chenal ainsi que le seuil avaient été construits. Le chenal de la traversée de Ristolas était donc calé relativement haut, en rapport avec le niveau du Guil après la crue de 1957, particulièrement élevé suite aux apports massifs du transport solide de Ségure lors de cet épisode.
  - Lors de la crue de juin 2000, la rupture du seuil a entrainé un abaissement très net du lit visible sur les profils en long de juillet 2000 et de 2001. L'évolution du fond moyen était peu importante, l'écoulement s'étant surtout concentré le long du mur rive gauche. Le fond y a alors retrouvé le niveau de 1908.
  - La reconstruction du pont et du seuil a restauré le niveau de 1990 qui correspond quasiment parfaitement au niveau actuel. Ce niveau est stable et aucun engravement significatif n'est plus à craindre dans cette traversée en l'absence de crue extrême.
- Les évolutions de ce seuil ont causé des variations localement importantes du fond en aval immédiat. Le niveau actuel est particulièrement bas et une remontée parait probable.
- Dans la zone de confluence avec le torrent de Ségure, la grande largeur du lit permet de limiter les respirations du lit lors des crues du torrent.

La figure suivante met en évidence l'évolution d'ensemble entre Ristolas et l'aval d'Abriès :

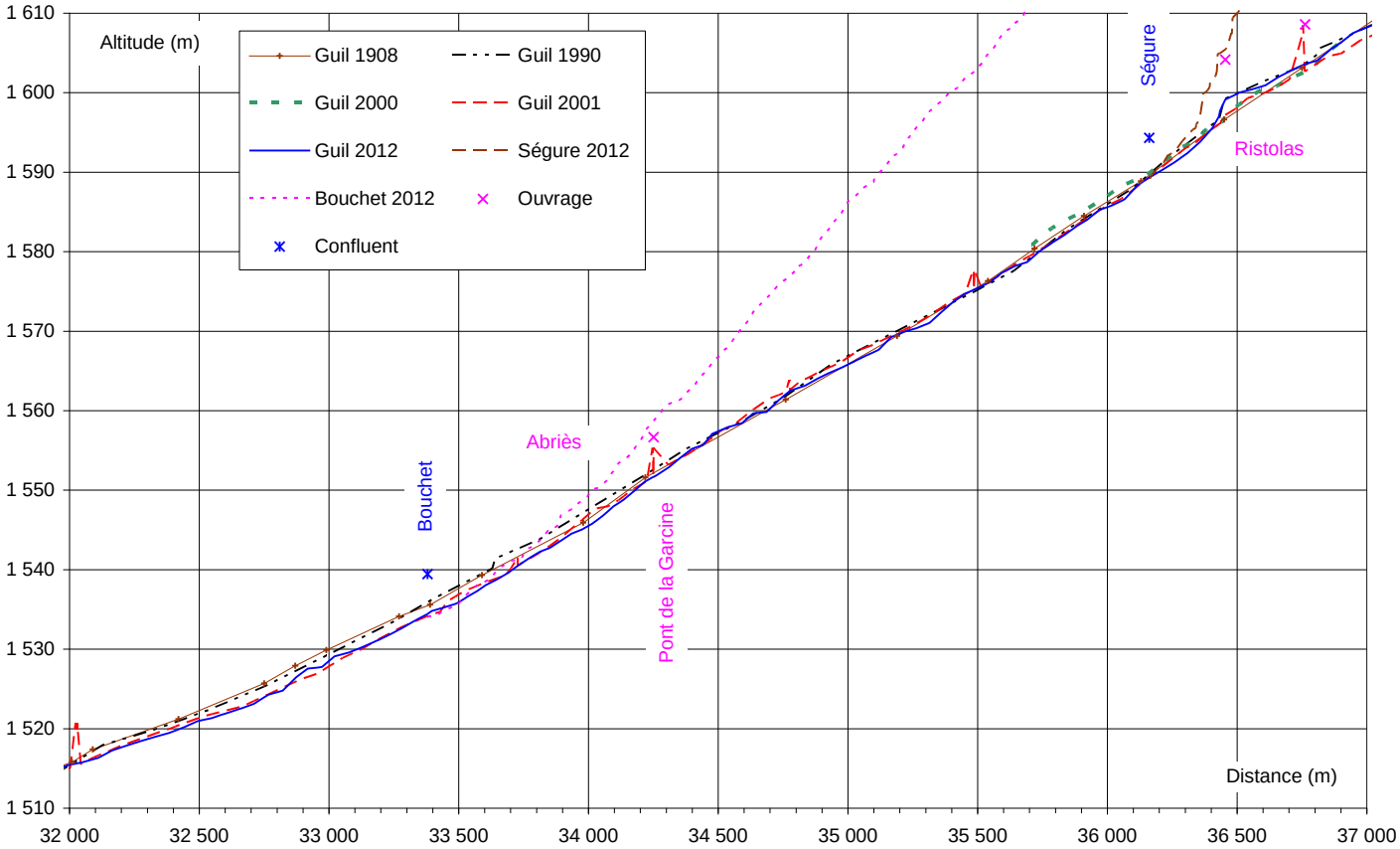


Figure 52 : Évolution du lit dans le secteur d'Abriès.

Il est possible de distinguer plusieurs tronçons :

- Entre le confluent avec le torrent de Ségure et celui avec le Bouchet, le lit a peu évolué entre 1907 et 2001. Cela ne signifie pas qu'il soit resté stable entre l'après 1957 (particulièrement haut) et 1990. Un abaissement est probable sur cette période, ce qui explique la déstabilisation des protections de berges.
- Le secteur du plan d'eau en amont de la Garcine (détruit par les crues de 2000 et 2002) a connu un enfoncement important (en regard avec la stabilité générale), le niveau actuel étant proche de celui de 1907. Cette évolution est difficile à interpréter car ce secteur a connu des évolutions importantes du niveau et du tracé du lit.
- A l'amont immédiat du confluent avec le Bouchet, le lit a nettement baissé suite à la rupture du seuil du pont de Guillestre avec un abaissement de l'ordre de 2 mètres. Cet abaissement est nettement favorisé par celui que l'on observe au confluent avec le Bouchet. Une érosion régressive dans le secteur du pont de la Garcine n'est pas exclue à moyen terme, sauf si une crue du Bouchet génère un dépôt important à la confluence.
- Au confluent avec le Bouchet, le niveau du lit a connu des variations de niveau importantes. Il est actuellement très bas. Cela correspond plus aux curages réalisés dans ce tronçon suite à l'engravement observé lors des dernières fortes crues. Ce niveau devrait remonter progressivement en l'absence d'intervention. Cet engravement restera modéré en l'absence de forte crue du Bouchet (voir les modélisations numériques du paragraphe 6.2 page 122).

- En amont du Gouret, les évolutions sont plus faibles, cette zone correspondant à une régulation du transport solide. Ce n'est pas le cas dans la partie aval, où l'effet des gorges - et des ouvrages - devient prépondérant.

Le profil en long suivant correspond à la zone du Gouret, en amont du seuil de prise d'eau :

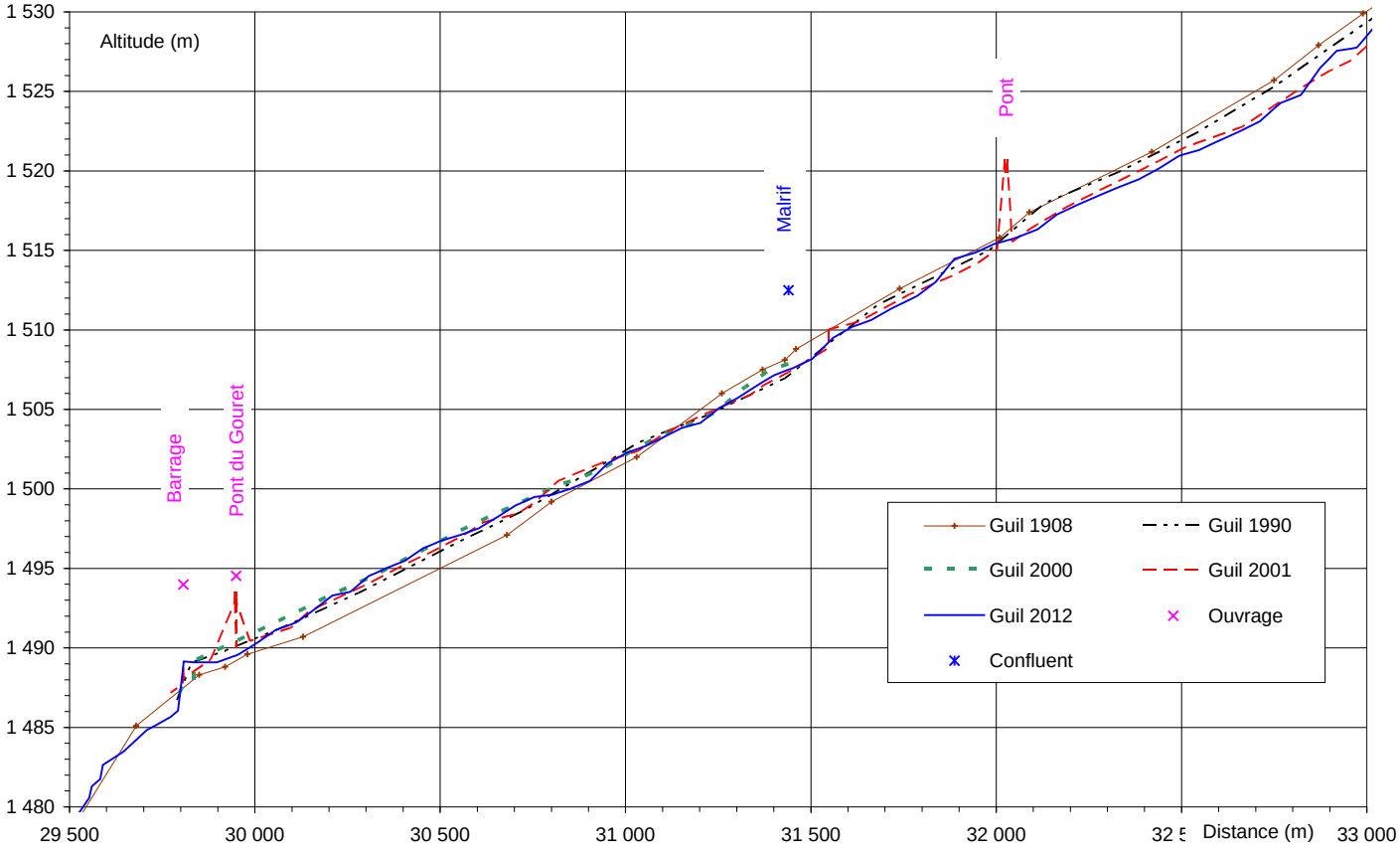


Figure 53 : Évolution des fonds dans le secteur du Gouret.

Les évolutions dans la partie aval du Gouret sont en lien avec le barrage de prise d'eau. Il est possible de reconstituer l'historique de cet aménagement :

- En 1907, il n'y avait pas de seuil de prise d'eau : les niveaux étaient alors particulièrement bas. Par la suite, une prise d'eau a été construite, plusieurs dizaines de mètres en aval de l'ouvrage actuel. Cette prise a été détruite par la crue de 1957.
- En 1990, le niveau du fond était nettement relevé à cause de ce seuil. La surélévation était de 0.5 à 1 mètre en moyenne. Cette surélévation était très marquée au droit du barrage mais remontait peu en amont.
- Lors de la crue de juin 2000, les débits liquides élevés ont entrainé une remontée importante des niveaux au droit de cet ouvrage. En effet, le pont et surtout le seuil de la prise d'eau offraient une largeur d'autant plus réduite que les arbres bloqués sur les ouvrages en limitaient la section. De plus, le volume solide transporté a été très important, permettant la propagation des dépôts en amont… notamment au droit du camping causant un débordement important. Les niveaux en juillet 2000 sont donc élevés, au droit du barrage mais aussi nettement en amont alors que d'importants curages avaient déjà été réalisés.

- Le profil en long de 2001 montre que la situation a peu évolué, à l'exception de la destruction – encore partielle – du seuil. Cette destruction a permis une reprise des matériaux en amont mais elle reste modérée. Ce n'est que si l'ensemble de la section avait été restaurée que l'auto curage du lit dans cette section aurait pu être efficace.
- Le barrage a été reconstruit après 2005. Il restaure la géométrie initiale à l'exception d'un petit clapet de surface sur une largeur de 11 mètres et une hauteur de 70 centimètres seulement d'après les plans qui nous ont été transmis par la commune. Ce clapet présente une section très faible par rapport à celle du barrage. En effet, il ne couvre qu'une fraction de la largeur alors que sa hauteur (70 centimètres) est faible par rapport à celle du barrage (3 mètres environ). À titre indicatif, la hauteur critique correspondant au débit centennal de 260 m^3/s est de 3.85 m. Ce calcul ne prend pas en compte l'écoulement sur les deux culées du barrage… ni celui sur la RD 947.
- Le profil en long de 2012 traduit l'effet du barrage et le remous qu'il cause en amont. Le niveau du droit du barrage, mais aussi 200 mètres en amont est le même que le niveau de 2000 après la crues de 2008… c'est-à-dire le plus haut connu dans cette zone. Cela montre que le nouveau barrage n'a apporté aucune amélioration sur le niveau d'équilibre par rapport à l'ouvrage initial. Par contre, un abaissement du lit est sensible de part et d'autre du pont du Gouret. Il s'agit d'une conséquence d'un curage - bien illusoire - réalisé peu avant le levé topographique, mais cette anomalie devrait être rapidement effacée par un dépôt de matériaux.

L'évolution des fonds dans les gorges d'Aiguilles est difficilement quantifiable, seul le levé de 1908 - très lâche - étant comparable avec celui de 2012.

Il parait établi que - depuis 1957 - le niveau du lit a nettement baissé, la quasi-totalité des seuils construits à l'époque ayant été détruite. Les crues récentes ont probablement favorisé un nouvel enfoncement, sans que celui-ci soit très important. L'enfoncement serait encore marqué lors de la crue de 2008.

Dans les gorges, le niveau est "tenu" par les gros blocs provenant des versants et les ouvrages réalisés le long de la route. Le niveau du lit n'est plus que le résultat de l'équilibre entre :

- Les apports de blocs provenant essentiellement des versants mais aussi des ouvrages. Seuls les matériaux grossiers sont influents ici et le transit ordinaire des graviers et des galets n'a qu'une influence marginale. Les volumes de blocs apportés sont très faibles et - aujourd'hui - ils ne proviennent plus que de la rive gauche.
- La déstabilisation de ces blocs - ou ouvrages - par les débits élevés lors des fortes crues. Outre le débit, la largeur joue un rôle important ici. La construction de la RD 947, puis la reconstruction de la conduite sur des massifs continus jouent un rôle défavorable sur la stabilité du site.

Ainsi, les très fortes crues ont tendance à baisser le lit alors qu'une recharge par les versants se produit lors des périodes de calme. La succession de crues depuis 2000 conduit naturellement à un enfoncement du lit. Il n'est pas certain qu'une période de calme suffise à obtenir une remontée significative de ce lit pavé.

4.4.3. Plaine d'Aiguilles

La figure suivante montre les différents profils en long à Aiguilles :

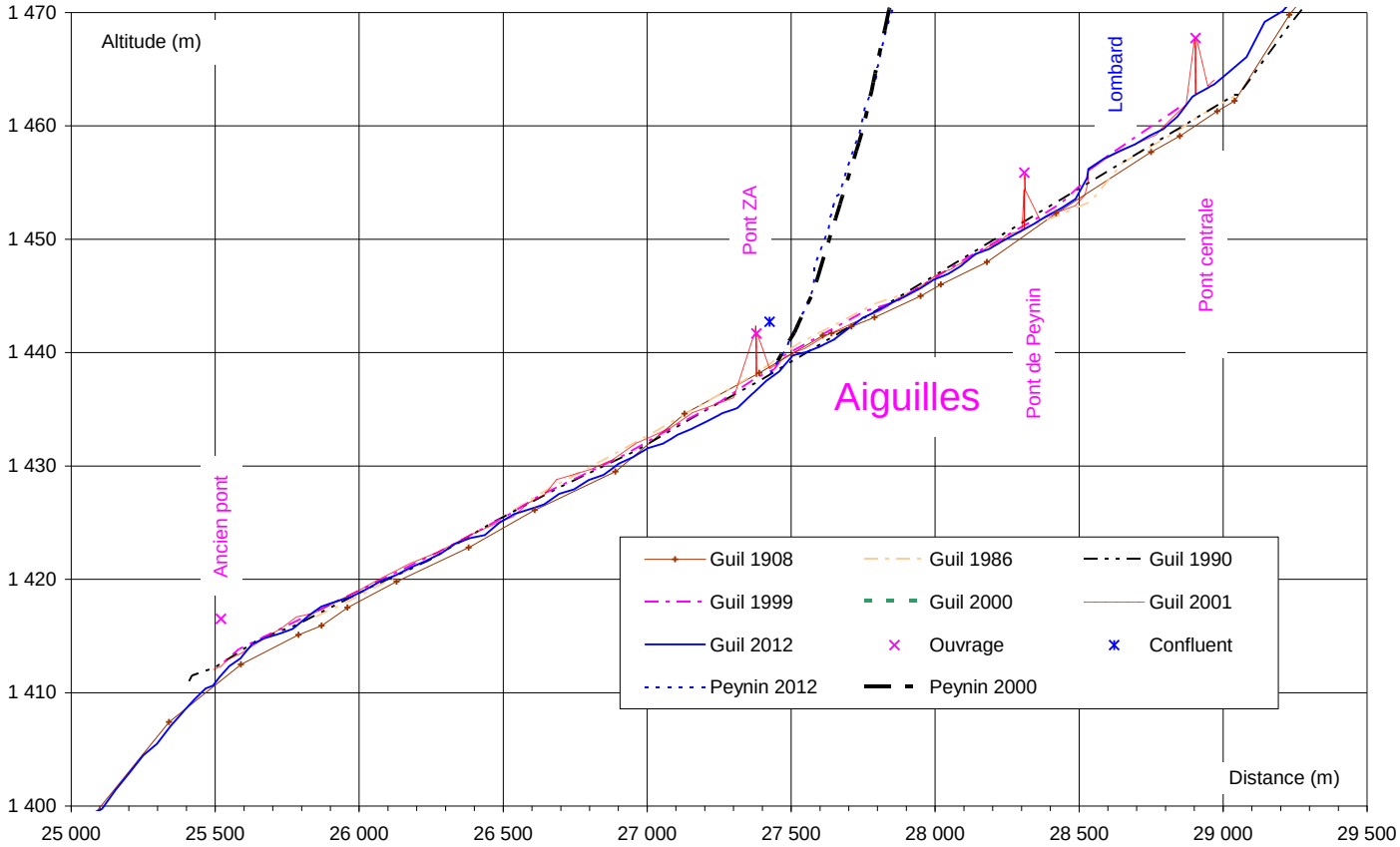


Figure 54 : Évolution des niveaux dans la traversée d'Aiguilles.

Ces profils en long montrent les évolutions dans la traversée d'Aiguilles depuis un siècle :

- Le remarquable ouvrage de la confluence du Lombard a été construit à la suite de la crue de 1957, vraisemblablement à un niveau proche du niveau du lit à la fin de la crue. Il montre donc que le lit s'était nettement engravé lors de cette crue, notamment sous l'effet des apports du Lombard, puisque l'ouvrage est calé près de 2 mètres au-dessus du niveau de 1907.
- Cet ouvrage présentait une chute de moins d'un mètre avant les crues de 2000. Il était déjà dégradé au niveau de son extrémité aval. Lors des crues de 2000, la hauteur de chute a augmenté et approche 2 mètres en 2001. Il s'agit avant tout du résultat du curage excessif dans la zone du pont de Peynin, après la crue d'octobre 2000. Cette évolution conduit à une dégradation augmentée et surtout accélérée du radier. Depuis 2001, et malgré l'absence de curage connu, le niveau du lit en aval de l'ouvrage n'a guère remonté. Ce radier devrait être aménagé pour faciliter le transit du poisson.
- Le pont de Peynin offre une section trop faible avec un contournement pour les plus fortes crues. Des engravements ont été observés lors des crues de 2000… combattus à l'excès par des curages après la crue. Globalement, le niveau parait stable dans cette zone.
- Au droit d'Aiguilles, le Guil longe le versant rive gauche. Les enjeux y sont faibles et le lit est stable sur le long terme.

- Dans la zone de la confluence avec le Peynin, les évolutions visibles sur les profils en long sont faibles, ce qui ne signifie pas qu'elles le soient aussi lors des crues. En effet, Les matériaux du Peynin sont relativement fins et donc facilement repris par le Guil après les crues. La crue d'octobre 2000, moyenne sur le Guil mais faible sur le Peynin, a sans doute joué un rôle prépondérant dans le lissage du profil en long dans ce tronçon. Le niveau actuel du lit est particulièrement bas et traduit des interventions dans le lit après les crues. La zone de confluence devrait connaître à moyen terme une érosion régressive provenant du curage réalisé en aval.
- En aval de la confluence avec le Peynin, le lit présentait un niveau globalement stable. Cependant, des curages récents auraient conduit à un enfoncement du lit marqué dans cette zone. Le lit actuel est calé un mètre plus bas que tous les autres profils. Une érosion régressive menace donc l'ensemble des ouvrages dans la zone de confluence et particulièrement le pont de la zone artisanale. L'ampleur de ce surcreusement parait cependant trop limitée pour menacer des ouvrages bien fondés. L'intérêt de ce curage dans une zone stable n'est pas évident.
- En aval du cône de déjection du Peynin, et jusqu'à l'entrée des gorges de Ville Vieille, le niveau est remarquablement constant lors de la dernière décennie - si l'on fait abstraction de l'effet des curages - malgré l'occurrence de deux fortes crues. Le profil en long de 1907 est nettement plus bas, mais il est probable qu'il s'agisse d'une erreur de calage des profils.

En aval de l'ancien pont, le Guil entre dans des gorges raides et pavées. L'évolution des fonds y est difficilement quantifiable, seul le levé de 1908 - très lâche - étant comparable avec celui de 2012. Il n'apparait pas d'évolution importante. Les enjeux sont ici très faibles.

4.4.4. Plaine de Château Queyras

Ce secteur à fait l'objet d'une analyse détaillée au paragraphe 6.4 page 141. Le graphique suivant met en évidence les évolutions dans ce tronçon depuis un siècle :

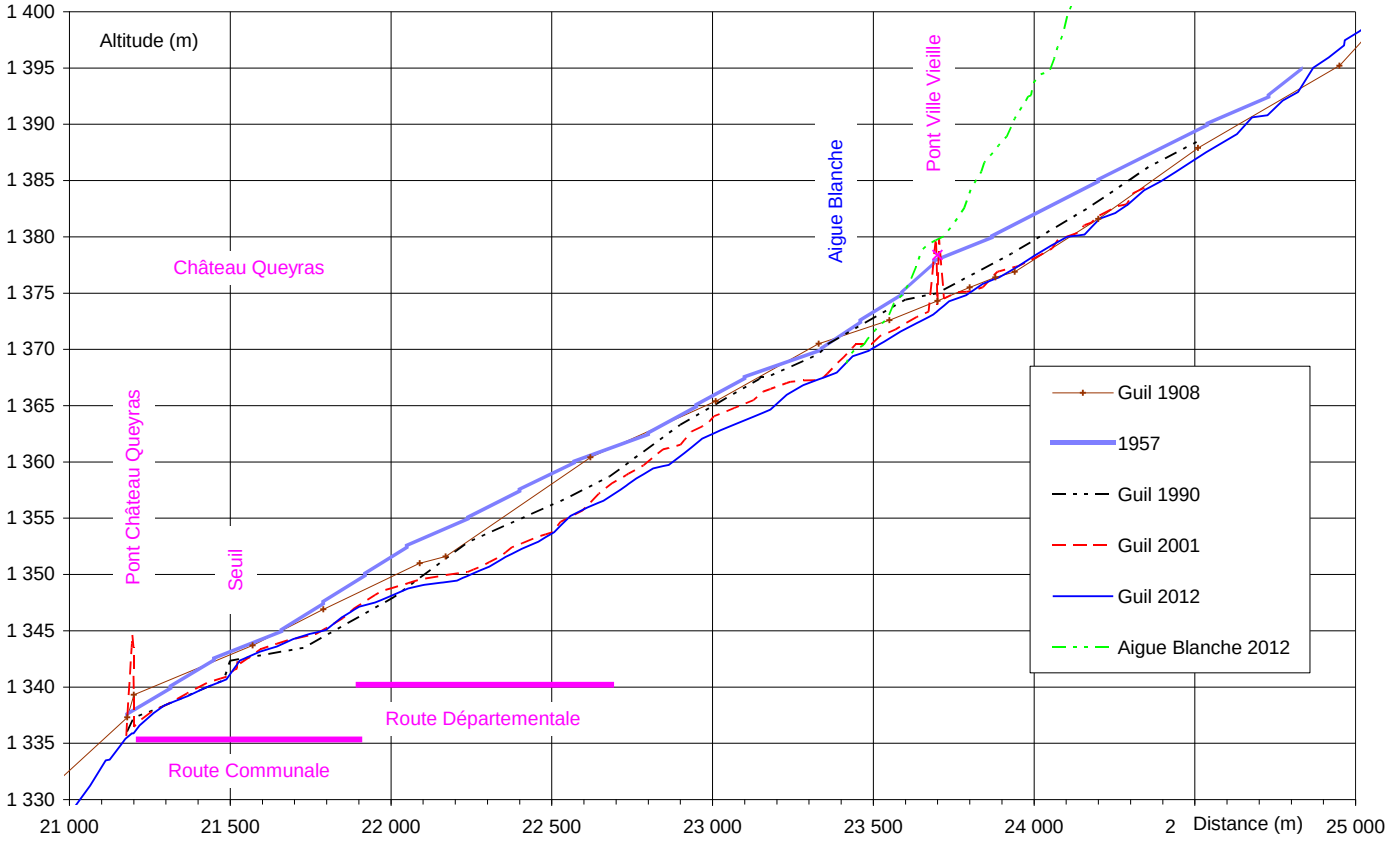


Figure 55 : Évolutions des profils en long dans la plaine de Château Queyras.

Ce profil en long met en évidence les évolutions suivantes :

- Le profil en long de 1907 présente un tracé très régulier avec – peut être – un léger gonflement au niveau du confluent avec l'Aigue Blanche et surtout du torrent de Platenq.
- Durant la crue de 1957, les niveaux sont très importants, pour deux causes essentielles :
  - Les apports de l'Aigue Blanche qui ont été énormes lors de cette crue. Ces apports expliquent une remontée du lit dans la zone de confluence (surtout au droit du pont actuel) d'au moins quatre mètres. Ils sont à rapprocher des dégâts considérables causés par cette crue à Ville Vieille. Ils ont évidemment contribué aux engravements très importants que l'on peut observer en aval.
  - Le rétrécissement au droit du Château Queyras, encore accru par le pont à l'entrée de la gorge et son obstruction au moins partielle. Le profil en long montre que le dépôt est de plus en plus important en approchant de ce verrou. Ce phénomène est détaillé lors de l'étude du secteur de Château Ville Vieille.
- Entre 1957 et 1990 (et même le début 2000), le phénomène de reprise se poursuit lentement en l'absence de forte crue. L'étude de 1990 indique que les affouillements d'ouvrage sont préoccupants dans ce tronçon. Un seuil a d'ailleurs été construit en amont du pont de Château Queyras.

- Les crues de 2000 (et surtout celle de juin) ont nettement accéléré la reprise des matériaux dans ce tronçon, le lit retrouvant en différents points le niveau de 1907 (comme à Ville Vieille ou Château Queyras). Cependant, un phénomène lié à la conception des ouvrages d'après 1957 s'ajoute : **Le lit, dans la partie centrale, est beaucoup trop étroit**, coincé entre le versant (où quelques glissements de terrain sont désormais actifs) et la route. Un camping et un captage d'alimentation en eau potable sont implantés entre la route et le versant. Ce rétrécissement impose lors des fortes crues des vitesses très élevées et un surcreusement du fond. Les crues de 2000 ont été les premières à mettre ce phénomène en évidence. L'enfoncement du lit dans les zones les plus critiques dépasse 2 mètres durant la seule année 2000 ! Les ouvrages, déjà mal fondés, n'ont pu résister et ont basculé dans le lit. Les zones où les protections de berge sont actuellement détruites correspondent exactement au surcreusement que l'on observe sur le profil en long.
- La crue de 2008, bien que déjà peu intense à ce niveau, a poursuivi l'enfoncement, le surcreusement au droit de la route départementale étant très net. En amont, les interventions dans le lit, combinés avec une érosion régressive, expliquent un enfoncement marqué en aval avec le confluent de l'Aigue Blanche.

4.4.5. La Combe du Queyras

L'évolution des fonds dans la Combe du Queyras est difficilement quantifiable. De plus, le niveau du lit n'est plus le résultat de l'équilibre entre les apports amont et la capacité de transport.

Dans les gorges, le niveau est "tenu" par les gros blocs provenant des versants et les ouvrages réalisés le long de la route. Ainsi, les très fortes crues ont tendance à baisser le lit, mais souvent localement et faiblement, surtout dans les zones où le substratum est très présent, comme en amont de la Chapelue ou dans les Combes de Château Queyras et de l'Ange Gardien).

La vue suivante montre le profil en long de la partie amont des gorges :

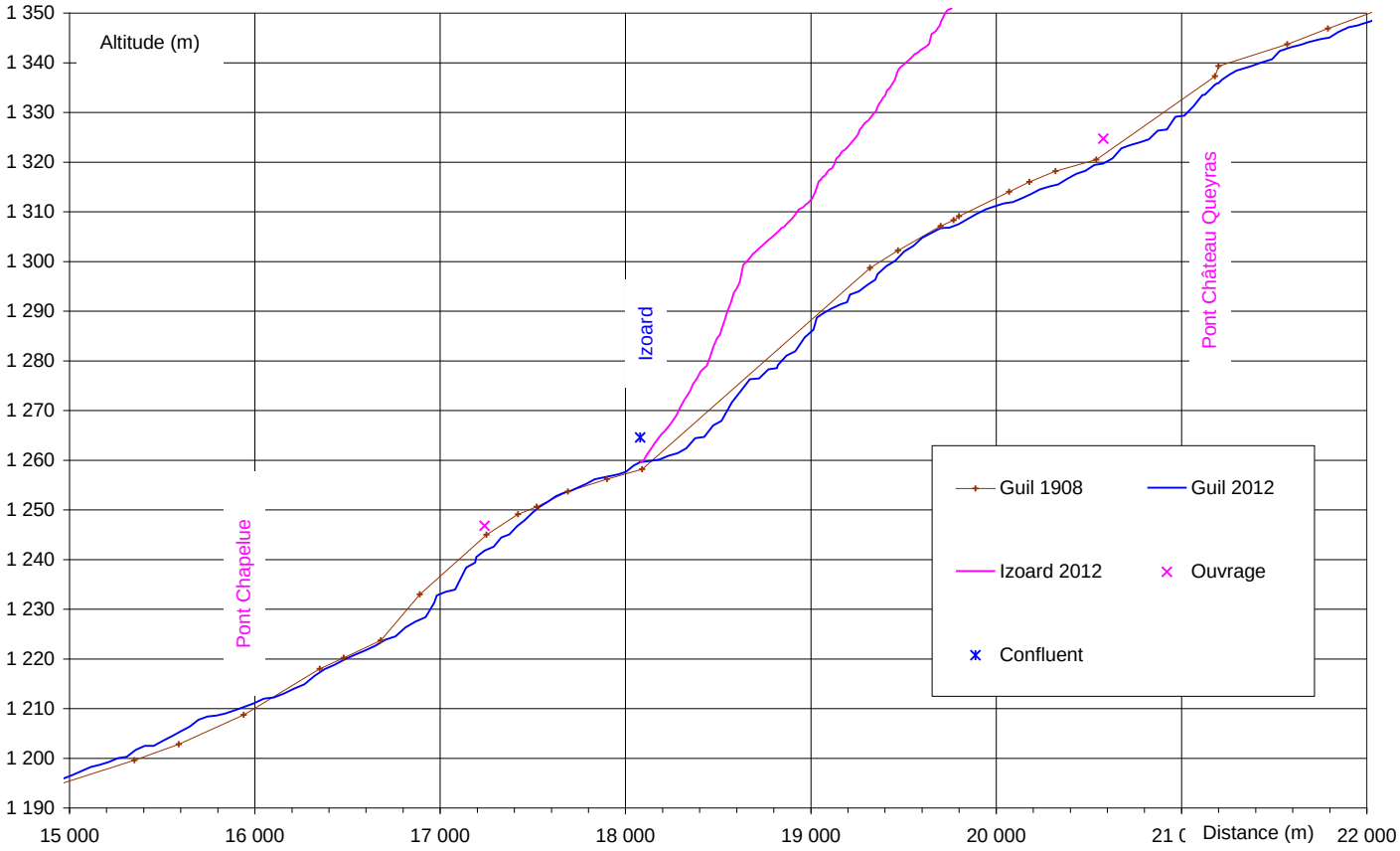


Figure 56 : Évolution des profils en long du Guil en aval de Château Queyras.

L'enfoncement généralisé qui transparait de ce graphique est vraisemblablement exagéré par rapport à la réalité. En effet, les levés, notamment en 1908 sont très espacés, rendant une interprétation difficile. De plus, la quasi totalité des ouvrages ont été refaits - et éventuellement déplacés - après la crue de 1957, rendant un recalage des abscisses très difficile.

Cependant, il est probable que les travaux importants réalisés après la crue de 1957 aient été accompagnés de prélèvement de matériaux et notamment de blocs, favorisant un dépavage et un enfoncement limité. Le pavage parait actuellement reconstitué et l'enfoncement dans cette zone semble résiduel en l'absence d'interventions.

Plusieurs points méritent d'être signalés :

- La plaine de la Fusine joue un rôle de régulation du transport solide. Un léger engravement y est d'autant plus probable que le pont de Château Queyras n'a pas arrêté les matériaux en amont

comme en 1957. Cependant, le torrent de la Rivière n'a apporté qu'un volume de matériaux négligeable. Il s'agit d'une des rares zones où le profil en long n'aurait pas subi d'évolution.

- L'aval de la Chapelue se distingue par des divagations importantes, en rive gauche d'abord et en rive droite où la route a été emportée. Il est peu probable que ces divagations soient liées à des variations du niveau du lit. On note cependant que dans cette zone, le niveau du lit serait aujourd'hui un peu supérieur à celui de 1908.

La figure suivante montre la partie des gorges en amont du barrage de la Maison du Roy :

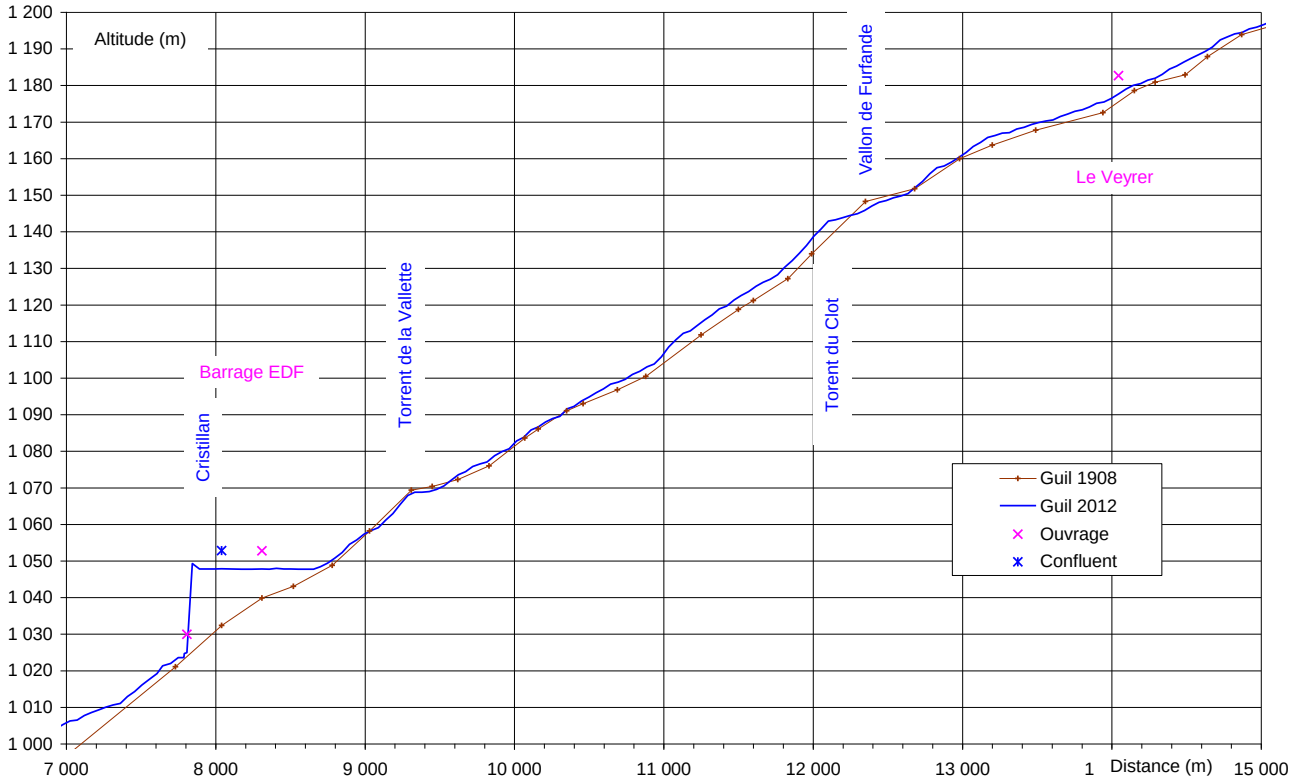


Figure 57 : Évolution des profils en long du Guil en amont de la Maison du Roy.

Les évolutions du lit sont ici aussi peu significatives :

- Le confluent avec le torrent du Clot, en aval de Bramousse n'apparaissant pas sur le profil en long de 1908 (ce qui ne signifie pas qu'il n'avait pas d'influence sur le Guil). Il est aujourd'hui très actif et a un impact très net sur le profil en long. Cette confluence a connu des variations de niveaux importantes. Affouillé durant les crues de Juin et Octobre par le Guil, le confluent de ce torrent à laves s'est remblayé lors de sa crue en juillet 2001. Ces variations sont le résultat naturel du fonctionnement d'un tel confluent, très indépendamment de la dynamique du Guil. Ces variations ne sont pas contradictoires avec une stabilité des niveaux sur le long terme.

- Le barrage de la Maison du Roy peut être un obstacle au transport solide. Ainsi, la queue de retenue s'est beaucoup engravée lors des dernières crues, nécessitant des curages pour éviter le débordement en particulier au droit du pont en queue de retenue. Ce barrage est équipé d'une vanne déversante en surface qui permet l'évacuation des flottants. Cette fonction empêche de vidanger le barrage pendant la crue et de permettre une transparence totale de l'ouvrage. Les engravements sont donc très importants durant la crue, et la situation pourrait devenir très critique en cas d'apports massifs du Cristillan, contrairement à ce qui s'est passé lors des deux crues de 2000.

4.4.6. Basse vallée du Guil à Guillestre

Les évolutions du lit en altitude sur les 5 derniers kilomètres du Guil relèvent de plusieurs causes aux échelles de temps très différentes :

- **Les respirations du lit pendant les fortes crues**. Les relevés postérieurs à la grande crue de juin 1957 mettent en évidence deux secteurs d'exhaussement :
  - la plaine du Simoust. La comparaison des profils en long montre un exhaussement général du lit entre 1908 et 1990. Cet exhaussement semble principalement lié à la crue de 1957. La plaine du Simoust joue un rôle de régulation des apports massifs issus des torrents de la combe du Queyras et du Cristillan. La grande largeur du lit en amont du secteur rétréci au pied de Montdauphin favorise en outre l'alluvionnement du lit. Les crues de 2000 ne semblent pas avoir entraîné un tel exhaussement : elles sont restées modérées sur la basse vallée, particulièrement sur le Cristillan. Au cours des dernières décennies, il semble qu'on ait assisté plutôt à un certain lessivage du lit (ouvrages perchés autour de la passerelle de Gaboyer).
  - le confluent de la Durance. Les crues du Guil sont relativement indépendantes de celles de la Durance. Lorsque le Guil est en crue, les débits de la Durance sont le plus souvent insuffisants pour reprendre les apports du Guil. La rupture de pente en aval de la confluence avec la Durance (4‰ au lieu de 8‰ sur le tronçon terminal du Guil) favorise une importante sédimentation. L'exhaussement a atteint 1.5 à 2 m en 1957. En 1957, l'exhaussement s'est fait sentir jusqu'au confluent du Chagne : cela correspond au secteur de forte divagation du lit (débordement vers la gare d'Eygliers).

    Les relevés ne montrent pas d'exhaussement au confluent même, mais au contraire une forte pente sur la partie terminale du lit : la Durance a pu reprendre les déjections du Guil dans les jours qui ont suivi la crue. Alors que l'érosion dans le Guil est restée limitée par manque de débit liquide.

    En 2000, le même phénomène a conduit à un exhaussement de l'ordre de 1 m de la partie terminale du lit, sensible jusqu'au droit de la station d'épuration. Ces dépôts ont été partiellement repris aujourd'hui : le Guil s'est réincisé dans ses dépôts, sans les reprendre entièrement. Les bancs aujourd'hui perchés vont tendre peu à peu à se végétaliser, se transformant progressivement en terrasses, comme l'ont fait autrefois ceux de 1957.

    En 2008, le phénomène parait avoir été nettement moins marqué car la Durance a subit une crue forte et longue permettant une reprise des matériaux.
- L'abaissement du lit sous l'influence de la Durance. Les extractions de matériaux alluvionnaires entre Eygliers et St-Clément sur la Durance ont conduit à un abaissement du lit dépassant 1 mètre. Cet abaissement s'est propagé sur le tronçon terminal du Guil par érosion régressive. Un point d'érosion régressive était signalé en amont de la STEP en 1990. Il a été lissé par les mouvements du lit lors de la crue de 2000. Par contre, aucune évolution d'envergure n'est visible sur le profil en long entre 1990 et 2012.
- La respiration du lit induite par le fonctionnement de la retenue de la Maison du Roy Le barrage de la maison du Roy est globalement neutre vis-à-vis du transport solide du Guil et du Cristillan : il n'y a pas de piégeage durable des sédiments. En revanche, la retenue en fonctionnement normal piège les sédiments, qui sont relargués lors de chasses périodiques. Ce fonctionnement par chasses entraîne une très forte respiration du lit dans les gorges à l'aval du barrage (plus de 5m de respiration). Il n'est pas certain que le transit sédimentaire soit

totalement régulé au débouché des gorges dans la plaine du Simoust : des fluctuations des apports sédimentaires à ce niveau sont possibles.

La plaine du Simoust joue ainsi un rôle de régulation du transit sédimentaire tant vis-à-vis de la variabilité naturelle des apports qu'en réponse au régime imposé par l'aménagement hydroélectrique. Ce rôle de régulation, qui se traduit par des fluctuations du profil en long, entraîne une grande variabilité du calage relatif des formations alluviales par rapport au bras vif de la rivière. Globalement, les variations du niveau du lit entre 1990 et 2012 paraissent modérées. Cette stabilité du profil en long ne signifie pas - bien au contraire - une stabilité du tracé en plan.

La figure suivante montre les profils en long disponibles dans cette zone :

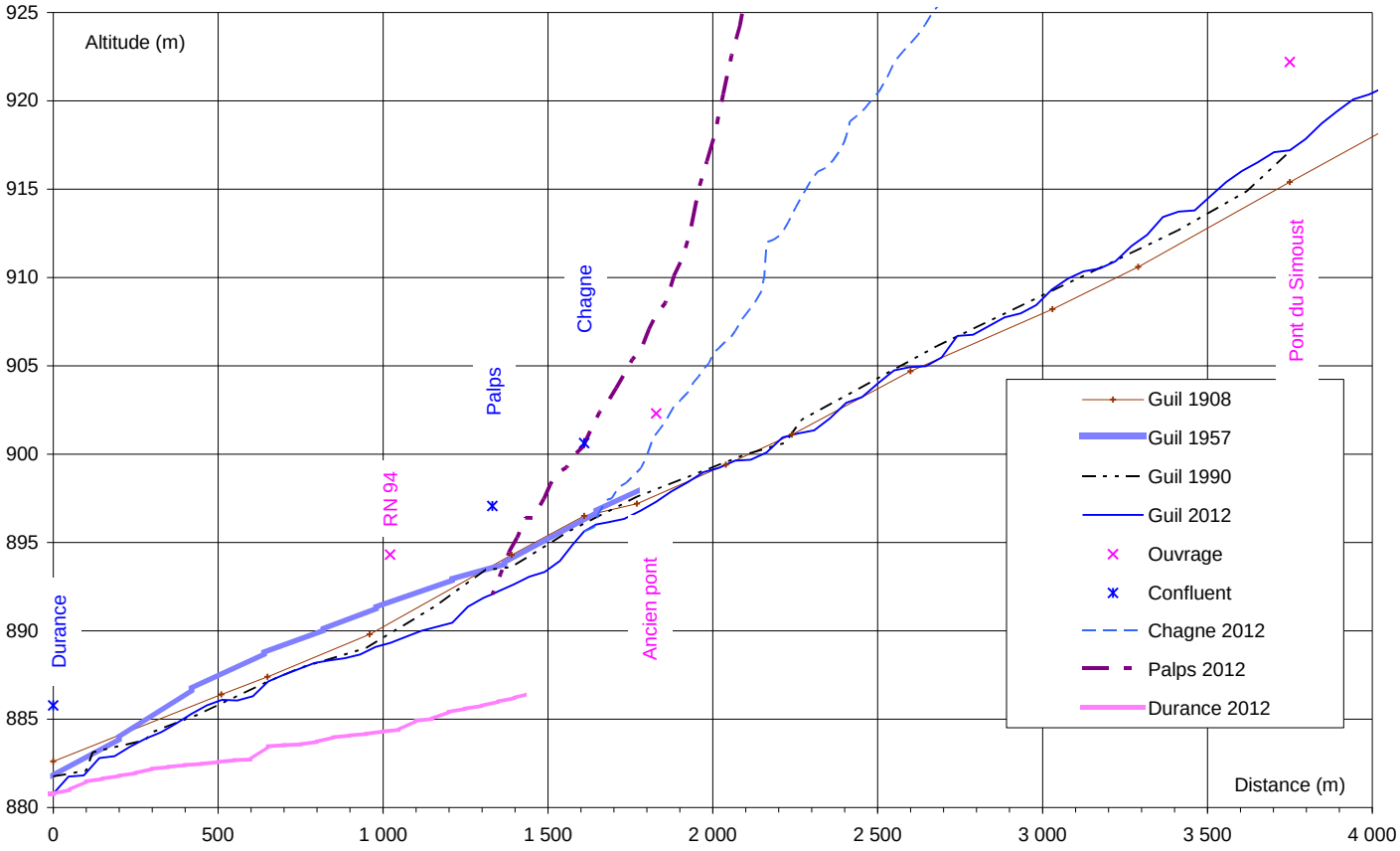


Figure 58 : Évolution du lit dans la basse vallée du Guil.

Les ouvrages de protection ont été entièrement repris après la crue de 1957. Comme ailleurs sur le Guil, il semble que ces ouvrages aient été calés sur le niveau haut du lit issu de la crue. Le retour progressif à un niveau normal du lit a conduit à un déchaussement des digues, bien visible par les épis en béton perchés. Des seuils sont d'ailleurs envisagés en amont du pont de la RN 94 pour réduire les risques d'affouillements des digues.

Il est probable que le surcreusement localisé en amont du pont de la RN 94 soit plus lié au coude marqué et à la faible rugosité de la berge qu'à une réelle contraction du chenal, comme le montre les boisements très développées en rive gauche malgré les crues récentes.

Une forte crue du Chagne pourrait conduire en théorie à une respiration du lit dans le chenal endigué. On ne dispose pas cependant d'observations historiques en ce sens, ce qui valide l'hypothèse d'un pavage - au moins partiel - sur le cône de déjection de cet affluent.

5. QUANTIFICATION DU TRANSPORT SOLIDE

5.1. Objectif

Le volume de matériaux transportés durant la crue est un élément essentiel pour l'explication des crues et des dégâts qui y sont liés. Ainsi, dans une zone de dépôt, les dégâts sont directement liés au volume de matériaux qui arrive de l'amont. C'est le cas, par exemple, du confluent avec la Durance, qui a connu un engravement important lors des crues de 2000.

D'autre part, les capacités d'érosion de berge sont aussi fonction du volume de matériaux transporté durant une crue, même si le lien est plus lâche.

Enfin, l'estimation des volumes transités est un élément essentiel pour comprendre le fonctionnement global du Guil et de ses affluents.

A l'image de ce qui a été réalisé précédemment pour l'hydrologie, l'objectif de ce chapitre est d'estimer les volumes de matériaux transportés lors des crues. Il convient d'être prudent, cette détermination étant encore plus difficile que celle des débits liquides.

5.2. Granulométrie des matériaux

5.2.1. Guil

Une série de mesures de granulométrie a été conduite dans la partie haute du bassin versant, là où le phénomène de transport solide est le plus sensible, notamment à cause des divagations. Les mesures ont été réalisées en prenant en compte la morphologie du site. Trois types de morphologie ont été retenus :

- Matériaux remaniés. Il s'agit de matériaux remaniés mécaniquement, en particulier lors des opérations de recalibrage du lit après les crues. Les matériaux paraissent alors particulièrement fins. Une mesure de la granulométrie dans la masse a par ailleurs été réalisée peu en amont de la confluence avec la Durance.
- Matériaux transportés. Il s'agit de dépôt en masse qui reflètent vraisemblablement la granulométrie des matériaux transportés en charriage lors des crues. A priori, il s'agit des mesures les plus représentatives du transport solide.
- Lit pavé. Dans ce cas, l'écoulement a trié les matériaux et laissé en place seulement les blocs les plus gros qui résistent mieux à l'écoulement. Sur le Guil, ce type de morphologie est exceptionnel dans les zones alluvionnaires à cause de l'intensité du transport solide.

La figure suivante regroupe l'ensemble des courbes granulométriques relevés sur le Guil :

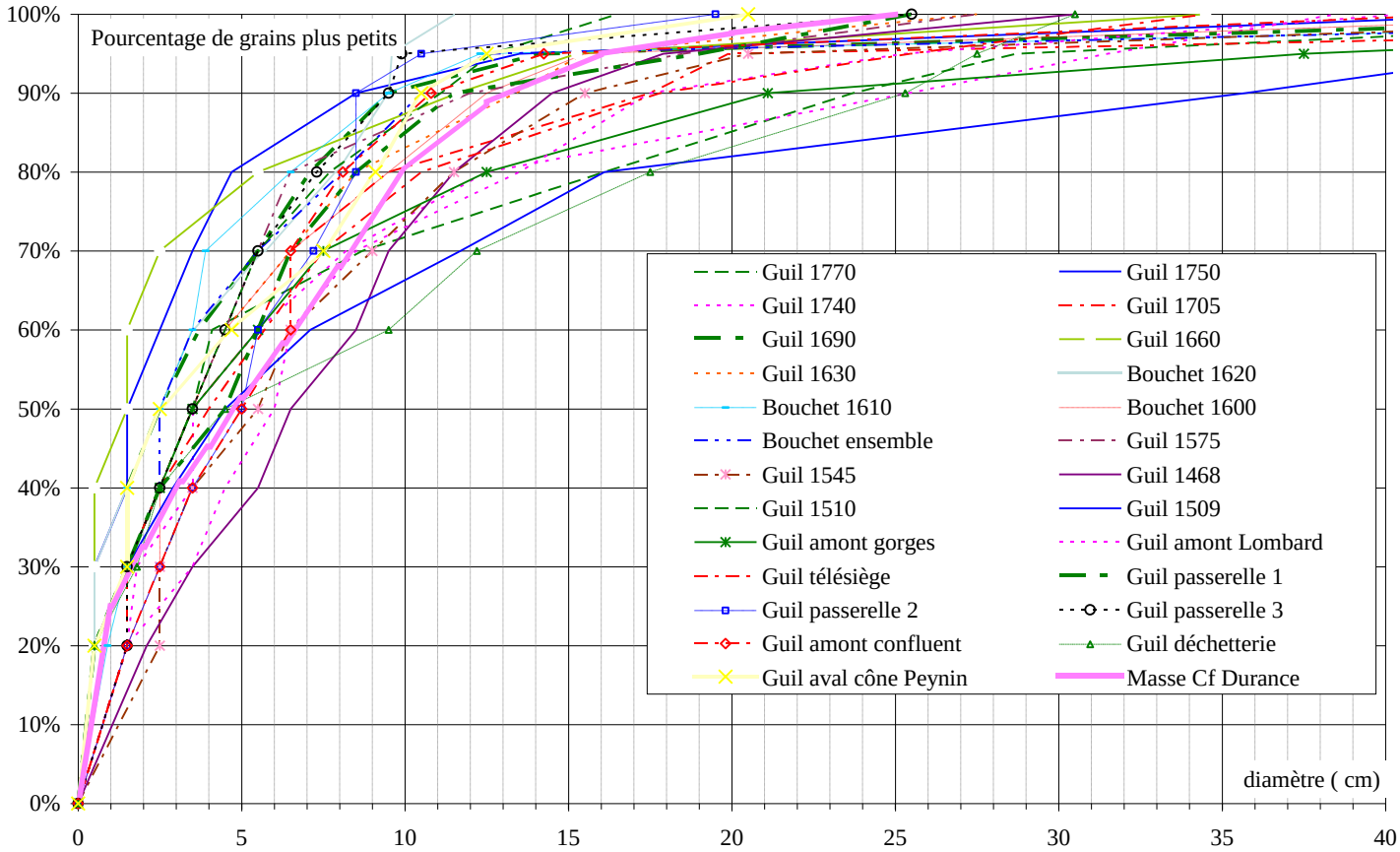


Figure 59 : Courbes granulométriques du Guil.

A partir de ces mesures, les données ont été synthétisées et regroupées suivant leur morphologie.

Ce graphique montre que la granulométrie mesurée dans la masse correspond bien à l'ensemble des mesures réalisées en surface, sauf pour les matériaux les plus grossiers, sous représentés sur ce dépôt latéral en amont de la confluence avec la Durance. Le diamètre moyen de cette mesure dans la masse est de 5.9 centimètres… tout près des 6 centimètres retenus à partir des seules mesures de surface.

Afin de faciliter l'interprétation des mesures, des paramètres plus globaux sont retenus :

- Le d_{30} correspond au diamètre pour lequel 30 % des grains sont plus petits. Ce paramètre est représentatif des matériaux fins.
- Le d_{90} correspond au diamètre pour lequel 90 % des grains sont plus petits. Ce paramètre est révélateurs des matériaux grossiers.
- Le d_m correspond au diamètre moyen des grains de l'échantillon. Il s'agit d'un bon indicateur de la granulométrie d'ensemble.
- Le rapport d_{90} / d_{30} indique l'étendue granulométrique de l'échantillon.

La figure suivante reporte l'évolution du diamètre moyen le long du profil en long du Guil en amont de Château Queyras :

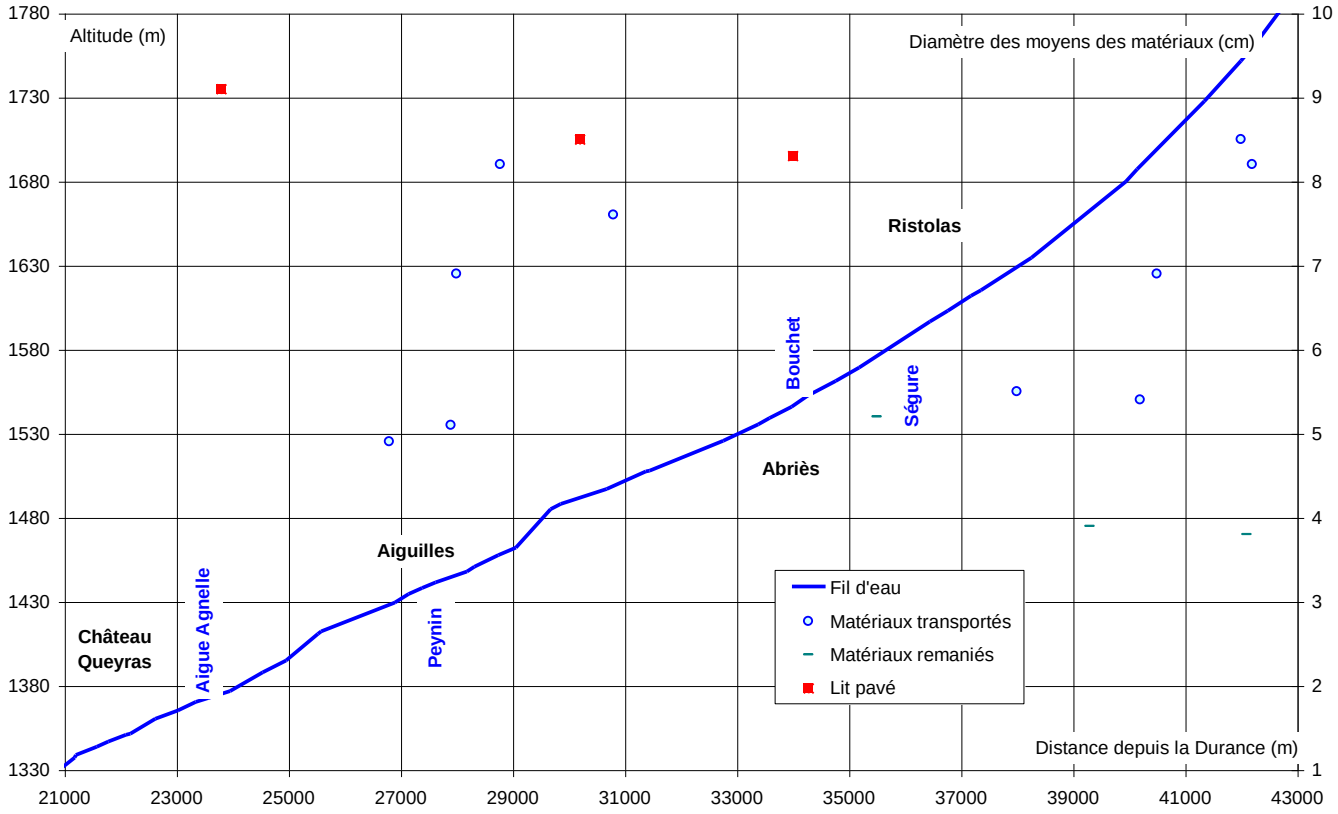


Figure 60 : Évolution du diamètre moyen.

Il n'apparaît pas d'évolution flagrante de la granulométrie des matériaux, même en prenant en compte la morphologie du site de mesure. Un tel résultat montre que la granulométrie est très peu variable dans ce tronçon. Plusieurs éléments se conjuguent pour obtenir ce résultat :

- Les matériaux transportés par le Guil sont de relativement bonne qualité. Ils se fractionnent et s'usent peu, ce qui explique que la granulométrie soit peu variable.
- Les mesures les plus en amont correspondent déjà à un bassin versant relativement étendu et donc à des matériaux déjà partiellement triés.
- L'ensemble de la zone considérée ici correspond à un secteur très homogène du point de vue de l'érosion et de la nature des sols.
- Les torrents n'apportent pas de blocs, la plupart ne transportant pas de laves torrentielles.

Ainsi, dans l'optique d'une approche globale du transport solide dans le Guil, il est possible de retenir un diamètre moyen constant sur l'ensemble du secteur. La valeur de 6 centimètres paraît la plus représentative. Dans le même esprit, un rapport d_{90} /d_{30} de 10 peut être retenu sur l'ensemble de la zone.

Sur la basse vallée, la granulométrie des matériaux reste du même ordre de grandeur ; d_{50} de 3.5 à 8.5 cm, d_{90} atteignant 9 à 15 cm. Le diamètre moyen reste voisin de 6 cm et correspond parfaitement à la mesure réalisée dans la masse.

5.2.2. Bouchet

Plusieurs mesures de granulométrie ont été réalisées le long du Bouchet. La figure suivante indique les courbes granulométriques correspondantes :

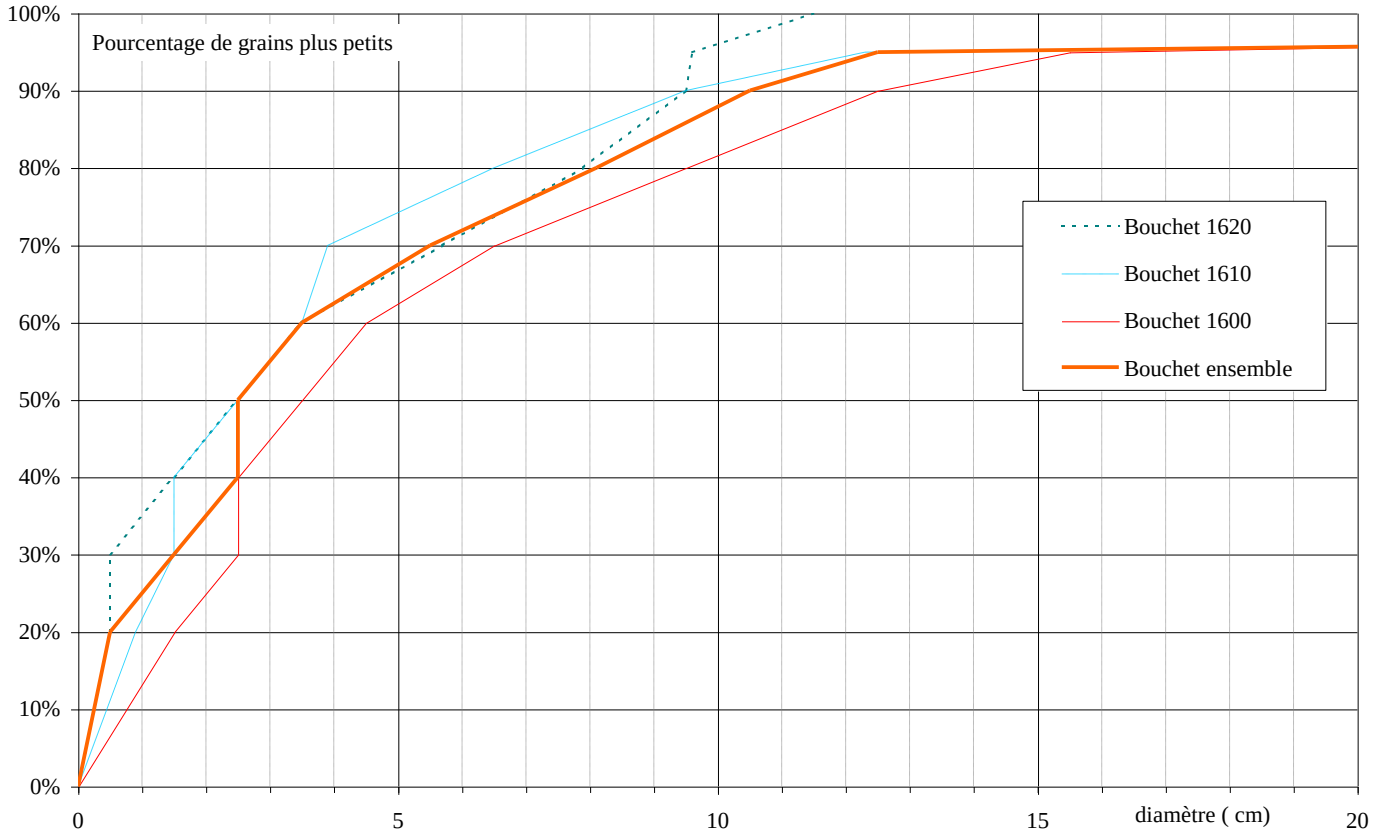


Figure 61 : Mesures de granulométrie réalisées sur le Bouchet

Ces mesures conduisent aux paramètres granulométriques suivants :

- Diamètre moyen : 4 cm
- Rapport d_{90} /d_{30} : 8

Ces diamètres correspondent plutôt à des matériaux remaniés.

5.2.3. Peynin

Une série de mesures de la granulométrie des dépôts sur le Peynin a été réalisé et est reprise ci-dessous :

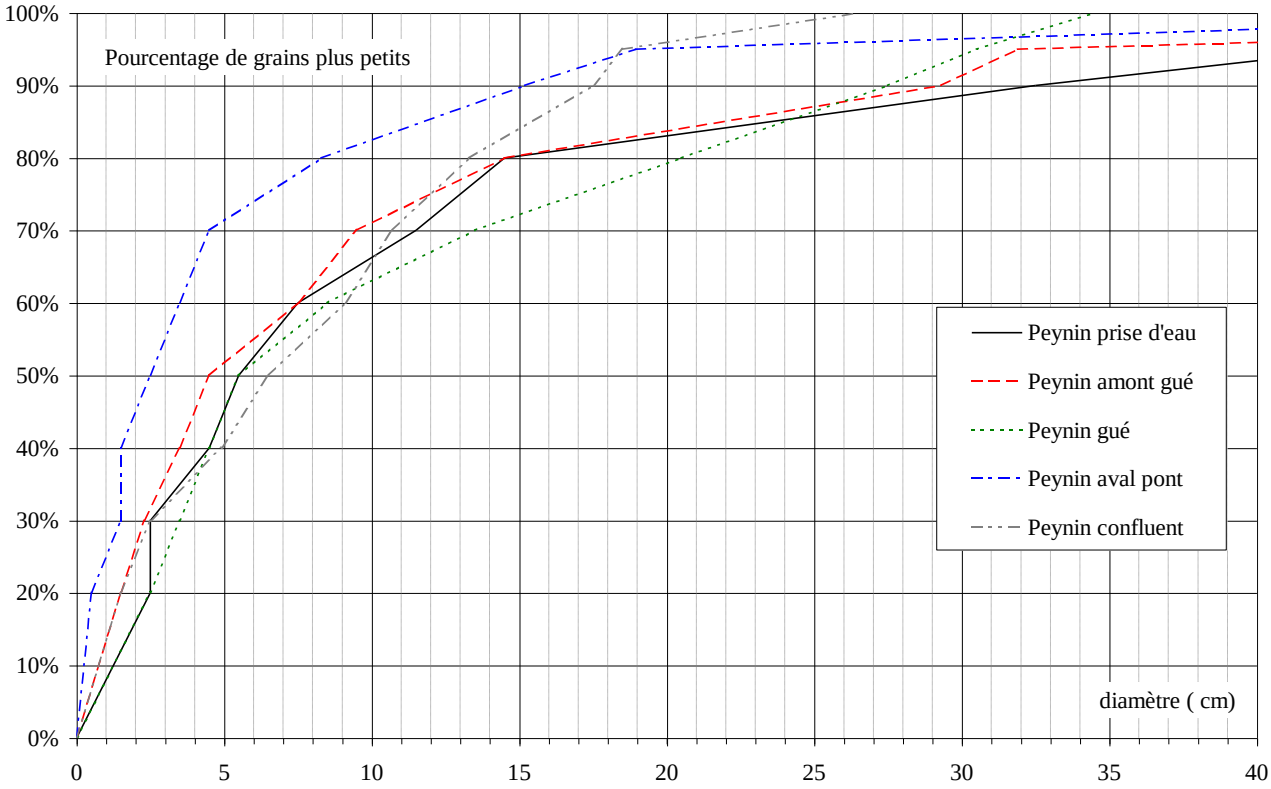


Figure 62 : Mesures de granulométrie sur le cône de déjection du Peynin.

La mesure réalisée à l'aval du pont se distingue nettement des autres, ce qui est essentiellement lié à la morphologie locale. En effet, il s'agit d'une mesure sur un dépôt latéral remanié. Or on risque dans un tel cas un tri granulométrique lors du curage.

Le tri granulométrique sur le cône de déjection est important et régulier. Cela confirme l'importance des dépôts de matériaux par le torrent du Peynin sur son cône de déjection. Il est donc essentiel de prendre en compte un tri granulométrique lors de la modélisation des crues sur ce cône de déjection.

Les principales caractéristiques des matériaux transportés au sommet du cône de déjection sont les suivantes :

d_m	12 cm
d_{90} / d_{30}	10

5.2.4. Cristillan

La figure suivante illustre les résultats obtenus sur les différents sites :

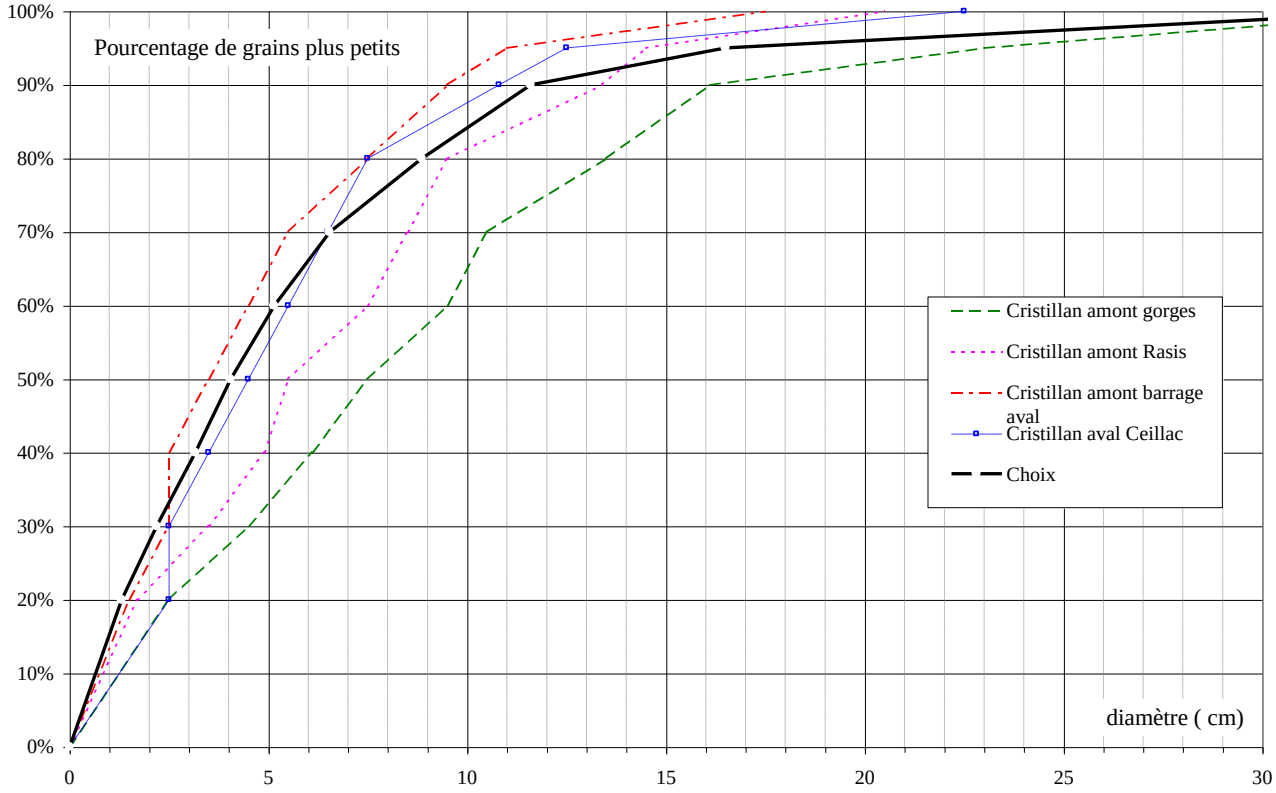


Figure 63 : Granulométries mesurées sur Cristillan.

Ces mesures conduisent aux résultats suivants :

- Les mesures sont assez homogènes, ce qui montre la faiblesse du tri granulométrique sur l'ensemble de la zone. En effet, il n'y a pas de différence très significative entre la granulométrie en amont du confluent avec le torrent de Rasis et à l'aval du confluent avec le Mélezet.
- La mesure réalisée entre l'amont des gorges et le torrent de Rasis correspond à des matériaux particulièrement fins. Il s'agit vraisemblablement de l'effet de la morphologie sur la granulométrie.
- Dans l'ensemble, les matériaux sont fins (d_{50} de l'ordre de 4 cm). Ce résultat est cohérent avec les observations du lit et la faible influence des phénomènes de pavage. Le seuil de début de transport est alors très faible (de l'ordre de quelques m³).

Les principales caractéristiques des matériaux transportés lors des crues sont les suivantes :

d_m	6 cm
d_{90} / d_{30}	6

5.2.5. Aigue Blanche

La mesure de la granulométrie des matériaux transportés sur l'Aigue Blanche est particulièrement délicate car le lit est pavé sur l'essentiel du cône de déjection. Il apparaît cependant que les mesures de granulométrie sont très homogènes sur l'ensemble du bassin versant.

Ainsi, nous retiendrons les valeurs suivantes :

D_m	6 cm
d_{90} / d_{30}	8

5.2.6. Le Chagne

Les estimations de granulométrie des matériaux effectuées lors de l'« Étude Hydraulique des bassins versants du Chagne et du Rif Bel » (Commune de Guillestre / SOGREAH 1999) donnent les résultats suivants :

	Dm (cm)	d90/d30
Chagne amont	7.5	7
Chagnon	8.6	7
Rif Bel	8.3 / 11.5	4 à 6
Chagne aval	4 à 8	5 à 6

Ces valeurs correspondent à la granulométrie des matériaux transportés et cherche à évacuer l'effet du pavage qui conduit à une granulométrie très supérieure pour les matériaux qui structurent le lit.

5.3. Estimation du transport solide

5.3.1. Principe du calcul

Les crues "structurantes" dans le Queyras correspondent d'abord à des retours d'Est, c'est à dire des crues durant généralement 4 à 5 jours. C'est pour ces phénomènes qu'il paraît intéressant de calculer les volumes de matériaux transportés lors d'une crue.

Le principe retenu consiste à réaliser les calculs suivants :

- Prise en compte des volumes écoulés conformément à l'étude hydrologique.
- Construction d'hydrogramme respectant à la fois le volume écoulé et le débit de pointe.
- Calcul du débit solide à partir des analyses précédentes (pente établie à partir de l'analyse du profil en long, granulométrie correspondante aux mesures…).
- Intégration du débit solide durant toute la crue afin de permettre la détermination des volumes pouvant être transportés durant la crue.

Des tests de sensibilité ont été réalisés sur la forme des hydrogrammes afin de cerner l'influence de ce paramètre mal connu sur les volumes transportés.

On trouvera ci-dessous deux formes très différentes. Les écarts de volumes solides transportés pour les fortes crues restent très faibles (quelques pourcents). Ainsi, le choix de la forme de l'hydrogramme a une influence négligeable par rapport aux autres paramètres (en particulier le coefficient de ruissellement dont la détermination est très délicate).

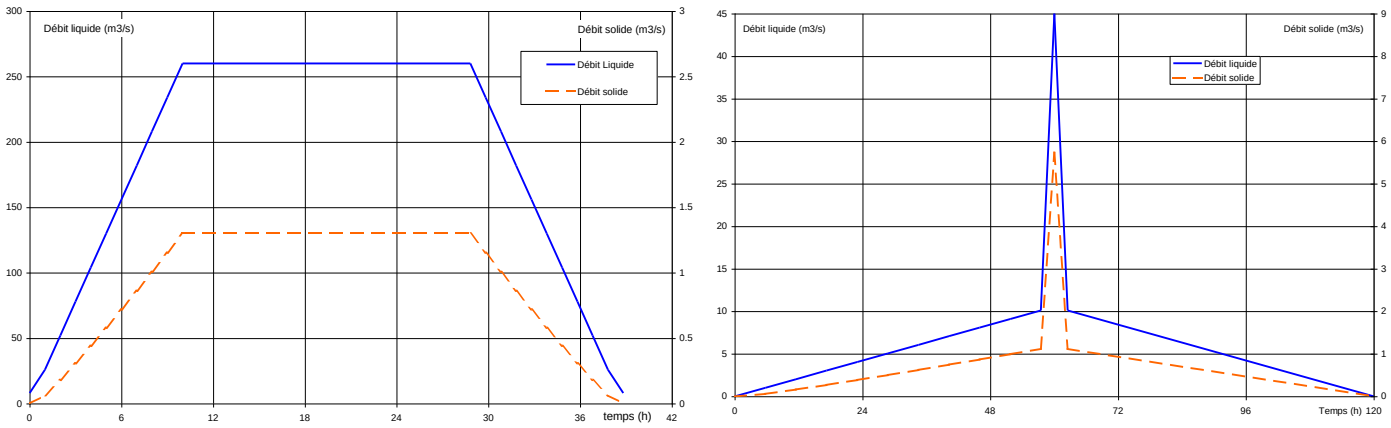


Figure 64 : Formes différentes d'hydrogramme de crue.

Rappelons qu'il ne s'agit pas ici de conduire à une quantification précise permettant une étude ponctuelle d'un problème spécifique, mais de dresser un bilan à l'échelle du bassin versant du fonctionnement du Guil et de ses affluents.

5.3.2. Résultats obtenus

La figure suivante indique les résultats obtenus en différents points du bassin versant amont :

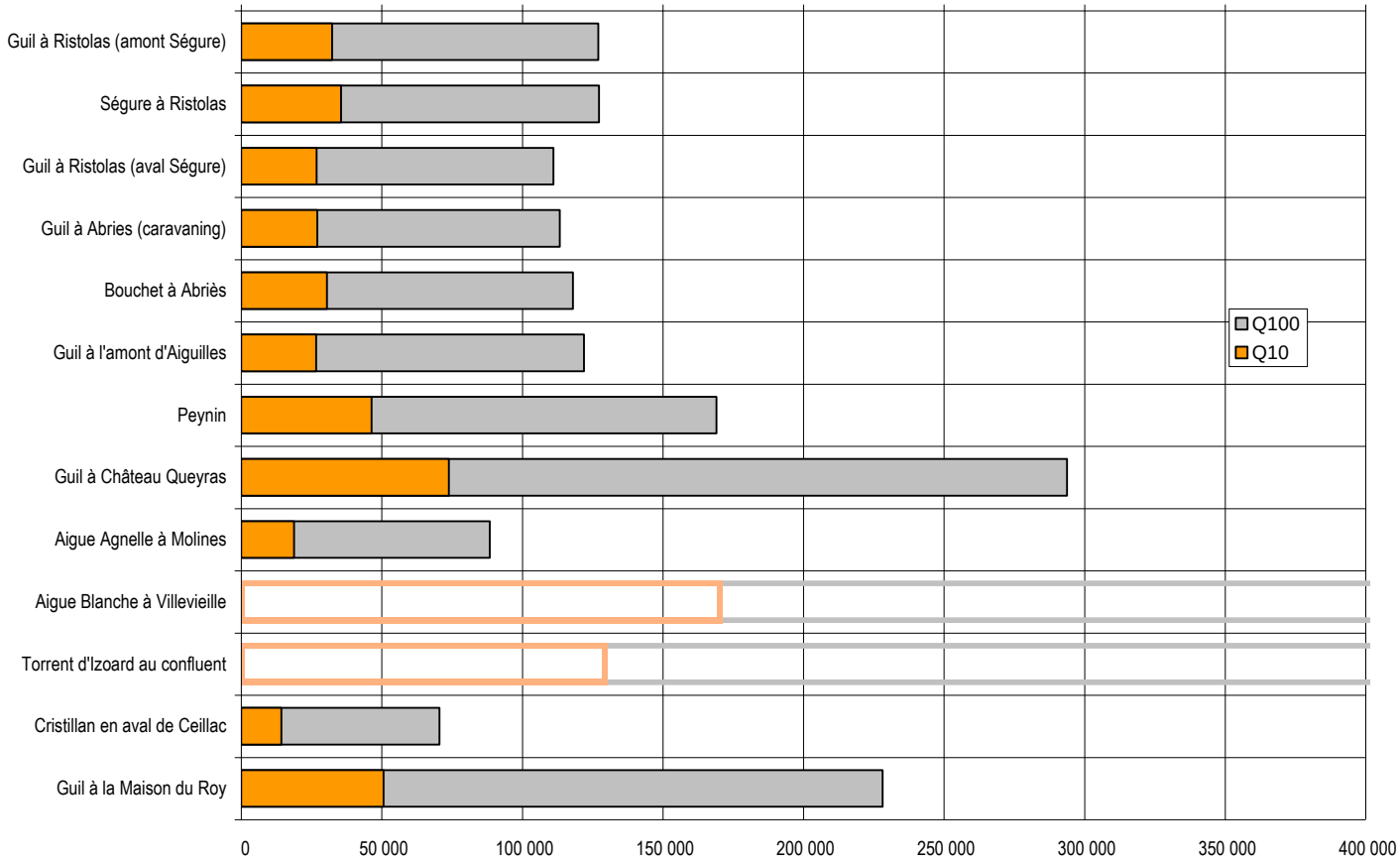


Figure 65 : Estimation des volumes transportés dans le bassin versant du Guil.

Ce graphique appelle les remarques suivantes :

- Les volumes sont très importants. En effet, les hypothèses correspondent à une crue très importante du point de vue des volumes (très fortes précipitations sur 5 jours et sur l'ensemble du bassin versant), coefficient de ruissellement très élevé correspondant à une saturation partielle des sols… Ainsi, les valeurs affichées comme correspondant à crue centennale correspondent plutôt à une crue du même type que celle de 1957. Pour la plupart des crues, seule une partie du bassin versant contribue, ce qui limite fortement l'ampleur des volumes transités et surtout les dépôts aux confluences.
- Le calcul est très délicat lorsque le lit est pavé par des blocs. C'est notamment le cas de l'Aigue Blanche sur son cône de déjection. La pente est élevée, ce qui correspond à un volume transité potentiellement énorme. Cependant, à l'image de la gorge en amont, un pavage par des gros blocs limite un tel transport solide à des phénomènes exceptionnels, tels que la crue de 1957. À aucun moment les crues de 2000 n'ont approché les valeurs calculées ici. Un tel comportement explique le fonctionnement catastrophique de ce torrent en 1957. Le même type de remarque est encore valable pour le torrent d'Izoard pour lequel la détermination de la pente d'équilibre est particulièrement délicate.

- Les volumes correspondant à la crue décennale sont très inférieurs à ceux de la crue centennale. Cet écart traduit plusieurs caractéristiques :
  - Le régime du Queyras est très contrasté avec des retours d'Est heureusement très rares. Les crues décennales y sont donc médiocres, sauf à l'extrémité Est du bassin versant.
  - Le phénomène de transport solide ne se produit qu'à partir d'un seuil de débit. Une petite crue peut donc transporter un volume de matériaux très faible – ou même nul sur certains torrents. L'influence du seuil de début de transport (mal connu) est prépondérante pour les petites crues. Ainsi, les résultats présentés ici doivent être considérés avec prudence et sont plus destinés à donner des ordres de grandeurs et à mettre en évidence les principales caractéristiques à l'échelle du bassin versant.
- L'évolution du transport solide le long du Guil est peu marquée. En effet, si les débits liquides augmentent en allant vers l'aval (ce qui devrait conduire à une augmentation du transport solide) la pente diminue, ce qui a une influence inverse. Ainsi, pour les fortes crues, le transport solide n'est pas très variable dans le Guil de l'amont vers l'aval. Pour une longue période et les faibles crues, les résultats sont nettement différents, comme indiqué au paragraphe suivant.

Ces résultats ne concernent que le bassin versant du Guil en amont de la Maison du Roy dont le fonctionnement est globalement alluvionnaire. Une analyse spécifique est mise en œuvre sur le Chagne donc le pavage dans la traversée de Guillestre modifie radicalement le fonctionnement de ce secteur.

5.3.3. Fonctionnement des confluents

5.3.3.1. Nature des phénomènes

Dans une zone de confluence, les apports solides ont deux sources :

- Le Guil avec une pente modérée. Malgré un débit liquide élevé, le débit solide est relativement réduit. Par contre, il est relativement fréquent et les volumes annuels peuvent être importants.
- Le torrent, à forte pente, est capable lors des crues de transports solides très intenses. Par contre, les débits liquides y sont rarement suffisants pour permettre un transport solide significatif.

Ainsi, une zone de confluence se caractérise par une discontinuité - transitoire - du transport solide. Ce fonctionnement entraîne un dépôt lors des crues du torrent et une reprise lors des périodes de hautes eaux de la rivière.

Si l'équilibre est généralement atteint à long terme, le dépôt, tant dans le torrent que dans la rivière, peuvent être temporairement important, un curage pouvant alors être nécessaire.

La figure page suivante montre le fonctionnement d'une confluence. De façon schématique, la chronologie est la suivante :

- Dès que le transport solide commence dans le torrent, le dépôt se forme à la confluence mais aussi en aval dans la rivière et en amont dans le torrent.
- Le dépôt se poursuit durant toute la crue. La vitesse de dépôt est généralement maximale pour la pointe de crue du torrent.
- Après la pointe de crue, le dépôt continue alors que la hauteur d'eau diminue faiblement. Le niveau d'eau maximum est atteint durant la décrue et rarement au moment de la pointe de crue du torrent. Ce comblement du lit entraîne une érosion de la berge opposée lorsque celle-ci est affouillable (ce qui est rarement le cas, les terrains affouillables face aux torrents puissants ayant été érodés de longue date).
- Lorsque les apports du torrent diminuent fortement, la situation se fige rapidement dans le lit du torrent, les débits n'y étant plus suffisants pour une reprise des matériaux. Par contre, les débits liquides dans la rivière permettent une reprise au moins partielle.
- Les dépôts dans le torrent sont progressivement repris lors des - rares - périodes de hautes eaux… jusqu'à la prochaine crue.

La figure suivante montre, de façon schématique, les évolutions du niveau du lit dans une zone de confluence :

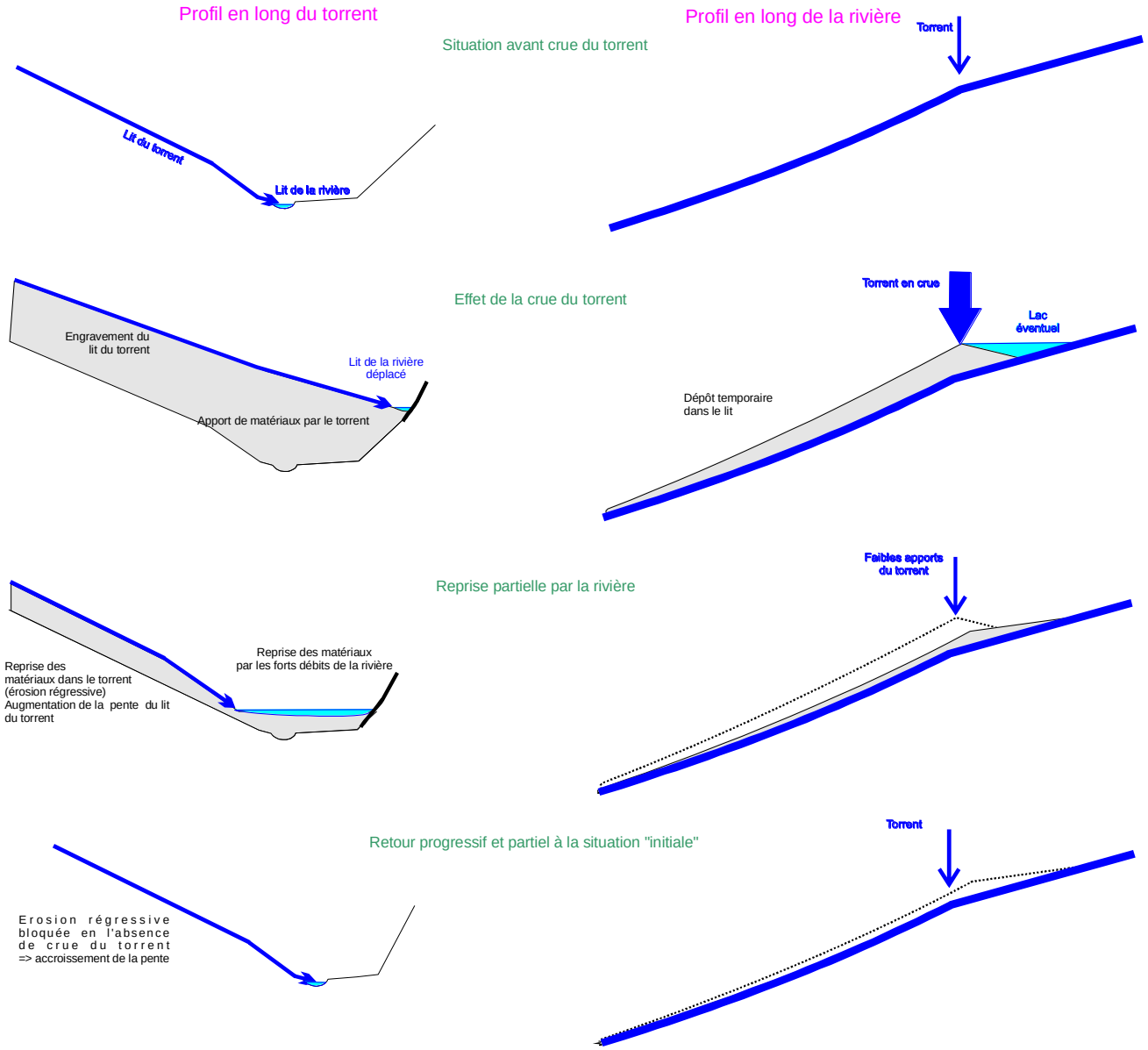


Figure 66 : Chronologie des évolutions des niveaux dans une zone de confluence.

Ce dépôt temporaire augmente évidemment les risques de débordement de la rivière mais aussi du torrent. Ainsi, la demande de curage - dans les zones à enjeux - est particulièrement forte.

Un curage temporaire est donc acceptable après les crues exceptionnelles. Il concerne la rivière principale lorsque le lit est étroit (ce qui est fréquent dans les zones de confluence avec les torrents très actifs) et le torrent sur son cône de déjection.

5.3.3.2. Quantification

La figure suivante reprend, pour les plus fortes crues, les résultats précédents en distinguant le Guil de ses affluents. De plus, le fonctionnement au niveau des confluents y est précisé en comparant les apports amont (Guil + affluent) à la capacité de transport aval (Guil seul) :

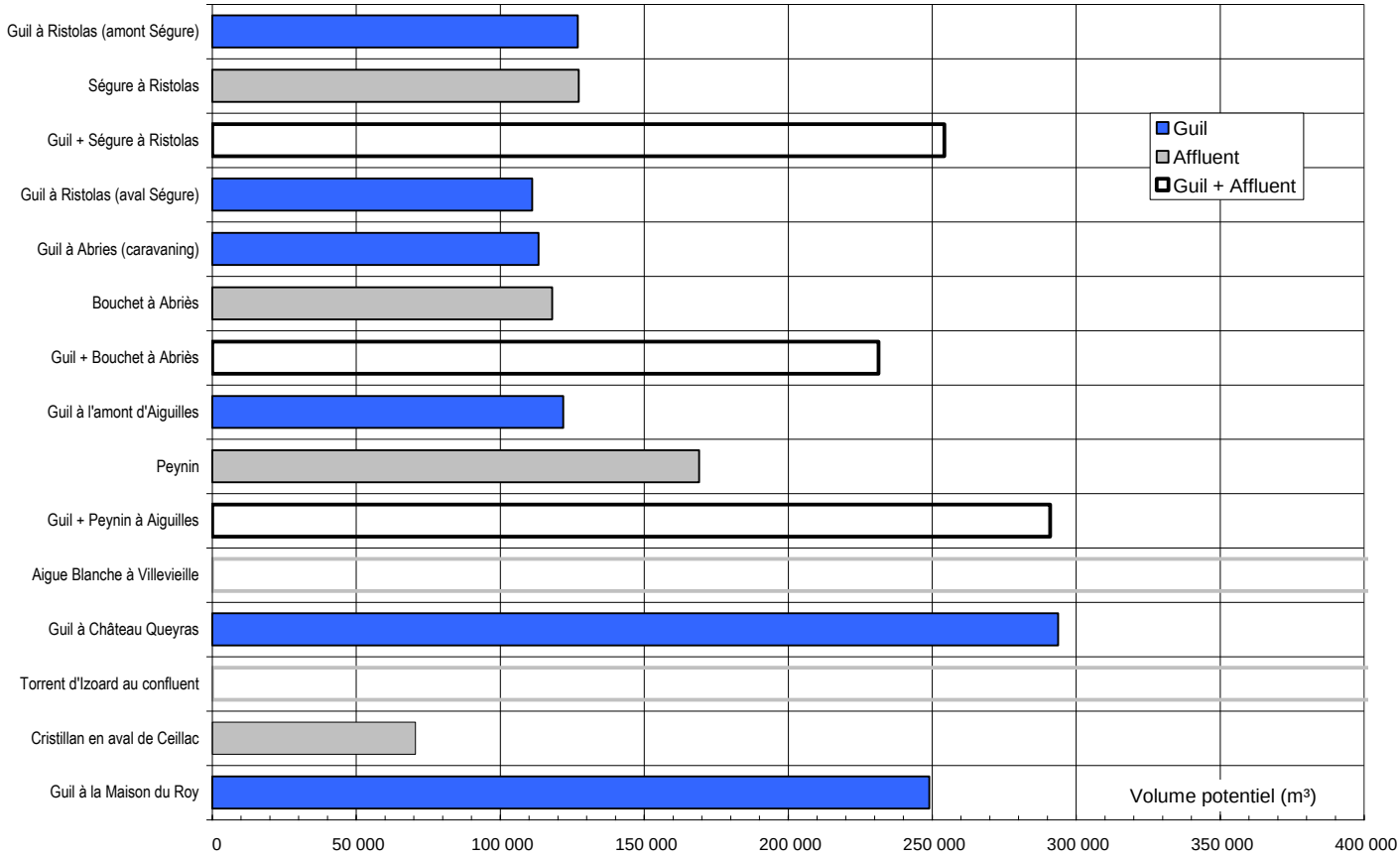


Figure 67 : Volume transité dans les zones de confluence pour des crues centennales.

Ce graphique met en évidence le fonctionnement des confluents pour les plus fortes crues. Par exemple, à Ristolas, le Ségure serait capable d'apporter autant de matériaux en une crue que le Guil car les eaux du Ségure sont nettement plus chargées en matériaux. Cependant, le pavage du lit réduit vraisemblablement très significativement les apports réels de ce torrent.

A l'aval du confluent, malgré les apports liquides du Ségure, le Guil ne parvient à emporter qu'une faible fraction des apports amont (environ la moitié) car sa pente n'est pas suffisante. L'autre moitié des apports amont doit donc se déposer dans le lit conduisant à des engravements de plusieurs mètres, comme cela a été présenté précédemment. Les dépôts se produisent dans l'ensemble de l'espace disponible :

- Dans le Ségure en amont du confluent. En effet, l'engravement qui débute dans la zone de confluence conduit à une réduction de pente du Ségure dans son cours terminal et à un dépôt qui se déplace vers l'amont. Actuellement, ce dépôt régressif est limité par l'aménagement du canal du Ségure.
- Dans le Guil amont, le même phénomène se produit. Dans le cas de Ristolas, il est limité par le seuil à l'aval du chenal de Ristolas.

- Dans le Guil aval, le dépôt au confluent augmentant la capacité de transport vers l'aval. Le lit peut alors s'engraver sur plusieurs centaines de mètres de longueur. Ainsi, au droit de la passerelle à la limite de commune avec Abriès, le lit s'est engravé de presque un mètre en 2000.

La modélisation numérique de ce tronçon est réalisée au chapitre 6.1 page 113.

Les niveaux d'engravement sont très variables durant la crue. Ainsi en juin 2000, au confluent, le Ségure s'est considérablement engravé durant sa pointe de crue, mais, dès la décrue du torrent, les matériaux ont été repris et le lit s'est ré-encaissé dans les dépôts. La photo suivante montre le dépôt, puis la reprise entre le chenal du Ségure et la confluence avec le Guil :

Photo 6 : Respiration du lit du Ségure en amont de la confluence avec le Guil.

La crue de 1957 illustre parfaitement ce fonctionnement avec un engravement combiné du Guil et du Ségure durant la crue. L'évolution du Guil dans ce tronçon est caractéristique avec – entre 1957 et 2000 – une reprise des matériaux et un enfoncement du lit qui a conduit pour cette dernière crue à l'affouillement puis la destruction du pont à l'aval du village. En effet, pour des crues médiocres (fonte des neiges par exemple), le débit est trop faible dans les torrents pour permettre un transport solide significatif. Par contre, il est suffisant dans le Guil pour permettre une reprise des matériaux et des dépôts dans les zones de confluence.

Ce phénomène de reprise est donc surtout associé à des crues faibles et n'est donc pas directement perçu comme un danger. C'est ce qui s'est produit durant les décennies qui ont suivi la crue de 1957 et qui se poursuit encore aujourd'hui.

Le même raisonnement est valable pour l'ensemble des confluents le long du Guil, le confluent du Guil et de l'Aigue Blanche étant peut être le plus critique aujourd'hui. Par exemple, le confluent du

Guil et du Cristillan a connu un engravement dépassant 10 mètres lors de la crue de 1957. Ce dépôt a ensuite été repris – rapidement – par le Guil.

Un tel fonctionnement conduit aux conclusions suivantes :

- Le niveau du Guil est d'abord dépendant de l'activité de ces affluents. Cela explique les engravements à Aiguilles en juin 2000 et la tendance à l'abaissement dans la traversée de Ville Vieille.
- Il est indispensable de disposer de vastes surfaces dans les zones de confluence afin de minimiser l'épaisseur d'un dépôt qui paraît inévitable.
- Une reprise naturelle des matériaux se produit dans le cours d'eau principal après les crues exceptionnelles. Les ouvrages doivent donc prendre en compte une telle évolution.

5.3.4. Secteur aval

5.3.4.1. Chagne

5.3.4.1.1. Caractéristiques générales

Le cas du Chagne et de son affluent le Rif Bel est complexe car les lits de ces deux affluents paraissent partiellement pavés. La pente d'équilibre est alors très différente de celle du lit dans l'état actuel.

Ainsi, le calcul est réalisé sur quatre sites :

	Chagne amont Rif Bel	Rif Bel confluence Chagne	Chagne aval Rif Bel	Chagne confluence Guil
Superficie BV (km²)	63	42.5	106	120
Pente géométrique	4.4 %	5.3 %	5 %	2.5 %
Q_{10} (m^3/s)	51	37	74	82
Q_{100} (m^3/s)	137	100	200	220

Les apports du Monarel (appelé Chalps dans son cours amont sur la commune de Risoul), s'ils ne sont pas négligeables, ne sont pas pris en compte dans cette analyse car ce type de torrent n'est pas sensible aux même phénomènes que les autres torrents, beaucoup plus étendus.

Il est alors possible de réaliser une estimation des apports solides en crue en considérant des crues longues comme précédemment. Les caractéristiques hydrologiques correspondent à une crue longue typique des retours d'est et non une crue courte comme dans l'étude[11] SOGREAH de 1999. Cette hypothèse rend très difficilement comparable les résultats présentés ici avec ceux de cette étude, même s'il apparaît que le pavage partiel n'a pas été pris en compte dans l'étude de 1999.

Cependant, le Chagne impose une démarche particulière afin de tenir compte du pavage mobile. Le calcul est donc réalisé en considérant deux pentes d'équilibre :

- La pente géométrique du lit comme indiqué ci-dessous. Cela signifie que le transport solide est à saturation dans le lit durant toute la crue.
- Une pente d'équilibre prise forfaitairement égale à 2.5 %. Cette pente correspond à la pente du lit aval et correspond donc à un fonctionnement équilibré du cône de déjection. En effet, il parait difficilement acceptable qu'un torrent aussi puissant que le Chagne puisse déposer la quasi-totalité des apports solides sur son cône de déjection en l'absence d'érosion exceptionnelle dans le bassin versant. Ce point sera détaillé ci-dessous.

Le calcul est réalisé avec une granulométrie grossière en retenant un diamètre moyen de 10 centimètres. Notons que ce calcul ne prend pas en compte les dépôts massifs qui peuvent se produire en amont, notamment dans la traversée de Guillestre par le Rif Bel.

---

[11] Commune de Guillestre (Hautes-Alpes) - étude hydraulique des bassins versants du Chagne et du Rif Bel - Octobre 1999 - Mai 2000.

5.3.4.1.2. Prise en compte d'un lit alluvionnaire sur l'ensemble du linéaire

Le graphique suivant indique les résultats obtenus en considérant un transport solide à saturation pour une crue décennale et une crue centennale :

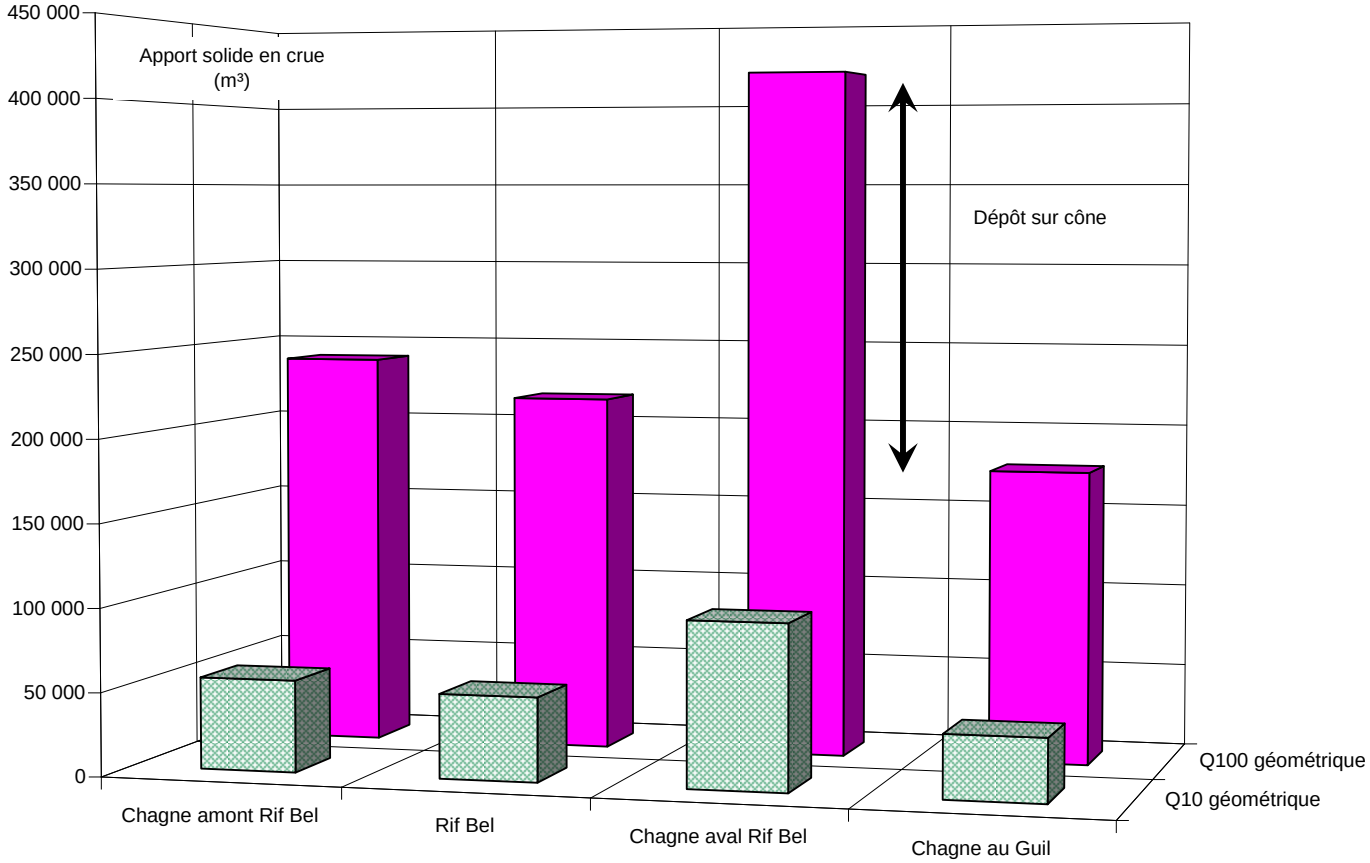


Figure 68 : Capacité de transport à saturation dans le Chagne aval et le Rif Bel.

Ce graphique conduit aux résultats suivants :

- Le Rif Bel et le Chagne amont auraient une capacité de transport comparable. Notons que la prise en compte d'une pente de 8 % dans le Chagne à la sortie des gorges conduit, avec les mêmes hypothèses à un apport solide de 650 000 m³ !
- Les apports solides sont considérables à la confluence et atteignent 450 000 m³ ! L'augmentation de pente en aval de la confluence permet une reprise quasi intégrale de ces apports dans la zone de confluence.
- Par contre, la capacité de transport en amont de la confluence avec le Guil n'est que de 170 000 m³. Ainsi, le dépôt de la différence - soit 240 000 m³ - est nécessaire sur le cône de déjection. Le dépôt est donc très massif. Si l'on retient un lit d'une quinzaine de mètres de largeur, cela correspond à un dépôt uniforme de 4.5 mètres d'épaisseur ! Les apports éventuels du Monarel s'ajouteraient encore à ce volume.

L'énormité des volumes transportés et surtout des dépôts nécessaires rendent ce scénario improbable en l'absence de phénomène érosif très exceptionnel dans les bassins versants.

5.3.4.1.3. Prise en compte d'un lit pavé dans la partie amont

Ainsi, un second calcul a été réalisé en considérant une pente d'équilibre de 2.5 % uniforme sur l'ensemble de cette zone. Le graphique suivant indique le résultat ainsi obtenu et permet la comparaison avec le scénario précédent :

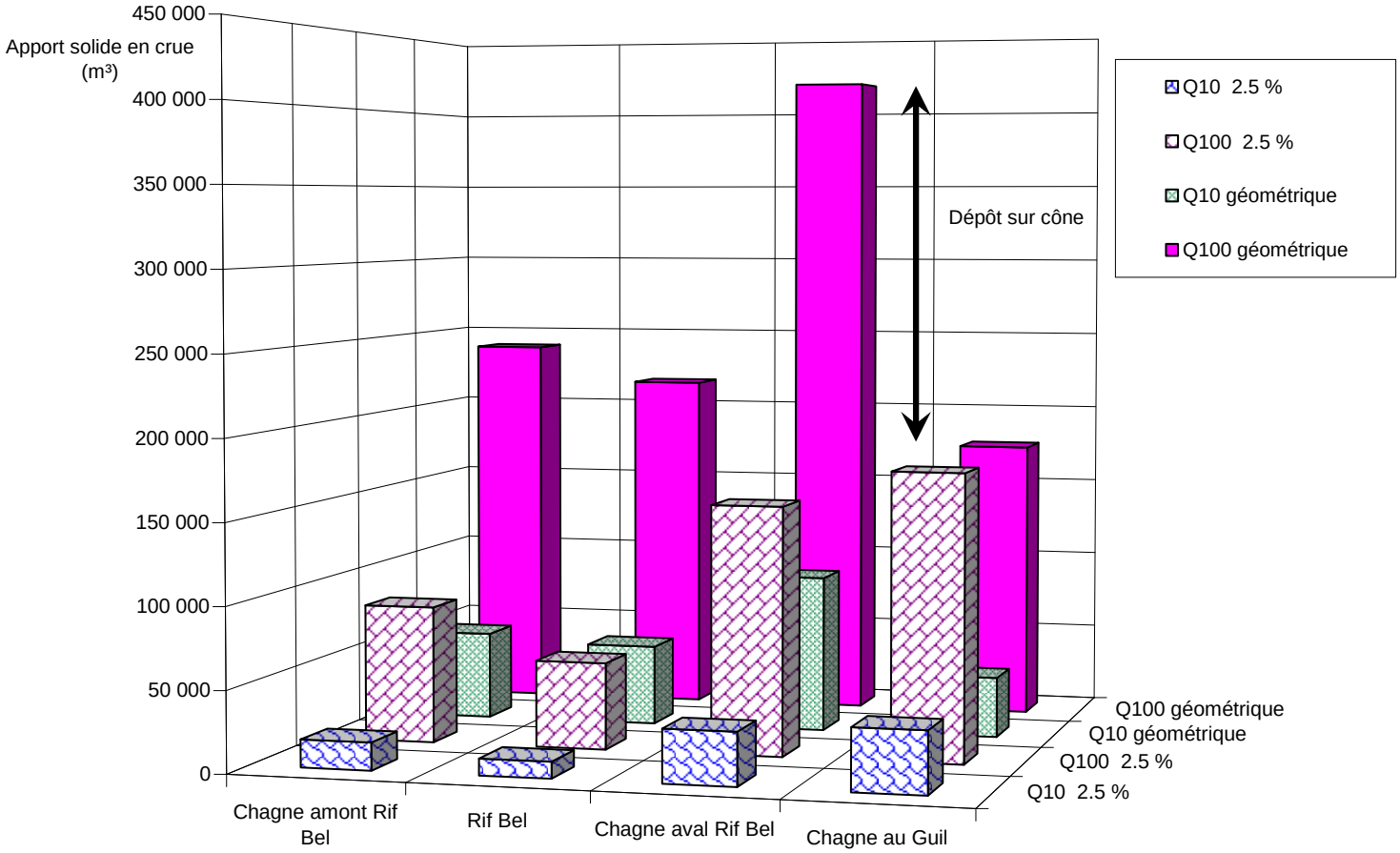


Figure 69 : Capacité de transit dans le Chagne aval et le Rif Bel.

Ce graphique conduit aux résultats suivants :

- Les apports solides sont considérablement plus faibles. Ils sont de "seulement" 140 000 m³, ce qui reste considérable.
- Comme précédemment, la continuité du transport solide est globalement assurée dans la zone de confluence.
- La capacité de transport augmente faiblement entre la confluence avec le Rif Bel et celle avec le Guil. Il n'y a alors pas de tendance massive au dépôt, ce résultat étant cependant très dépendant des apports du Monarel.

Cette continuité du transport solide est directement liée à l'hypothèse d'une pente d'équilibre uniforme sur l'ensemble de la zone d'étude.

5.3.4.1.4. Synthèse sur le comportement du Chagne à Guillestre

Cette analyse montre que le Chagne peut connaître des comportements très différents en fonction des apports solides.

Il apparaît qu'un transport à saturation durant toute la crue conduirait à des volumes transportés et surtout des dépôts peu crédibles.

Une faible capacité de transport durant toute la crue conduirait à l'absence de dépôt avec un lit relativement stable. Ce scénario cadre mal avec les divagations observées en 1957 et les débordements dans le lit majeur.

Un scénario intermédiaire avec des variations de concentration durant la crue parait le plus probable et bien en rapport avec les zones d'érosion à forte pente dans les gorges du Chagne et du Rif Bel. Il permet des dépôts temporaires et localisés et des divagations sans générer des dépôts massifs sur l'ensemble du lit majeur.

La photo aérienne suivante traduit ces débordements sans mobilité importante du lit, les boisements étant largement préservés malgré la forte pente, au contraire de ce qui a été observé sur le Guil lors de cette crue :

Figure 70 : Divagations modérées du Chagne en 1957.

Le risque de dépôt massif parait relativement faible dans la partie amont, et augmente au fur et à mesure de la réduction de pente. Il est significatif en aval de la confluence avec le Monarel où la pente devient inférieure à 3 %.

Les incertitudes sur les apports solides rendent illusoire ici la mise en œuvre de modélisation raffinées, un test de sensibilité sur les apports étant préférable.

Les risques de débordement sont donc d'abord liés à une section d'écoulement trop faible et aux risques d'érosion de berge. C'est particulièrement le cas dans la zone de traversée des campings, et plus encore sur le Rif Bel qui présente une section d'écoulement beaucoup trop réduite dans la traversée urbaine. Dans l'état actuel, les débordements massifs seraient associés à des dépôts de matériaux importants.

5.3.4.2. Guil

Le cas du Guil est finalement nettement plus simple car le lit est alluvionnaire dans la plaine du Simoust. Le tableau suivant détaille les estimations des volumes transportés :

Crue	Débit de pointe (m^3/s)	Volume d'eau (m^3)	Volume solide (m^3)
Juin 1957	700 / 800	91 000 000	270 000
Crue centennale	600	77 000 000	215 000
Crue décennale	200	24 000 000	55 000

Ces estimations de transport sont évidemment cohérentes avec celles exposées précédemment à la Maison du Roy.

6. MODÉLISATIONS NUMÉRIQUES

6.1. Modélisation de la confluence Guil - Ségure

6.1.1. Objectifs

Il s'agit ici de mettre en évidence le fonctionnement de la confluence du Guil avec le Ségure en aval de Ristolas bien qu'elle ne présente que peu d'enjeux. L'objectif principal de la modélisation est de mettre en évidence l'ampleur des engravements à la confluence et les risques de dépôts régressifs en amont, soit :

- Dans le chenal du Guil dans la traversée du Village.
- Dans le chenal du torrent de Ségure.

Il s'agit pour l'essentiel d'un bilan de volume de matériaux. Ainsi, la simulation est réalisée avec des débits élevés et constant durant une longue période afin de simuler les volumes apportés et l'engravement observé. La simulation est réalisée en aval de chacun des deux chenaux qui se terminent tous deux par un seuil, l'objectif étant de connaître l'engravement éventuel en amont de chaque seuil terminal.

6.1.2. Hypothèses

6.1.2.1. Hydrologie

Il s'agit, pour les deux cours d'eau, de la zone du haut Guil avec des précipitations particulièrement marquées. Le tableau suivant indique les débits de pointe (en m^3/s) et les volumes liquides (en million de m^3) issus de l'étude hydrologique :

	Superficie (km^2)	Débit décennal	Débit centennal	Volume décennal	Volume centennal
Guil amont Ségure	62	50	156	3.3	10.3
Torrent de Ségure	17	24	76	0.9	2.8

6.1.2.2. Apports solides

Il est possible de calculer les apports solides - comme précédemment - à partir des hypothèses précédentes :

- La lame d'eau correspond à une pluie de 5 jours.
- Le coefficient de ruissellement sur l'ensemble de l'épisode est de 0.3 pour une crue décennale et 0.5 pour une crue centennale.
- La concentration en matériaux est calculée par la formule de Lefort pour la moitié du débit de pointe.

Le tableau suivant indique la pente d'équilibre, les caractéristiques granulométriques et le volume des apports solides :

	Pente (%)	Diamètre moyen (cm)	d_{90} /d_{30}	Volume décennal (m³)	Volume centennal (m³)
Guil amont Ségure	2.0	6	10	32 000	120 000
Torrent de Ségure	4.5	6	10	24 000	90 000

La simulation est réalisée en considérant un débit constant durant 72 heures. Cela correspond - pour respecter le volume des apports solides - aux débits liquides suivants :

	Superficie (km²)	Débit simulation décennale	Débit simulation centennale
Guil amont Ségure	62	15	44
Torrent de Ségure	17	4.4	12.6

6.1.2.3. Zone modélisée

La zone modélisée s'étend de l'aval des seuils sur chacun des cours d'eau jusqu'à la passerelle en limite de commune où l'effet des apports du torrent de Ségure s'estompe :

Figure 71 : Zone modélisée à la confluence avec le torrent de Ségure.

6.1.3. Résultats obtenus

6.1.3.1. Crue centennale généralisée

Il s'agit ici de mettre en évidence l'évolution des fonds dans le cas - défavorable - d'une crue centennale sur les deux cours d'eau.

La figure suivante montre l'évolution des profils en long en fonction du temps (ou du volume de matériaux apporté durant la crue) dans l'ensemble de la zone modélisée :

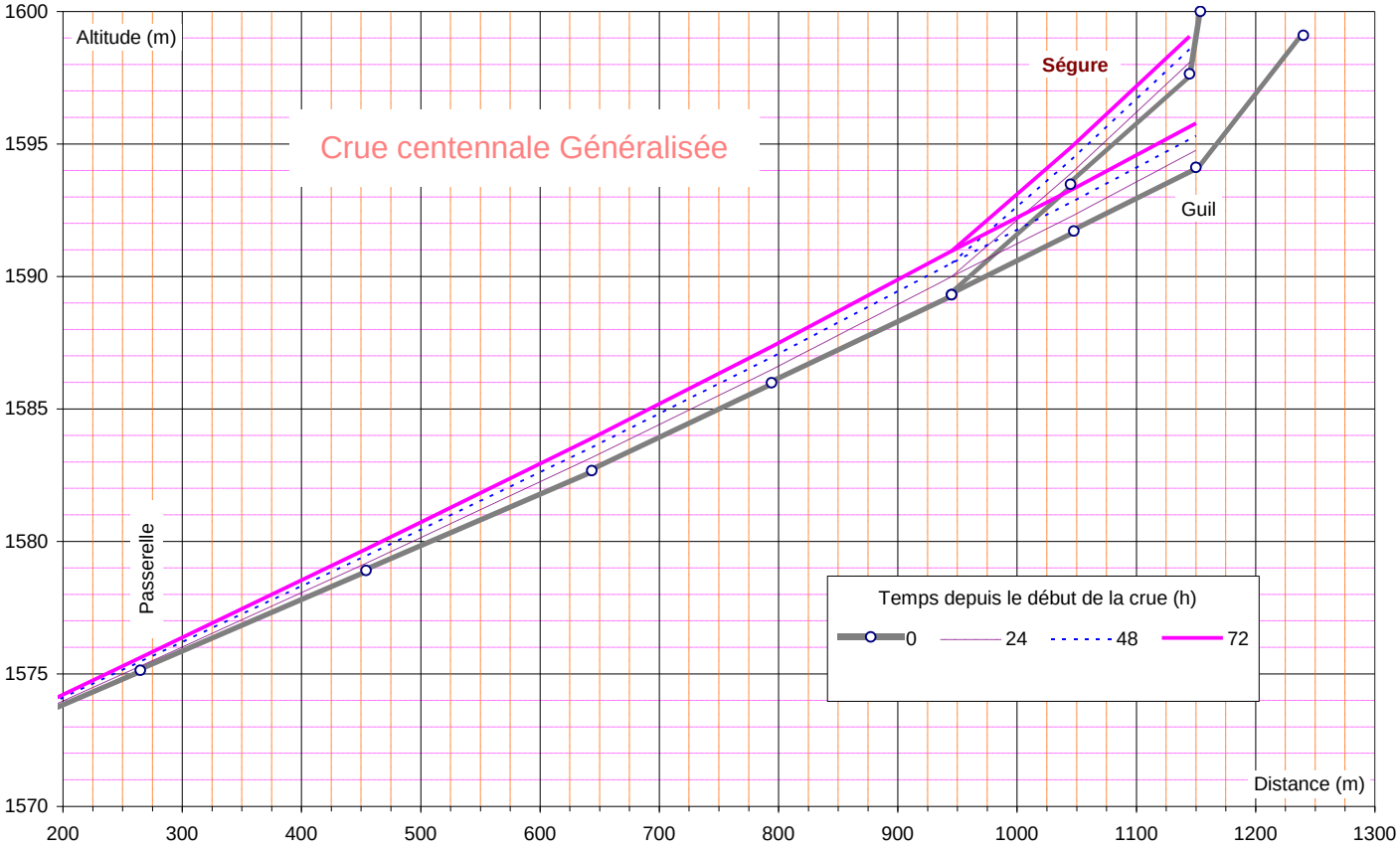


Figure 72 : Évolution des profils en long pour une crue centennale généralisée à Ristolas.

Ce graphique montre que l'ensemble de la zone connaît un engravement important :

- En aval, dans la zone de la passerelle, l'engravement serait un peu inférieur au mètre.
- Dans la zone de confluence, il approche 2 mètres.

Ce remous solide se propage sur le Guil et l'engravement est un peu inférieur à deux mètres au pied du seuil. Ni le seuil ni le chenal du Guil à Ristolas ne sont engravés. Il n'y a donc pas d'augmentation des risques de débordement.

Cet engravement remonte aussi dans le lit du torrent de Ségure avec une pente très supérieure. L'engravement est de l'ordre de 1.5 mètres à la sortie du canal du Ségure, ce qui est inférieur à la chute du seuil : l'engravement ne remonte pas dans le lit canal du Ségure et les risques de débordement n'y sont pas majorés.

Il s'agit de l'engravement moyen sur l'ensemble de la crue. Dans les faits, les hydrogrammes n'étant pas concomitants, ces engravements peuvent connaître une dynamique différente. D'autre part, les apports du torrent de Ségure ne sont pas régulés, ce qui introduit des fluctuations de concentration qui ne sont pas modélisées ici.

Le graphique suivant indique, pour les principaux profils transversaux modélisés, l'évolution des niveaux en fonction du temps :

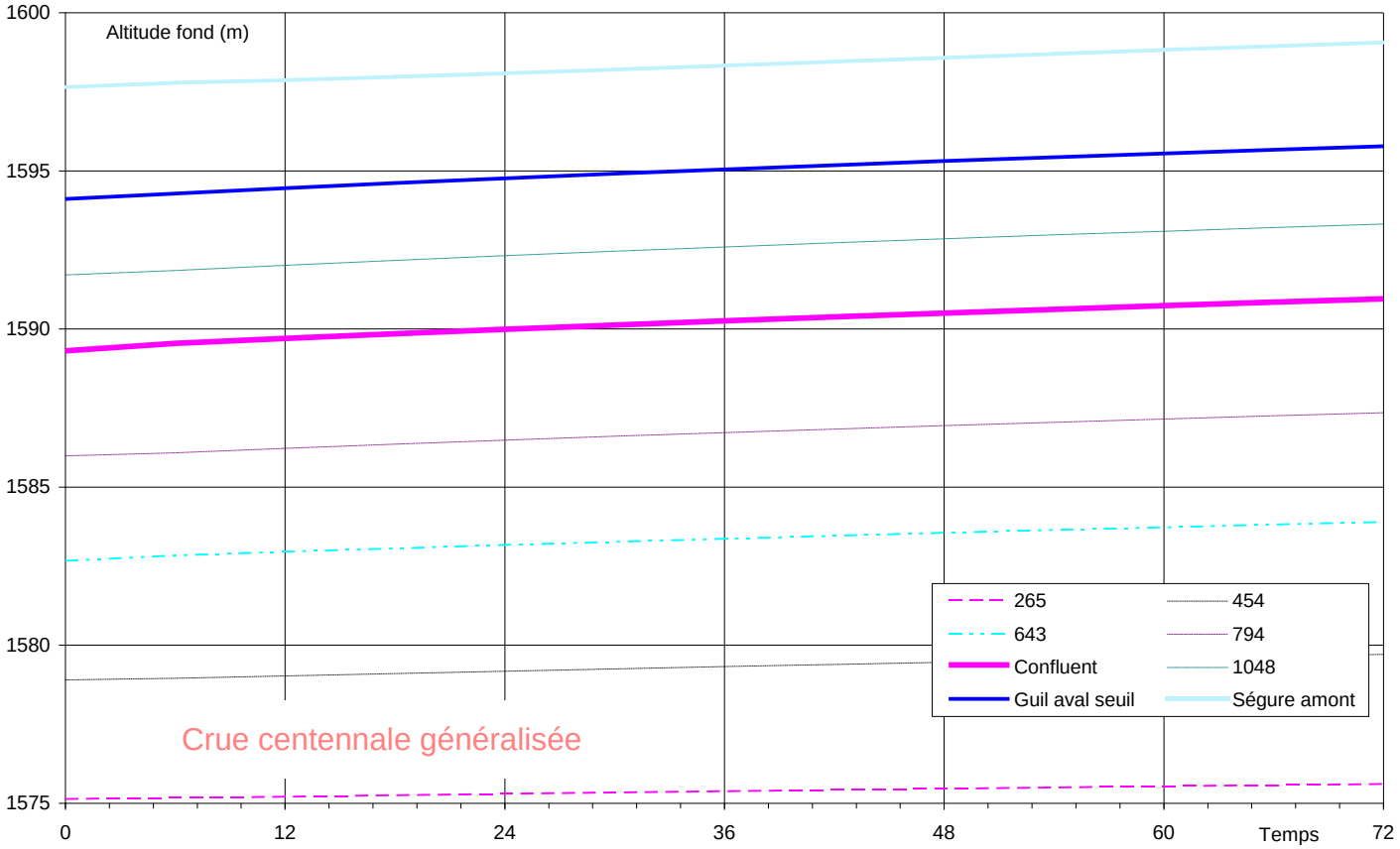


Figure 73 : Évolution des niveaux pour une crue centennale généralisée.

Ce graphique confirme un engravement généralisé dans cette zone. L'engravement est d'autant plus important que l'on se rapproche de la confluence. D'autre part, on note un faible ralentissement de cet engravement au cours de la crue. La faiblesse de cette réduction de la vitesse d'engravement montre que l'équilibre est encore loin d'être atteint : une crue encore plus volumineuse conduirait à un engravement encore plus important.

6.1.3.2. Crue centennale du Ségure et décennale du Guil

Ce cas diffère par une capacité de reprise en aval de la confluence nettement réduite par la forte diminution des apports du Guil. Les apports du torrent de Ségure sont donc plus difficilement repris, mais le volume global des apports est plus faible (il passe de 220 000 m³ à "seulement" 120 000 m³).

La figure suivante montre l'évolution du lit dans ce cas :

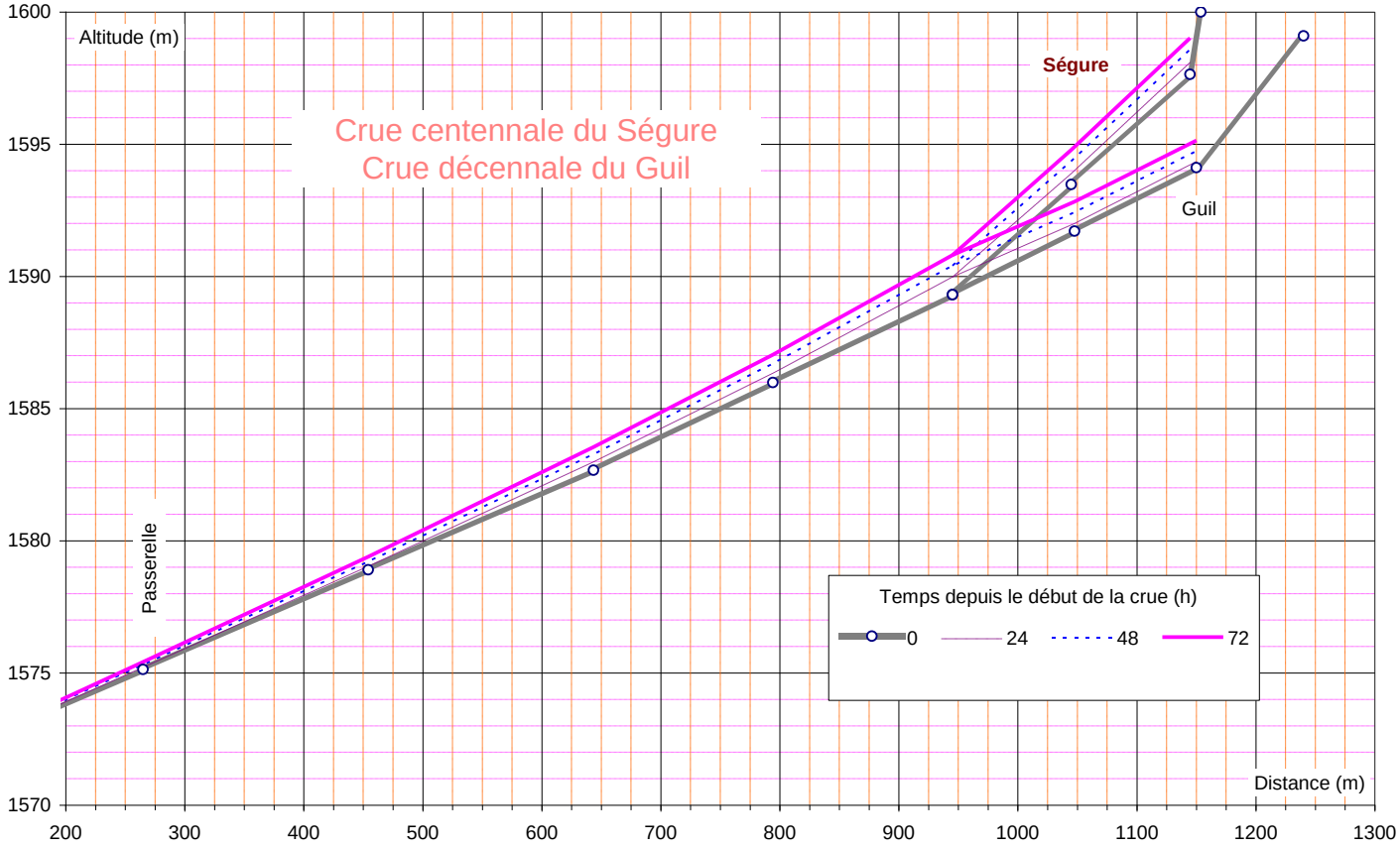


Figure 74 : Crue décennale du Guil et crue centennale du torrent de Ségure.

Ce graphique montre nettement que le Ségure "barre" le lit du Guil pourtant en crue. Au global, l'engravement à la confluence excède à peine 1.5 mètres. Il est du même ordre à la sortie du canal du torrent de Ségure et plus faible au pied du seuil du Guil. Aucun des deux canaux n'est engravé.

6.1.3.3. Crue décennale du Ségure et centennale du Guil

Il s'agit du cas inverse du précédent, avec une crue plus forte sur le Guil que sur le torrent de Ségure.

La figure suivante montre l'engravement ainsi obtenu :

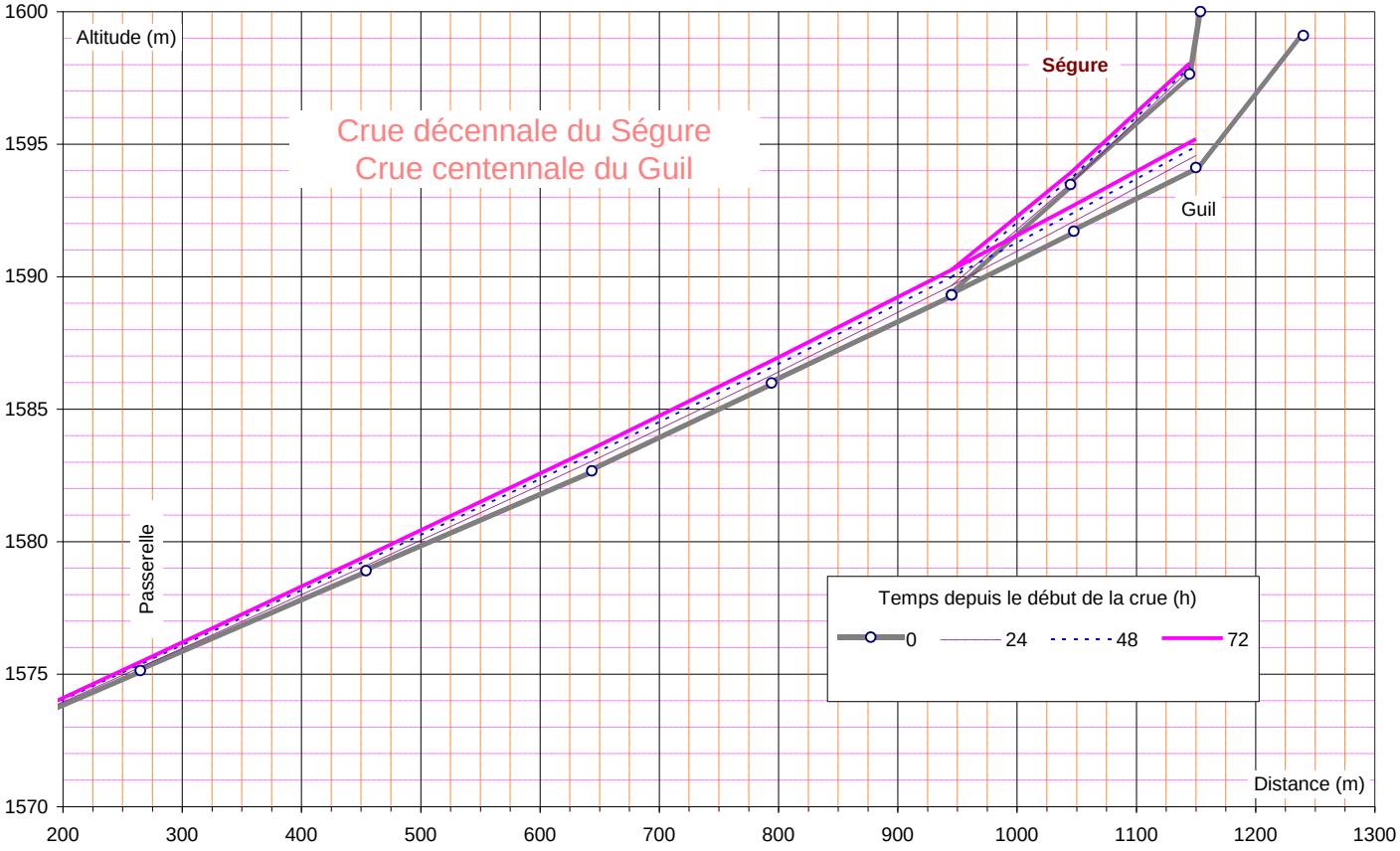


Figure 75 : Crue décennale du Ségure et centennale du Guil - Évolution du profil en long.

Ce graphique montre que les engravements sont nettement plus faibles que précédemment, ce qui confirme que le torrent de Ségure, avec sa forte pente d'équilibre, est prépondérant pour les apports solides et pour l'ampleur des engravements.

Dans ce cas, les dépôts sur le torrent de Ségure sont marginaux à la sortie du chenal.

Comme précédemment, les deux chenaux construits dans la traversée de Ristolas ne sont pas impactés par l'engravement dans la zone de confluence grâce à deux éléments essentiels :

- Un lit très large dans la zone de confluence qui permet un étalement des dépôts et limite au final leur épaisseur.
- Des seuils à l'extrémité des deux ouvrages qui permettent de stopper le dépôt qui se propage depuis la confluence.

6.1.3.4. Effet d'un lit plus étroit

L'élargissement de la zone de confluence est un paramètre essentiel du bon fonctionnement de cette zone. Ainsi, pour le mettre en évidence, la simulation d'une crue centennale généralisée a été réalisée en considérant un lit plus étroit, comme dans les zones canalisées. Les largeurs sont alors de

- 15 mètres sur le torrent de Ségure,
- 30 mètres pour le Guil.

Le graphique suivant montre l'évolution des profils en long au cours de la crue :

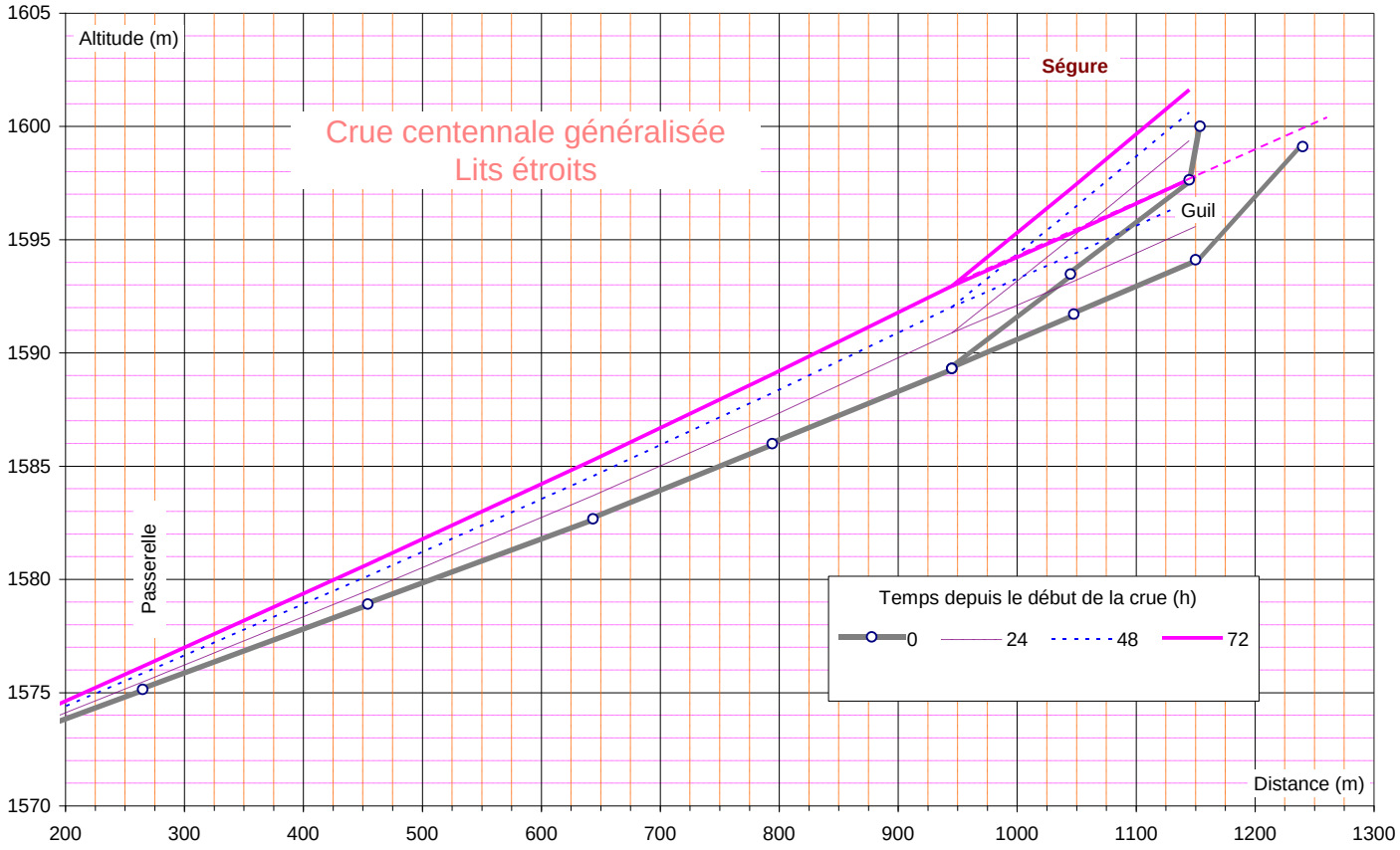


Figure 76 : Crue centennale généralisée et lit étroit.

Ce graphique montre que l'engravement est nettement plus important dans un tel cas. Malgré les seuils, les deux chenaux - sur le torrent de Ségure comme sur le Guil - sont engravés, majorant fortement les risques de débordement durant la crue.

Pour bien mettre en évidence l'effet du rétrécissement du lit, le graphique suivant montre les profils en long en fin de crue dans les deux cas, l'engravement étant plus que doublé avec un lit étroit :

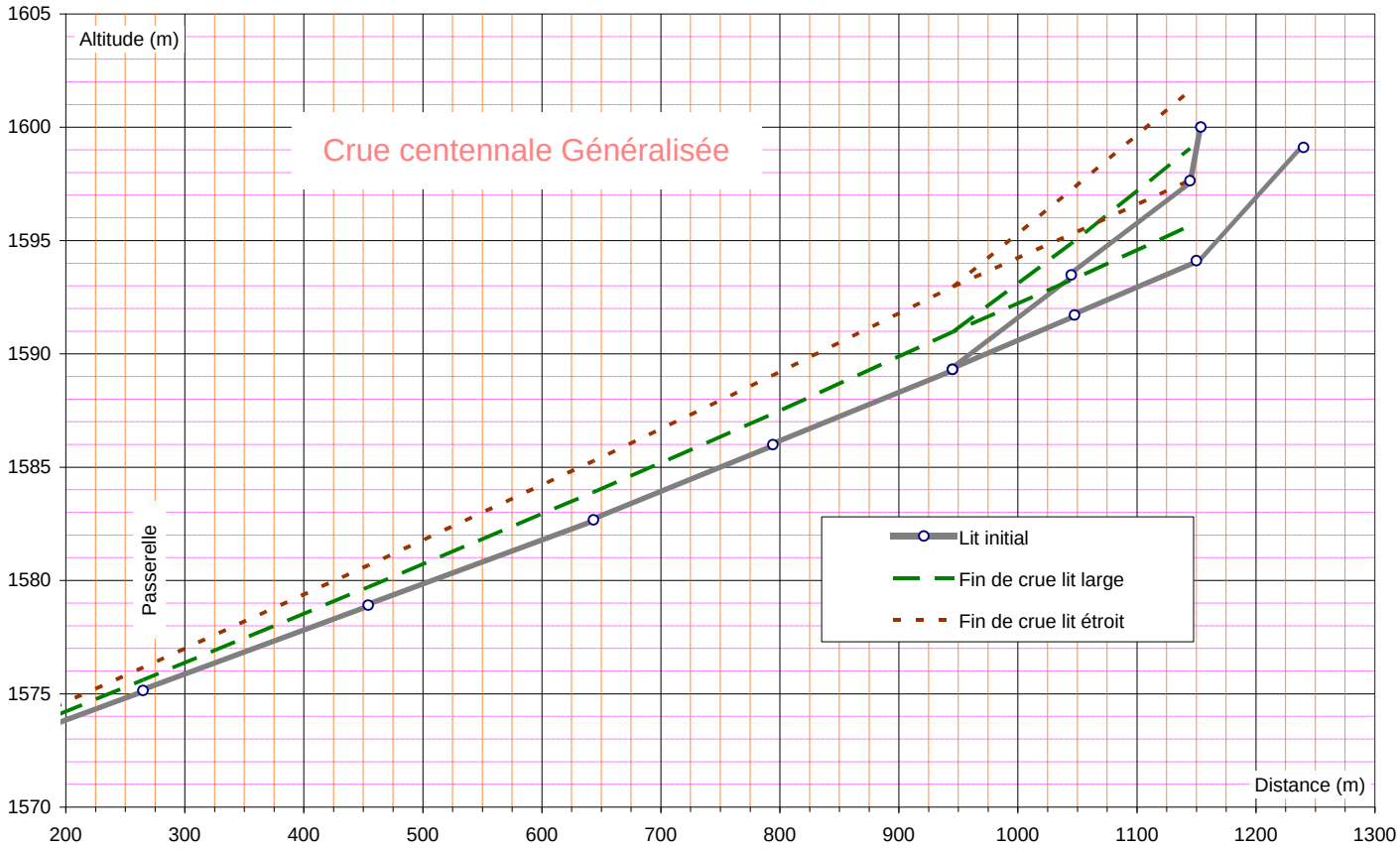


Figure 77 : Crue centennale généralisée et lit étroit.

Ainsi, la préservation d'un lit très large en aval de Ristolas est un élément essentiel de la protection du village.

6.1.3.5. Effet d'un apport majoré du torrent de Ségure

L'analyse des apports solides montre que l'incertitude sur la pente d'équilibre du torrent de Ségure est importante.

Ainsi, un test de sensibilité a été réalisé en considérant une pente d'équilibre de 5,5 % contre 4.5 %. Dans un tel cas, les apports solides pour une crue centennale passent de 90 000 à 130 000 m³.

Le graphique suivante compare les profils en long en fin de crue avec les deux pentes d'équilibre :

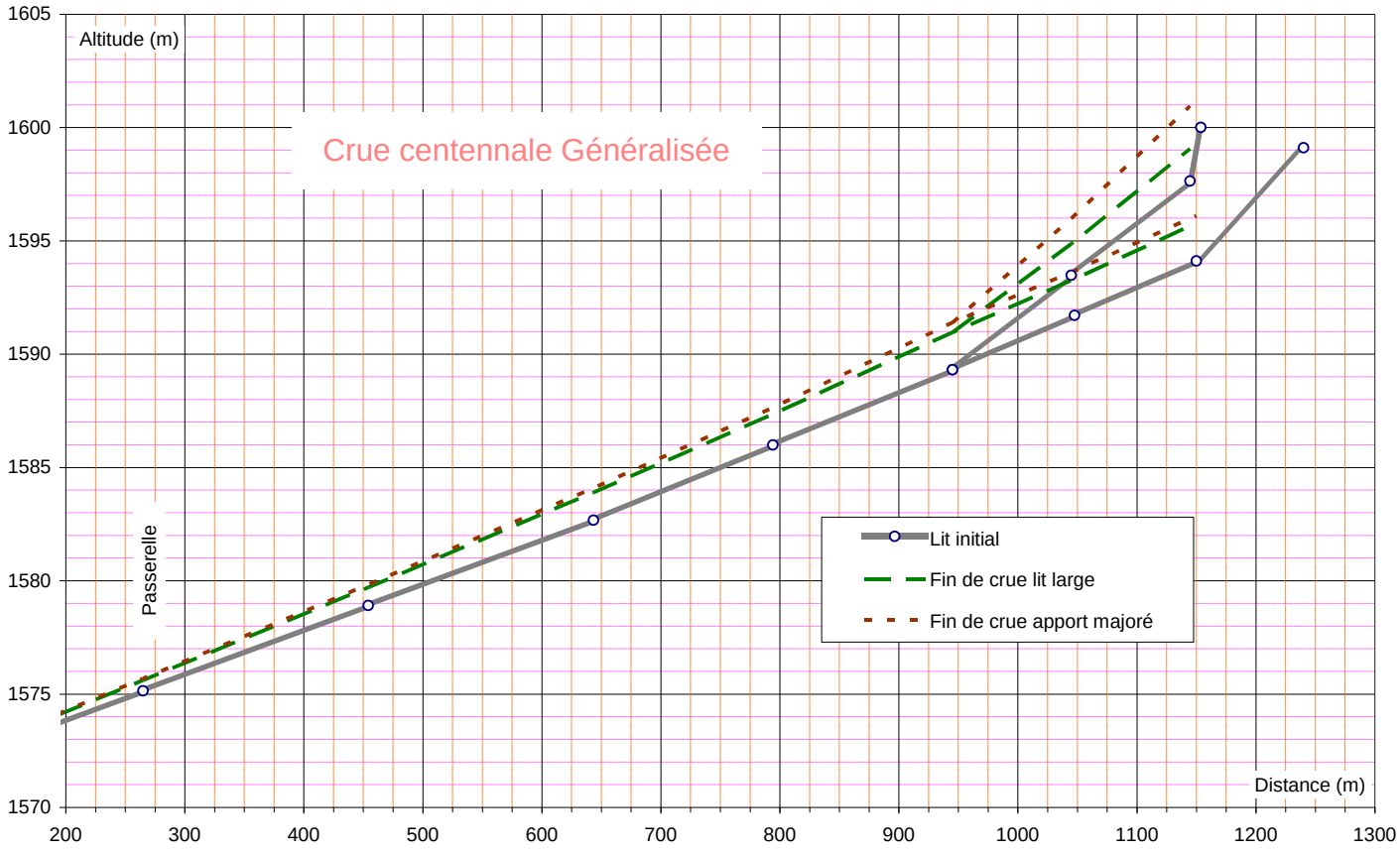


Figure 78 : Crue centennale généralisée et apports solides du Ségure majorés.

Cette figure montre que l'engravement dans le lit du Guil est sensiblement majoré, l'écart étant évidemment d'autant plus important que l'on s'approche de la confluence. Le seuil du Guil reste suffisamment haut pour prévenir un engravement.

Par contre, l'engravement est nettement majoré dans la branche du Ségure et le seuil aval ne présente pas une hauteur suffisante. Cependant, l'engravement sur le seuil reste modéré et il régresserait peu dans le chenal, bloqué par le seuil plus en amont.

6.1.4. Synthèse

La confluence du torrent de Ségure avec le Guil a été judicieusement déplacée en aval du village dans un secteur particulièrement large.

Ainsi, les dépôts peuvent s'étaler largement, ce qui diminue fortement leur épaisseur. Des seuils bloquent - dans la plupart des cas - les dépôts, évitant une augmentation des risques de débordement dans la traversée urbaine.

Il convient de remarquer que cette analyse ne permet pas une détermination très fine des hauteurs d'eau et que les incertitudes sont importantes, notamment sur les apports solides du torrent de Ségure et l'enchainement des crues. Il convient donc d'être prudent par rapport à ces résultats, même s'ils paraissent relativement robustes.

L'aménagement est donc satisfaisant. Deux précautions doivent être prises :

- Entretenir les ouvrages dès les premières dégradations afin d'éviter que la situation se dégrade et que le coût des travaux devienne prohibitif.
- Préserver absolument le lit large de cette zone de confluence au moins jusqu'à la limite de commune. Un abaissement des terrasses dans la zone de confluence est souhaitable.

6.2. Modélisation de la confluence Guil - Bouchet

6.2.1. Objectifs

Il s'agit ici de mettre en évidence le fonctionnement de la confluence du Guil avec le Bouchet en aval d'Abriès et notamment l'ampleur des engravements à la confluence et les risques de dépôts régressifs en amont de la confluence, soit :

- Dans le chenal du Guil notamment au droit du camping.
- Dans le chenal du Bouchet, l'ensemble de la partie aval du chef lieu étant concerné par un éventuel dépôt.

Il s'agit, pour l'essentiel, d'un bilan de volume de matériaux. Ainsi, la simulation est réalisée avec des débits élevés et constants durant une longue période afin de simuler l'engravement observé. Une simulation des niveaux d'écoulement n'a guère de sens car le levé topographique au moyen du LIDAR ne permet pas de connaître la section des ouvrages.

Les apports de la Garcine sont négligés car la très faible pente dans le cours aval de ce torrent arrête la quasi-totalité du transport solide avant la confluence avec le Guil.

6.2.2. Hypothèses

6.2.2.1. Hydrologie

Les bassins versants de ces deux cours d'eau sont situés dans la zone du haut Guil avec des précipitations particulièrement marquées. Le tableau suivant indique les débits de pointe (en m^3/s) et les volumes liquides (en million m^3) :

	Superficie (km^2)	Débit décennal	Débit centennal	Volume décennal	Volume centennal
Guil amont Bouchet	89	60	190	4.7	14.8
Bouchet à Abriès	50	44	138	2.6	8.3

6.2.2.2. Apports solides

Il est possible de calculer les apports solides - comme précédemment - à partir des hypothèses précédentes :

- La lame d'eau correspond à une pluie de 5 jours.
- Le coefficient de ruissellement sur l'ensemble de l'épisode est de 0.3 pour une crue décennale et 0.5 pour une crue centennale.
- La concentration en matériaux est calculée par la formule de Lefort pour la moitié du débit de pointe.

Le tableau suivant indique la pente d'équilibre, les caractéristiques granulométriques et le volume des apports solides :

	Pente (%)	Diamètre moyen (cm)	d_{90}/d_{30}	Volume décennal (m^3)	Volume centennal (m^3)
Guil amont Bouchet	1.9	6	10	27 000	115 000
Bouchet à Abriès	2.8	6	10	30 000	120 000

La simulation est réalisée en considérant un débit constant durant 90 heures. Cela correspond - pour respecter le volume des apports solides - aux débits liquides suivants (en m^3/s) :

	Superficie (km^2)	Débit simulation décennale	Débit simulation centennale
Guil amont Bouchet	89	18	52
Bouchet à Abriès	50	10	29

6.2.2.3. Zone modélisée

La zone modélisée correspond à l'ensemble du cône de déjection du Bouchet et au linéaire entre la Garcine et la passerelle en limite de commune pour le Guil :

Figure 79 : Zone modélisée à la confluence avec le Bouchet.

6.2.3. Résultats obtenus

6.2.3.1. Crue centennale généralisée

Il s'agit ici de mettre en évidence l'évolution des fonds dans le cas - défavorable - d'une crue centennale sur les deux cours d'eau.

La figure suivante montre l'évolution des profils en long en fonction du temps (ou du volume de matériaux apporté durant la crue) dans l'ensemble de la zone modélisée :

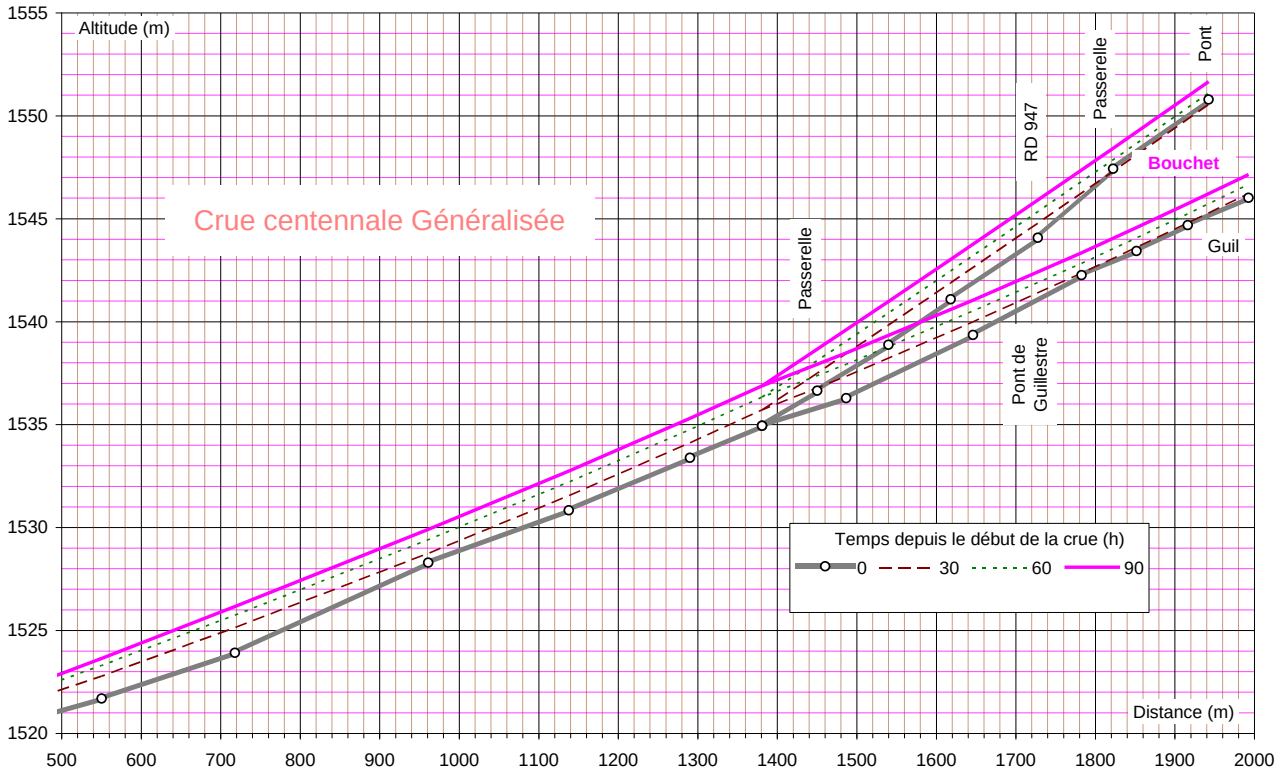


Figure 80 : Évolution des profils en long pour une crue centennale généralisée à Abriès.

Ce graphique montre que l'ensemble de la zone connaît un engravement important :

- En aval, l'engravement serait particulièrement important avec un dépôt de près de 2 mètres dans la zone étroite entre la confluence et la zone alluvionnaire du Gouret.
- Dans la zone de confluence, il approche 2 mètres. Cet engravement important s'explique en partie par les curages réalisés après la crue de 2008 qui conduisent à un lit particulièrement bas dans l'état actuel et qui impose un dépôt compensatoire.
- Ce remous solide se propage sur le Guil mais il est limité en début de crue par la pente majorée correspondant à l'ancien seuil du pont de Guillestre. Par contre, l'engravement se poursuit vers l'amont si les volumes apportés sont très importants et le lit s'engrave alors jusque dans la zone de l'ancien plan d'eau.
- Cet engravement remonte aussi dans le lit du Bouchet. L'engravement est de 2 mètres environ sur l'ensemble du linéaire aval, y compris au pont de la RD 947.

Il s'agit d'engravements moyens sur l'ensemble de la crue. Dans les faits, les hydrogrammes n'étant pas concomitants, ces engravements peuvent connaître une dynamique différente.

6.2.3.2. Crue centennale du Bouchet et décennale du Guil

Ce cas diffère par une capacité de reprise en aval de la confluence nettement réduite par la forte diminution des apports du Guil. Les apports du Bouchet sont donc plus difficilement repris, même si le volume global des apports est plus faible.

La figure suivante montre l'évolution du lit dans ce cas :

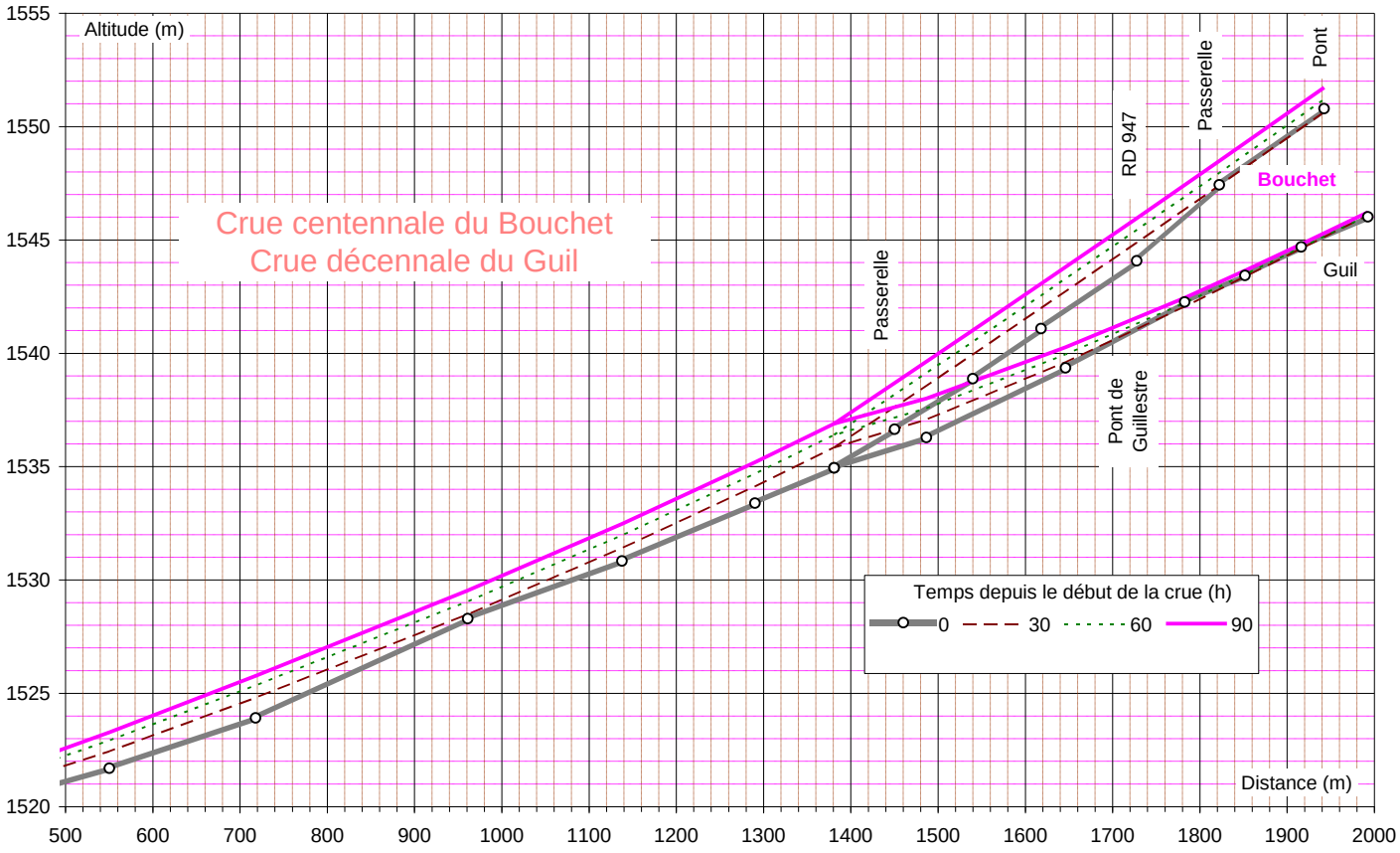


Figure 81 : Crue décennale du Guil et crue centennale du Bouchet

Ce graphique montre une évolution un peu surprenante :

- Le Bouchet ne montre pas d'évolution importante par rapport à la crue centennale généralisée.
- Par contre, Le Guil aval et surtout le Guil amont, où la crue est beaucoup plus faible, connaissent une réduction beaucoup plus nette de l'engravement, surtout lorsque l'on s'éloigne de la confluence. Cela traduit une capacité de transport plus faible et une capacité réduite à étaler les matériaux.

6.2.3.3. Crue décennale du Bouchet et centennale du Guil

Les apports du Bouchet sont ici nettement réduits. La figure suivante montre l'évolution du lit dans ce cas :

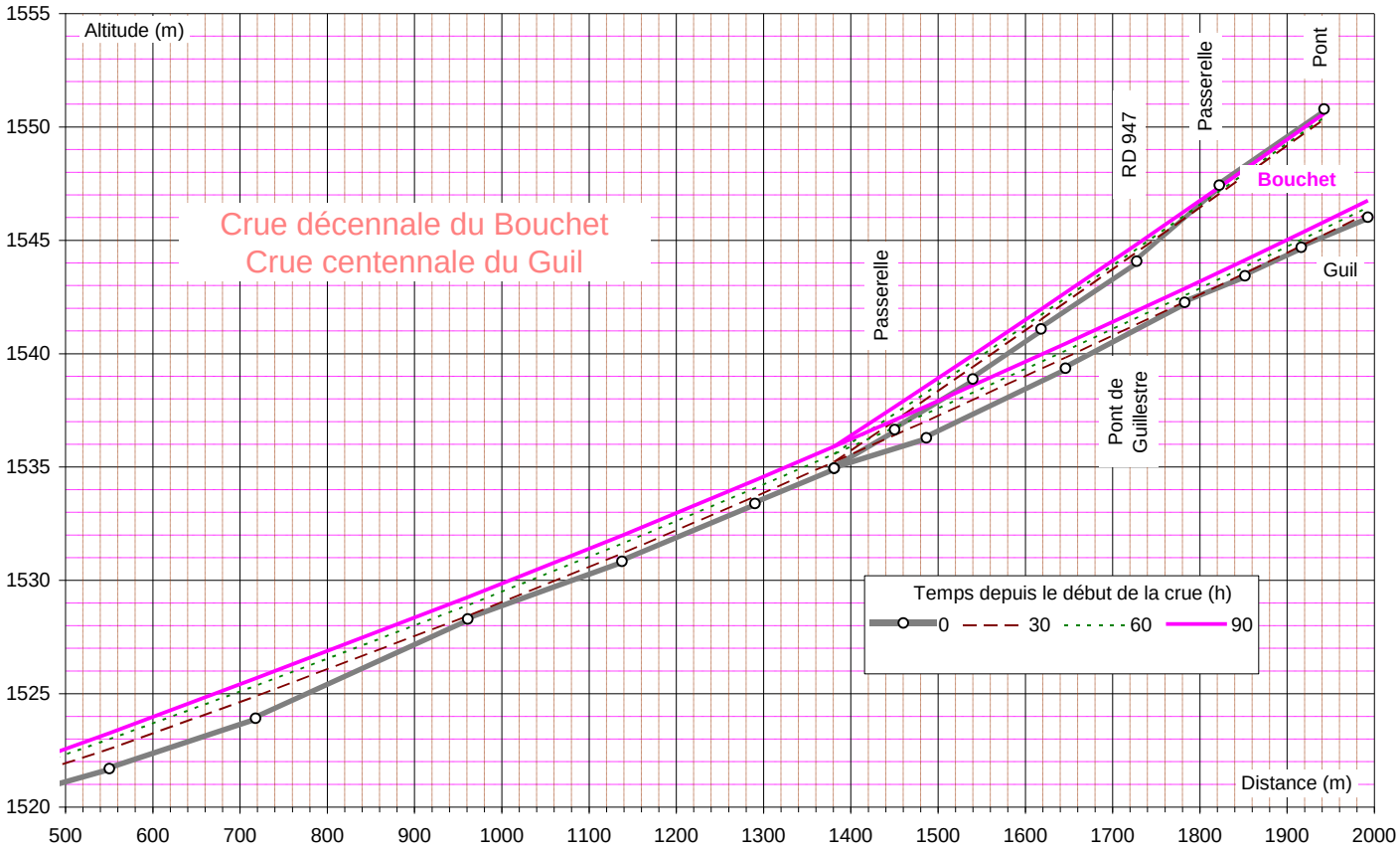


Figure 82 : Crue centennale du Guil et crue décennale du Bouchet.

Le Bouchet - à forte pente - présente une concentration en matériaux supérieure à celle du Guil. La réduction de la crue de cet affluent traduit d'abord une réduction des apports solides… et donc des engravements.

Ainsi, l'engravement à la confluence est réduit de moitié et atteint à peine 1 mètre. Les forts débits du Guil propagent cet engravement sur presque tout le linéaire, et il reste particulièrement important en aval de la confluence.

Dans le lit du Bouchet, l'engravement et réduit et s'annule presque en amont de la RD 947. Associé à la réduction du débit liquide, les risques de débordement sont alors beaucoup plus réduits.

6.2.3.4. Élargissement de la confluence

Les simulations sur le Ségure ont montré l'intérêt d'élargir le lit dans la zone de confluence. Ainsi, une nouvelle simulation est réalisée à la confluence avec le Bouchet en considérant :

- Un recul de la protection du Bouchet en rive gauche, dès l'aval des bâtiments jusqu'à la confluence.
- Un recul de la protection rive droite du Guil dès l'aval du camping jusqu'à la confluence.

La figure suivante permet de situer ce type de configuration avec le tracé indicatif de la nouvelle berge :

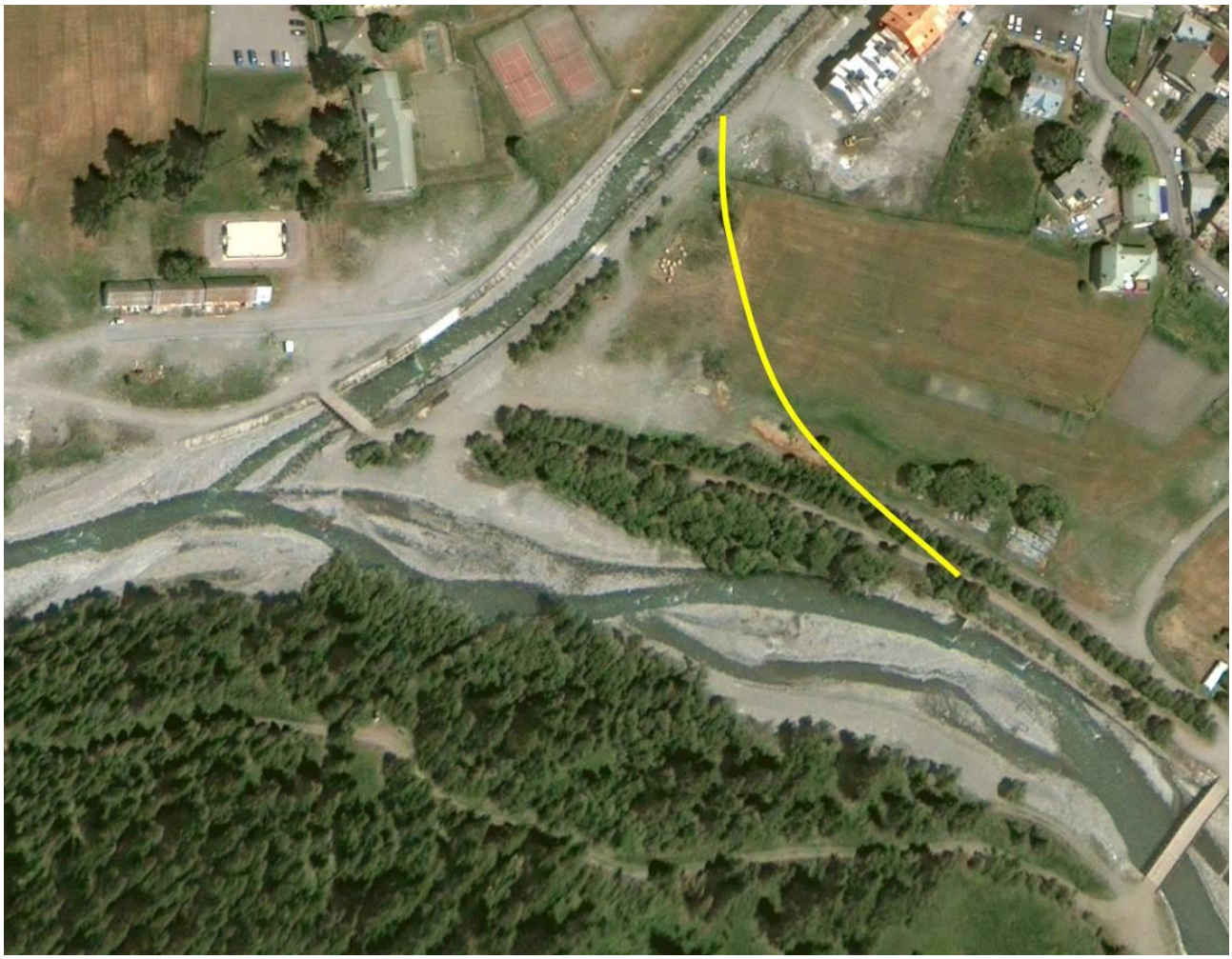


Figure 83 : Principe d'aménagement de la confluence du Bouchet avec le Guil.

Dans ce cas, les niveaux d'engravement seraient les suivants :

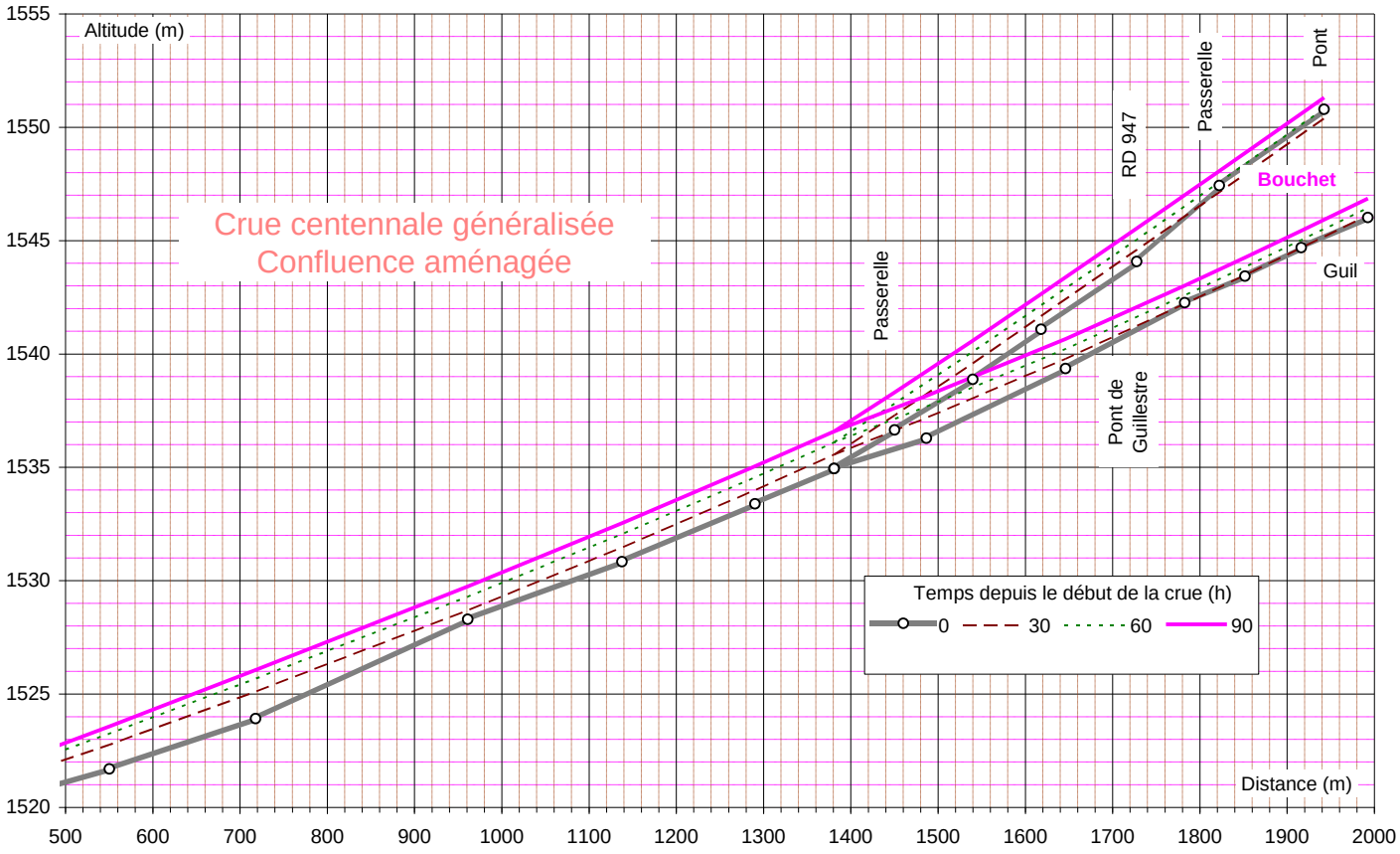


Figure 84 : Crue centennale généralisée avec aménagement de la confluence.

Ce graphique montre que globalement les niveaux du fond sont sensiblement abaissés. La figure page suivante permet de visualiser les niveaux atteints en fin de crue dans l'état actuel et après aménagement.

Ce graphique montre que l'abaissement est de 30 centimètres à la confluence. En aval, l'écart diminue progressivement. Sur le Guil en amont, l'écart reste du même ordre sur l'ensemble de la zone modélisée.

Surtout, l'engravement dans le lit du Bouchet est abaissé d'une quarantaine de centimètres sur l'ensemble du linéaire, ce qui est très significatif.

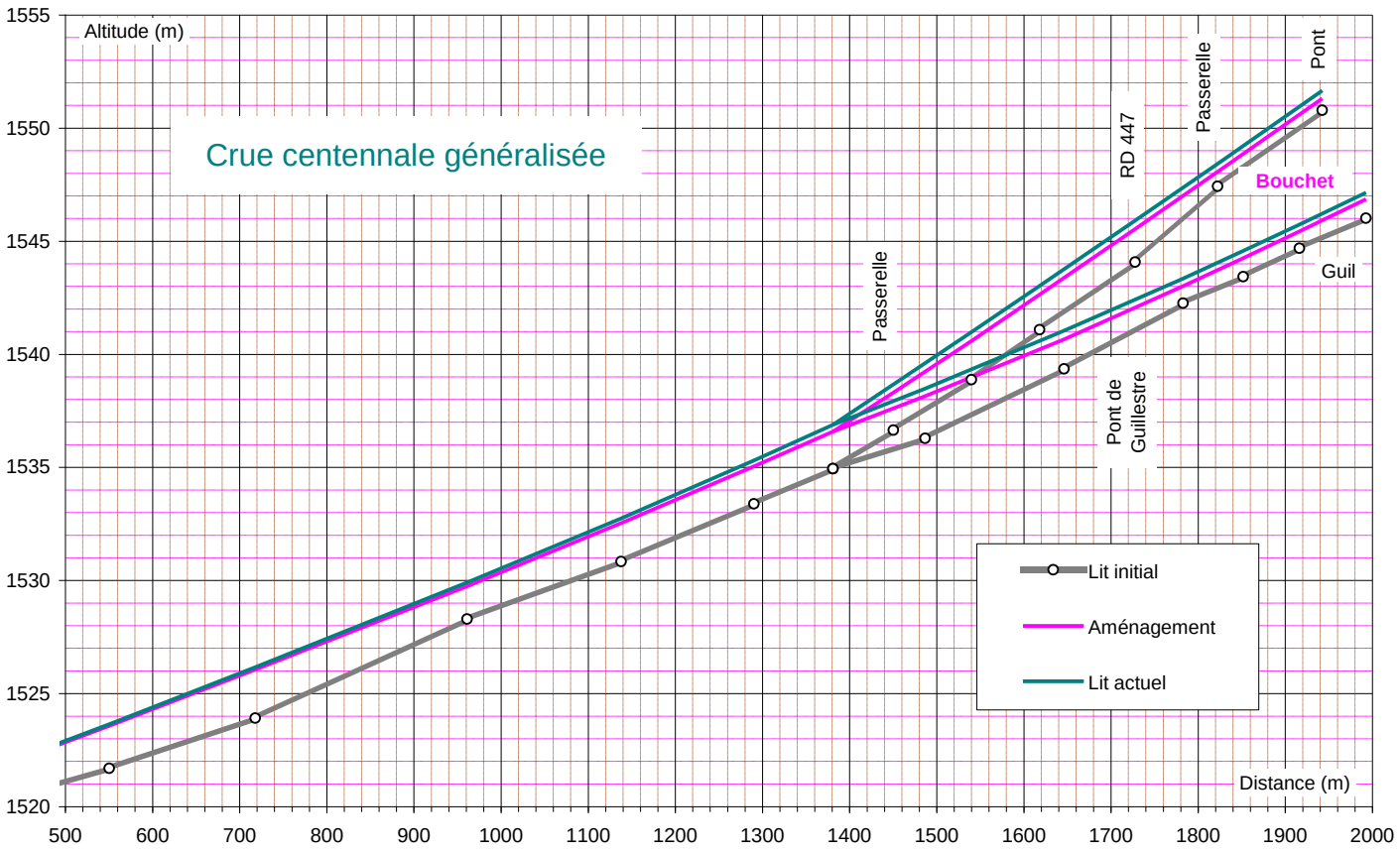


Figure 85 : Crue centennale généralisée avec - ou sans - aménagement de la confluence.

6.2.4. Synthèse

Le torrent du Bouchet, présente - à la confluence - une pente et un bassin versant relativement proche de ceux du Guil. La faiblesse de ces écarts de fonctionnement, explique que la continuité du transport solide soit partiellement assurée.

Cependant, l'engravement à la confluence approche 2 mètres, ce qui est très pénalisant, particulièrement dans la traversée du village par le Bouchet.

Un élargissement du lit dans la zone de la confluence, à l'occasion de la réfection inévitable des protections de berges actuellement très dégradées tant sur le Guil que sur le Bouchet permettrait de gagner une quarantaine de centimètres sur le niveau d'engravement, ce qui est très significatif.

6.3. Modélisation de la confluence Guil - Peynin

6.3.1. Objectifs

Cette modélisation est destinée à analyser le fonctionnement de la confluence du Peynin avec le Guil. La situation est ici beaucoup plus contrastée qu'à Abriès car le Peynin présente un bassin versant beaucoup plus petit que celui du Guil mais avec une concentration en matériaux nettement plus forte.

Une étude[12] a déjà été réalisée par ETRM dans cette zone de confluence. Cette étude est évidemment nettement plus complète car elle ne concernait que ce site et incluait notamment la détermination des niveaux d'eau en fonction de la concomitance des hydrogrammes.

Les simulations ont été entièrement reprises ici afin de prendre en compte :

- Un calcul des volumes de crue cohérent avec les autres simulations.
- Le retour d'expérience de la crue de juin 2000 notamment en ce qui concerne la pente d'équilibre.
- L'évolution de la topographique depuis 1999. La comparaison des profils en long a été réalisée au paragraphe 4.4.3 page 85.

L'objectif étant la simulation de la confluence du Peynin, les apports du Lombard ne sont pas analysés finement et l'hypothèse retenue correspond à un débit liquide de 1 m^3/s sans apport solide, ce qui correspond à un scénario crédible, et d'ailleurs proche de la crue de juin 2000. La plaine des Ribes permet une déconnexion partielle des deux confluences.

[12] Commune d'Aiguilles - Étude hydraulique du torrent de Peynin sur son cône de déjection - ETRM - Avril 2000

6.3.2. Hypothèses

6.3.2.1. Hydrologie

Il s'agit, pour les deux cours d'eau de la zone du haut Guil avec des précipitations particulièrement marquées. Le tableau suivant indique les débits de pointe (en m^3/s) et les volumes liquides (en million m^3) :

	Superficie (km^2)	Débit décennal	Débit centennal	Volume décennal	Volume centennal
Guil amont Peynin	162	80	260	8.5	27
Peynin	15	14	45	0.8	2.2

Ces valeurs montrent une disproportion très nette entre le Guil et le Peynin.

6.3.2.2. Apports solides

Il est possible de calculer les apports solides - comme précédemment - à partir des hypothèses précédentes :

- La lame d'eau correspond à une pluie de 5 jours.
- Le coefficient de ruissellement sur l'ensemble de l'épisode est de 0.3 pour une crue décennale et 0.5 pour une crue centennale (0.45 pour le Peynin déjà un peu moins exposé).
- La concentration en matériaux est calculée par la formule de Lefort pour la moitié du débit de pointe.

Le tableau suivant indique la pente d'équilibre, les caractéristiques granulométriques et le volume des apports solides :

	Pente (%)	Diamètre moyen (cm)	d_{90}/d_{30}	Volume décennal (m^3)	Volume centennal (m^3)
Guil amont Peynin	1.4	6	10	27 000	120 000
Peynin	8.3	12	12	46 000	170 000

La simulation est réalisée en considérant un débit constant durant 93 heures. Cela correspond - pour respecter le volume des apports solides - aux débits liquides suivants (en m^3/s) :

	Superficie (km^2)	Débit simulation décennale	Débit simulation centennale
Guil amont Peynin	162	29	86
Bouchet à Abriès	15	3	8

6.3.2.3. Zone modélisée

La zone modélisée correspond à l'ensemble du cône de déjection du Peynin et à l'ensemble de la zone alluvionnaire d'Aiguilles, y compris la confluence avec le Lombard :

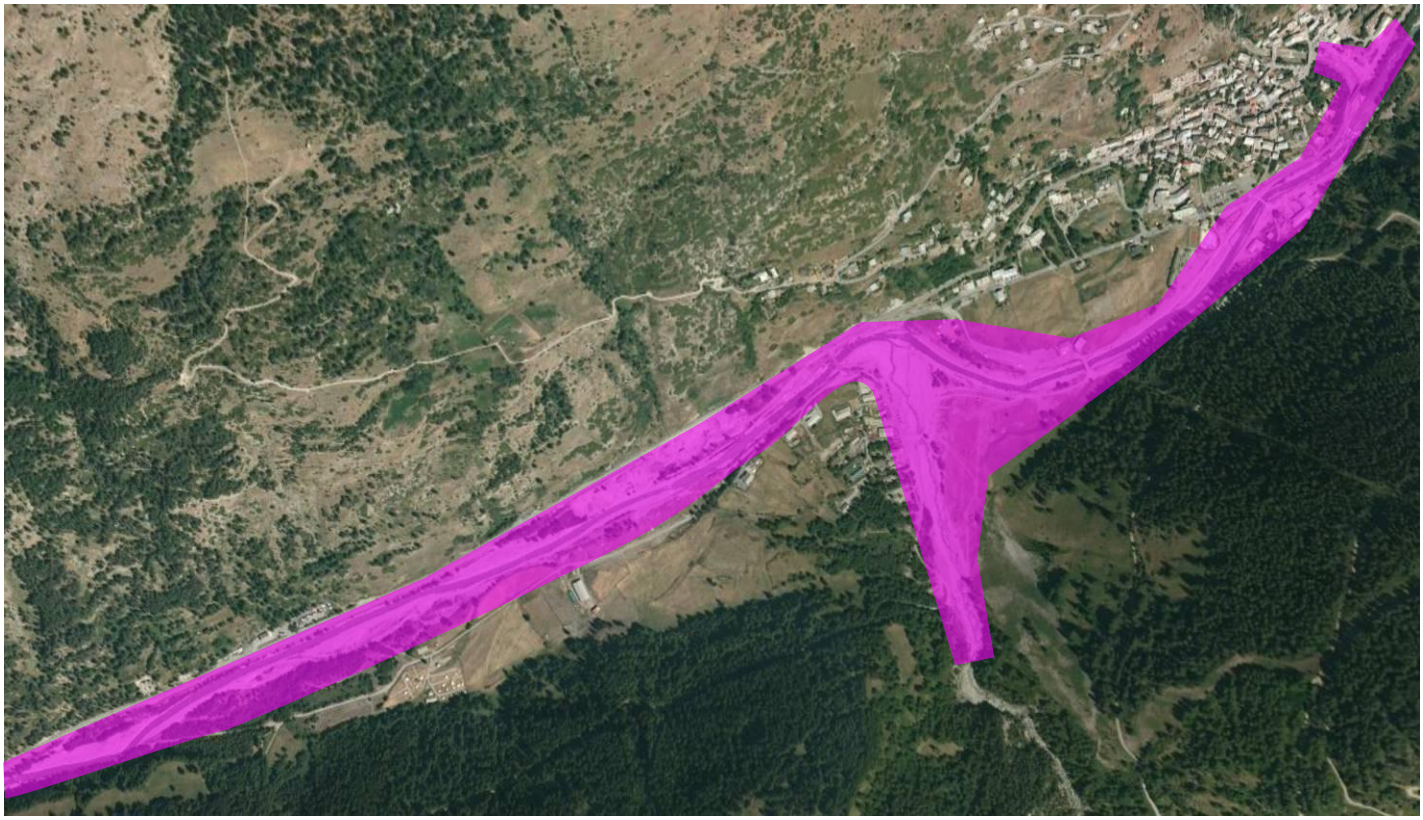


Figure 86 : Zone modélisée à la confluence avec le Peynin.

6.3.3. Résultats obtenus

6.3.3.1. Crue centennale généralisée

Il s'agit ici de mettre en évidence l'évolution des fonds dans le cas - défavorable - d'une crue centennale sur les deux cours d'eau. Le graphique page suivante montre que l'ensemble de la zone connaît un engravement important :

- Toute la partie aval du Peynin connaît un engravement considérable qui correspond au surcreusement du chenal dans cette zone.
- La confluence subit un engravement important, en rapport direct avec les apports solides considérables du Peynin.
- Ce remous solide remonte dans le Guil et concerne toute la plaine des Ribes jusqu'au radier du Lombard…. calé sur le niveau de 1957. Toute la plaine d'Aiguilles serait alors engravée. La pente est relativement faible, les apports du Guil amont ayant été laminés en amont par la plaine du Gouret.
- En aval de la confluence, l'engravement est particulièrement important et rapide. Cette caractéristique est temporaire et correspond uniquement au surcreusement causé par les

extractions qui ont été réalisées dans cette zone. Cela montre le caractère illusoire des curages pour éviter les engravements et les débordements.

- Outre l'effacement du surcreusement lié au curage, le lit en aval de la confluence subit un engravement important lié aux apports solides extrêmes du Peynin. Cet engravement présente une pente nettement supérieure à celle de l'amont de la confluence, ce qui traduit un apport solide très majoré. C'est évidemment dans cette zone qu'un élargissement est le plus efficace pour réduire l'épaisseur des dépôts en crue.

La figure suivante montre l'évolution des profils en long en fonction du temps (ou du volume de matériaux apporté durant la crue) dans l'ensemble de la zone modélisée :

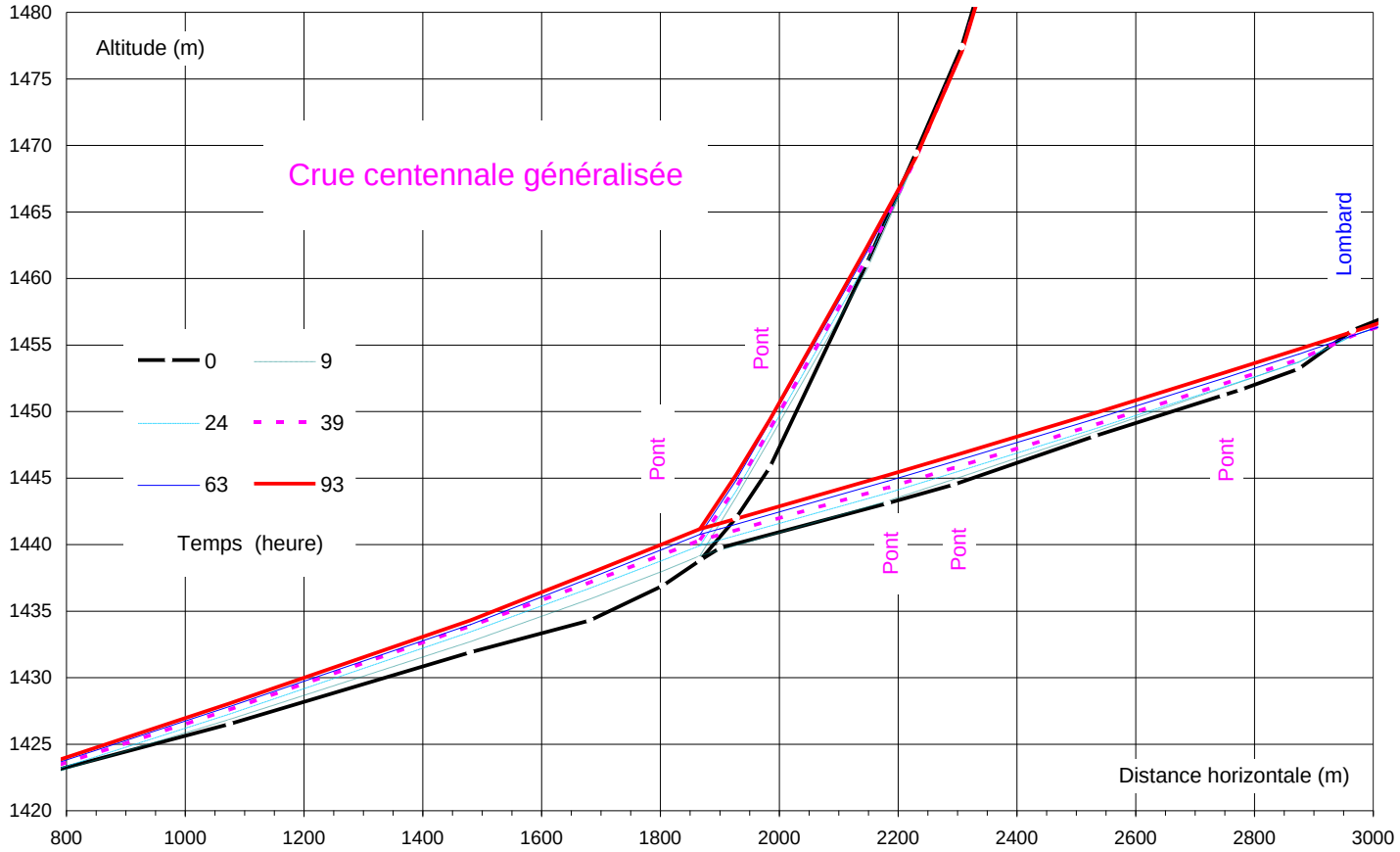


Figure 87 : Évolution des profils en long pour une crue centennale généralisée à Aiguilles.

Il s'agit d'engravements moyens sur l'ensemble de la crue. Dans les faits, les hydrogrammes n'étant pas concomitants, ces engravements peuvent connaître une dynamique différente.

6.3.3.2. Crue centennale du Peynin et décennale du Guil

Ce cas diffère par une capacité de reprise en aval de la confluence nettement réduite par la forte diminution des apports - surtout liquides - du Guil. Les apports du Peynin sont donc plus difficilement repris et restent préférentiellement dans la zone de confluence. La figure suivante montre l'évolution du lit dans ce cas :

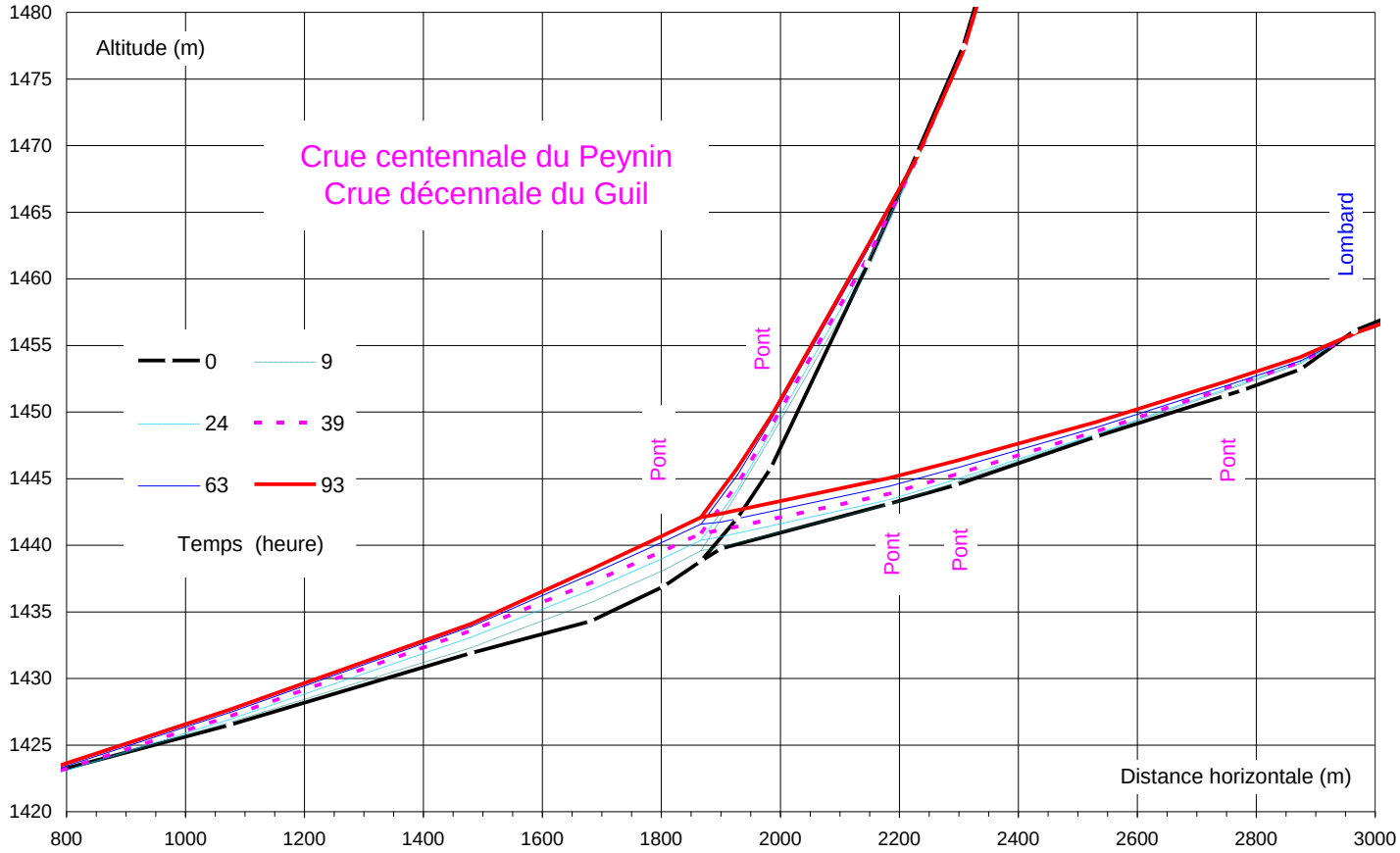


Figure 88 : Crue décennale du Guil et crue centennale du Peynin

Ce graphique montre un dépôt très net à la confluence. Dans le lit du Peynin, les évolutions sont peu modifiées. Par contre, les engravements sont beaucoup plus faibles dans la plaine d'Aiguilles. En aval de la confluence, l'effacement de la zone d'extraction est encore plus rapide et les dépôts très massifs en aval de la confluence justifient un élargissement du lit. Ensuite, la décroissance des engravements est plus brutale, les débits du Guil ne permettant plus un étalement aussi importants des apports du Peynin.

6.3.3.3. Crue décennale du Peynin et centennale du Guil

Les apports du Peynin sont ici nettement réduits ce qui correspond à des dépôts beaucoup plus faibles. La figure suivante montre l'évolution du lit dans ce cas :

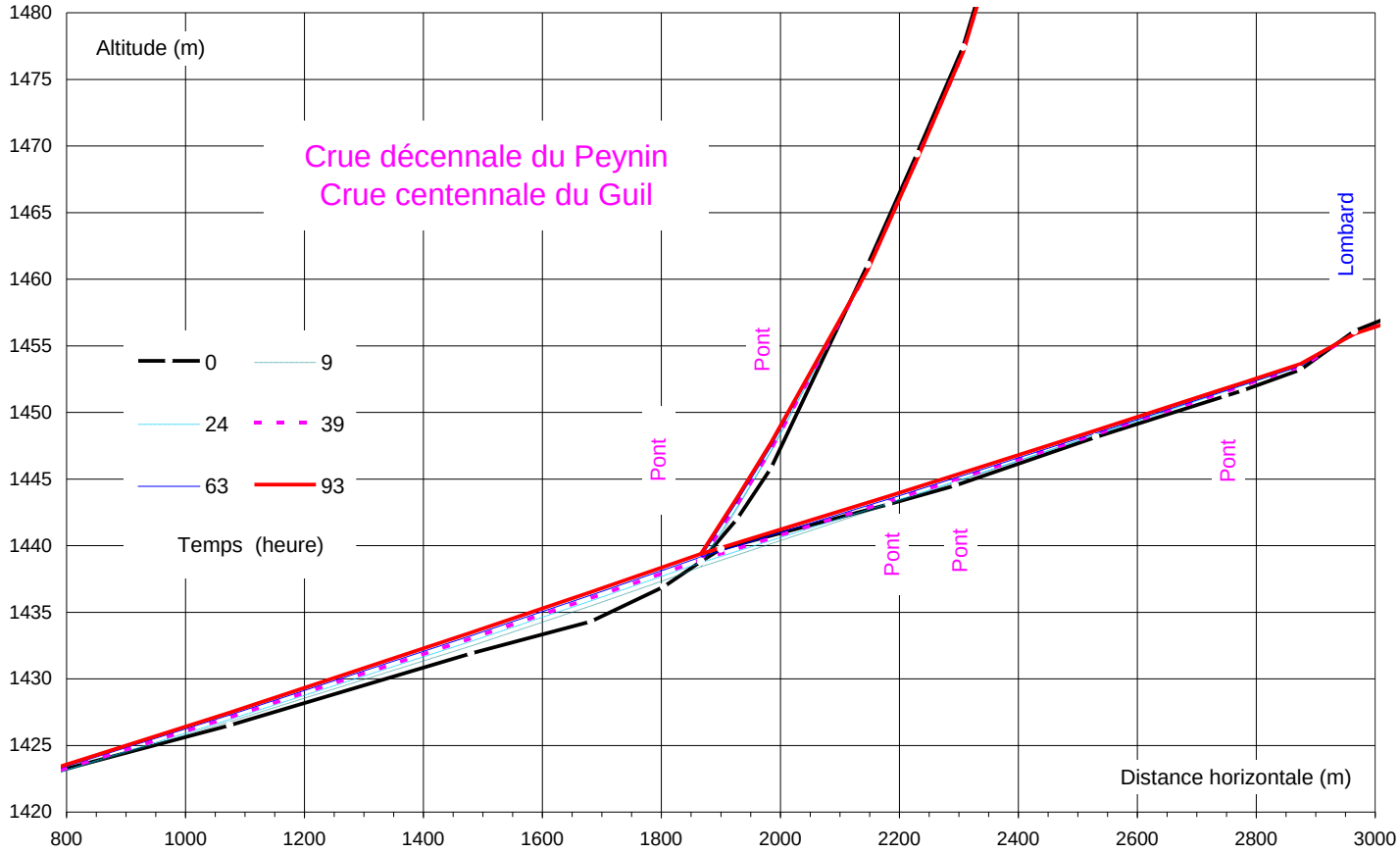


Figure 89 : Crue centennale du Guil et crue décennale du Peynin.

Les dépôts sont alors beaucoup plus réduits et concernent :

- La zone d'extraction de matériaux qui est rapidement rebouchée. On note cependant que, dans un premier temps, le lissage des pentes entraine une érosion des matériaux dans la zone de confluence avec un risque majoré d'affouillement des ouvrages. Le comblement de cette dépression est un préambule à la crue dans tous les scénarios, montrant que cette intervention n'apporte aucune amélioration.
- La partie aval du Peynin qui correspond à la réduction de pente déjà évoquée précédemment. Tout transport solide dans le Peynin entraine un dépôt de matériaux dans le lit aval dont la pente est artificiellement réduite.

6.3.3.4. Élargissement du lit en aval de la confluence

Il s'agit ici de mettre en évidence l'influence d'un élargissement du lit en aval du pont de la zone artisanale sur l'évolution des fonds dans le cas - défavorable - d'une crue centennale sur les deux cours d'eau.

Ainsi, la simulation est réalisée, en considérant une largeur de 50 mètres en aval de la confluence avec le Peynin (profils P11 à P13), ce qui parait accessible.

La figure suivante montre l'évolution des profils en long en fonction du temps (ou du volume de matériaux apporté durant la crue) dans l'ensemble de la zone modélisée. Elle indique aussi les niveaux atteints dans l'état actuel avec un lit étroit :

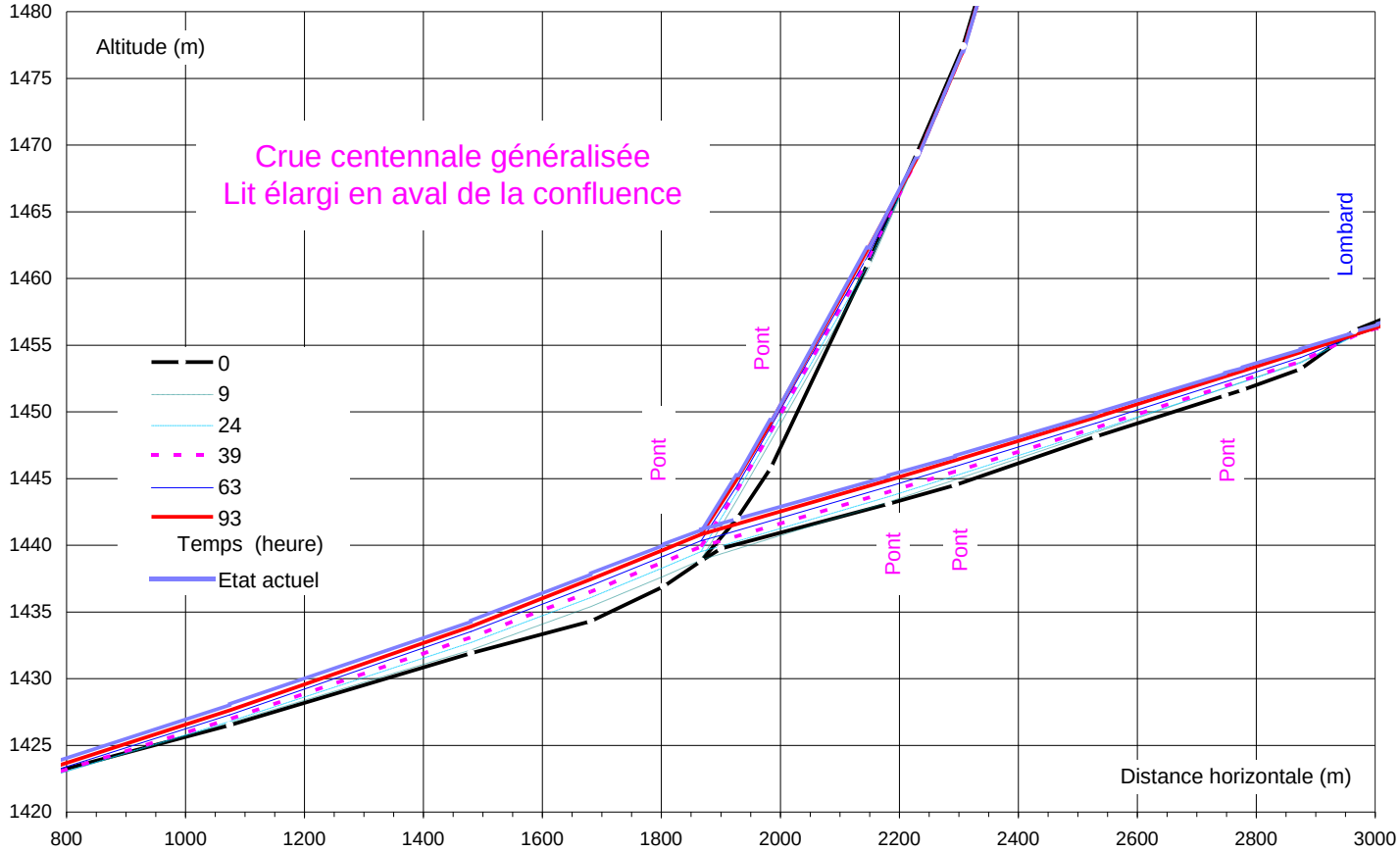


Figure 90 : Évolution des profils en long pour une crue centennale généralisée à Aiguilles.

Ce graphique montre évidemment les mêmes évolutions que dans l'état actuel. Cependant, la comparaison des niveaux met en évidence un abaissement sensible du niveau du fond sur l'ensemble du linéaire, bien au delà de la zone élargie :

- L'abaissement est de 40 centimètres à la confluence mais aussi sur presque tout le linéaire aval.
- Cet abaissement décroit progressivement sur toute la plaine des Ribes (où il est de l'ordre de 30 centimètres). Il est encore d'une vingtaine de centimètres à la confluence avec le Lombard.
- De la même façon, l'abaissement diminue progressivement en remontant dans le lit du Peynin où il concerne essentiellement le lit aval.

Ainsi, cette amélioration est modeste mais sensible sur l'ensemble de la zone d'étude. Dans la zone élargie, elle s'ajoute à une réduction de la hauteur d'eau.

6.3.4. Synthèse

La modélisation de la confluence avec le Peynin conduit aux remarques suivantes :

- Le dépôt sur le cône de déjection du Peynin est très marqué à cause de la rupture de pente dans le lit aval.
- L'engravement à la confluence peut menacer toute la plaine d'Aiguilles.
- Un élargissement du lit en aval de la confluence avec torrent de Peynin permet de réduire sensiblement les épaisseurs de dépôt sur l'ensemble du linéaire.
- Le curage en aval de la confluence parait illusoire dans tous les scénarios. Sa principale conséquence serait un affouillement des ouvrages dans la zone de confluence en l'absence de crue du Peynin.

6.4. Confluence Guil - Aigue Blanche

6.4.1. Objectifs

Il s'agit ici d'analyser le fonctionnement de la confluence de l'Aigue Blanche avec le Guil. Cependant, le comportement de cette zone est complexe et le modèle numérique de l'évolution des fonds n'y parait pas le plus adapté :

- Les apports de l'Aigue Blanche ont été considérables en 1957 et ont conduit à une redéfinition totale du fond de vallée dans des proportions encore supérieures à celles rencontrées ailleurs dans le Queyras.
- Plus encore que sur le torrent de Ségure, les apports de l'Aigue Blanche sont difficilement quantifiables. En effet, la pente d'équilibre est mal connue et la crue de 1957 parait très particulière.
- Entre Ville Vieille et Château Queyras, le lit est aujourd'hui extrêmement étroit, à tel point que le transport solide est modifié lors des plus fortes crues et que les ouvrages construits après la crue de 1957 ont été totalement détruits.
- Le pont de Château Queyras, à l'entrée d'une gorge très étroite, conduit à une contraction de l'écoulement et au "blocage" des matériaux en amont.

Ces phénomènes de contractions sont ici majeurs et ne peuvent être correctement modélisés. De plus, l'incertitude sur les apports solides rend la modélisation numérique très illusoire. Ainsi, la solution retenue consiste à réaliser une étude hydraulique plus précise et à définir les niveaux d'équilibre correspondants. Cette approche est justifiée pour les crues extrêmes, les volumes transités étant suffisamment importants et les crues suffisamment longues pour que l'équilibre soit quasiment atteint.

6.4.2. Fonctionnement général

Il est possible de distinguer plusieurs tronçons entre Ville Vieille et Château Queyras. Le fonctionnement de chacun est analysé ci-dessous.

6.4.2.1. Secteur de la confluence

Les photos pages suivantes montrent ce tronçon, avant, juste après la crue de 1957 et actuellement afin de mettre en évidence l'évolution du site.

La photo de 1948 est particulièrement surprenante car elle correspond à l'absence d'apports de l'Aigue Blanche depuis très longtemps, comme si ce torrent n'avait "jamais" formé de cône de déjection :

- Le Guil longe le versant rive gauche de la vallée, comme si le cône de déjection de l'Aigue Blanche n'existait pas, alors que la rivière devrait être classiquement repoussée sur le versant opposé.

- Le lit du Guil est étroit et visiblement peu mobile, ce qui suggère une continuité du transport solide… et l'absence d'apports solides de l'Aigue Blanche.
- Le lit de l'Aigue Blanche est étroit et boisé, témoignant d'un apport solide très modéré.

Figure 91 : Zone de confluence en 1948.

Cette faible activité est confirmée par la photo ancienne suivante :

Figure 92 : Lit étroit et stable avant 1957.

La photo suivante montre le site juste après la crue de 1957 :

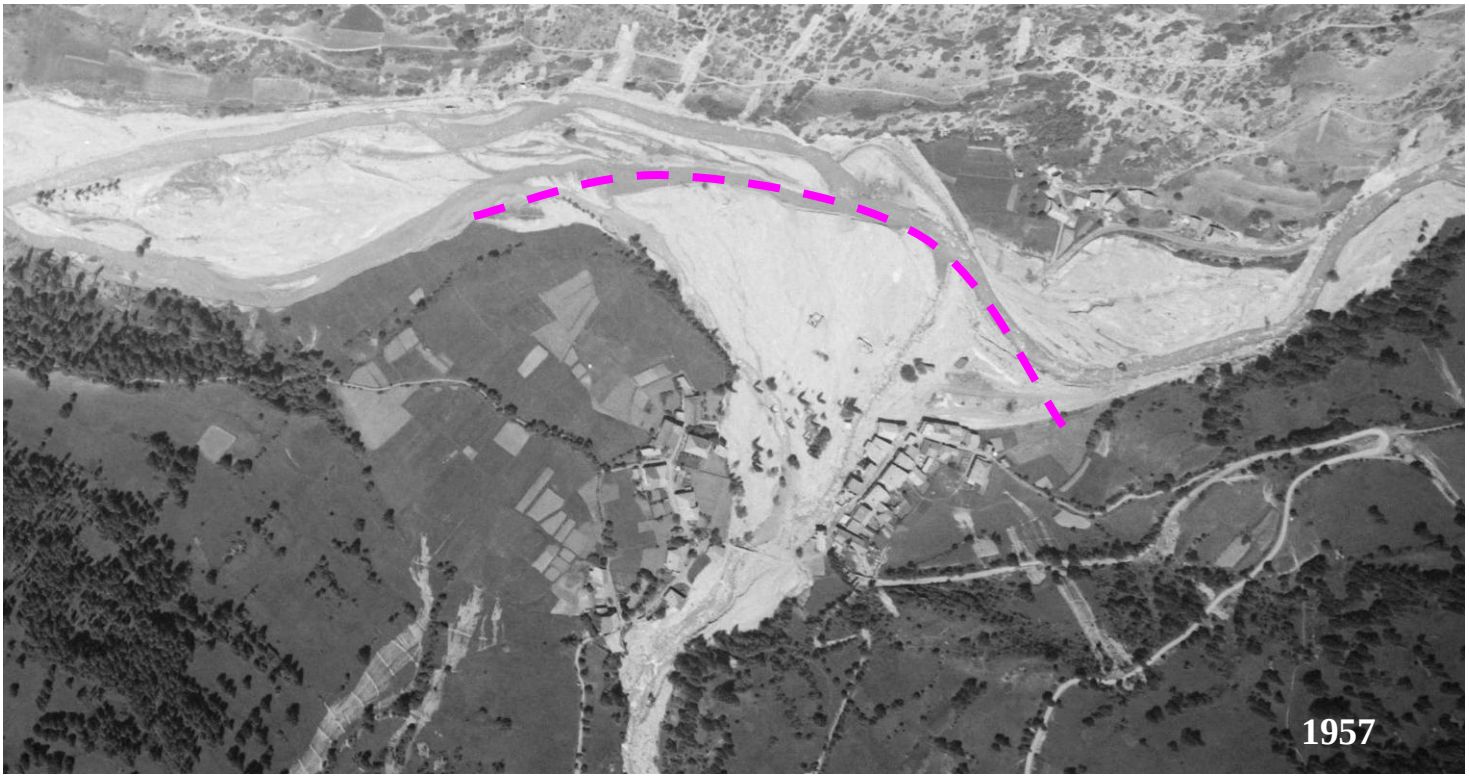


Figure 93 : Cône de déjection de l'Aigue Blanche en 1957.

Cette photo montre une morphologie totalement nouvelle :

- Le lit amont de l'Aigue Blanche a subit des divagations très importantes. Le torrent a balayé presque tout son cône de déjection… dont plus de la moitié du village. L'Aigue Blanche a créé un véritable cône de déjection (mis en évidence sur la photo ci-dessus) avec un engravement très important.
- Le lit amont du Guil présente aussi une forte activité… mais en conservant globalement son tracé. Par contre, le lit s'est remarquablement élargi. Cet élargissement s'explique en partie par le "blocage" du Guil par l'Aigue Blanche et le dépôt qui en a résulté en amont.
- Au droit du cône de déjection, le lit du Guil a été repoussé vers le versant opposé, ce qui correspond à une morphologie "normale" de cône de déjection, mais très différente de celle avant la crue.
- En aval de la confluence, le lit du Guil s'est considérablement élargi avec à la fois un recul de la rive droite (érosion jusqu'au pied de versant) et un recul de plusieurs dizaines de mètres en rive gauche.

Ainsi, tout se passe comme si l'Aigue Blanche s'était révélée comme un torrent de premier ordre lors de cette crue et avait contraint le Guil - puis l'homme - à adapter la morphologie du lit à cette "nouvelle" situation.

La photo suivante montre la zone de confluence actuelle :

Figure 94 : Confluence actuelle du Guil avec l'Aigue Blanche et ancien tracé du Guil.

L'évolution est particulièrement importante sous le double effet de la crue de 1957 et des travaux qui ont suivis :

- l'Aigue Blanche bénéficie d'un large chenal qui repousse en aval la confluence avec le Guil. Dans son cours inférieur, l'Aigue Blanche suit le même tracé que le Guil avant 1957. Cependant, la pente y est forte sous l'effet des dépôts considérables du torrent qui ont totalement remodelé les terrains. Avec cette nouvelle configuration, les dépôts massifs qui se sont produits sur le cône de déjection en 1957 ne seraient plus possibles en cas de crue extrême et devraient être reportés en aval.
- Le Guil est canalisé sur l'ensemble du linéaire. Ce nouveau tracé prend en compte la formation du cône de déjection de l'Aigue Blanche. Ainsi, au droit du pont, le Guil a été déplacé de 120 mètres par rapport à la situation avant 1957 ! L'ancien tracé du Guil est indiqué en pointillés sur la photo précédente.
- En aval de la confluence, le nouveau tracé le long de la rive gauche a été entériné avec un recul de près de 140 mètres de berge. Une piste de ski de fond limite un peu la largeur actuellement disponible, mais il s'agit d'un ouvrage fusible. Même si le lit est aujourd'hui plus large, il est nettement plus étroit que celui qui avant été balayé en 1957 pour permettre le dépôt des matériaux. En effet, lors de la réalisation des travaux, une partie de la zone de dépôt a été exclue du lit. Elle est actuellement boisée.

La zone de confluence montre le caractère très exceptionnel de la crue de l'Aigue Blanche en 1957 et une modification profonde de la morphologie dans cette zone avec une meilleure prise en compte des apports potentiels des apports de ce torrent.

6.4.2.2. Zone centrale et étroite

Les photos suivantes regroupent les évolutions dans la zone centrale :

Figure 95 : Vues de la zone centrale avant et après 1957 et actuellement.

Ces photos montrent des évolutions très différentes, notamment par rapport au torrent de Platenq :

- En 1948, le lit du Guil est globalement étroit… sauf dans la zone de confluence où les apports du torrent imposent des respirations du lit. Le torrent de Platenq a évidemment repoussé le Guil vers le versant opposé.
- La crue de 1957 impose globalement un élargissement considérable du lit avec les dépôts associés. Cette évolution a tout naturellement conduit à un recul du cône de déjection du torrent de Platenq, d'autant plus que la crue de ce dernier a été très modérée. L'ensemble du fond de vallée est occupé par les dépôts du Guil et la largeur du lit dépasse 180 mètres en aval.
- Les aménagements dans cette zone n'ont pas pris en compte la nouvelle morphologie du lit et ils se caractérisent par un rétrécissement considérable du lit du Guil, sa largeur passant de 180 mètres (en 1957) à seulement 25 mètres aujourd'hui ! Ce rétrécissement correspond à la zone de confluence avec le torrent de Platenq et surtout au lit en aval. Il est le fait de la RD 947, en amont, et de la route communale, en aval.

Ainsi, ce tronçon a connu des évolutions radicalement différentes de celles du tronçon amont, illustrant par contraste le caractère très exceptionnel de la crue de l'Aigue Blanche :

- Le lit du Guil était ici plus divaguant qu'en amont sous l'effet des apports du torrent de Platenq, alors actif.
- La crue du Guil a conduit à un recul du cône de déjection du torrent de Platenq alors qu'en amont, l'Aigue Blanche avait formé son cône en avançant fortement.
- L'ampleur des phénomènes en amont a conduit au respect de la nouvelle morphologie dans la zone de confluence avec l'Aigue Blanche. Ce n'est pas le cas ici où les aménagements ont visés la minimisation de l'espace dédié au Guil.

6.4.2.3. Amont du verrou rocheux de Château Queyras

Le phénomène prépondérant à l'aval de la plaine correspond au verrou rocheux de Château Queyras qui impose un rétrécissement brutal. Ainsi, les fluctuations de débit liquide entrainent des évolutions très rapides des hauteurs d'eau avec une tendance au dépôt très marquée en amont.

Les photos pages suivantes montrent l'évolution de cette zone, avec - là encore - un comportement très particulier :

- En 1948, le lit est remarquablement large et divaguant, ce qui contraste fortement avec le lit étroit et stable à la même époque à Ville Vieille. Si la crue de 1948 peut expliquer cette divagation très marquée, cette photo montre avant tout que l'amont du verrou est très instable lors des crues.
- La crue de 1957 a submergé l'ensemble du fond de vallée. Cette situation s'explique par les forts apports de l'Aigue Blanche mais surtout par le verrou qui conduit à des dépôts d'autant plus importants que la crue est forte.
- Comme en amont, cette nécessité de divagation est ici niée par le rétrécissement imposé par la route communale et la protection qui y est associée. Le rétrécissement est moins marqué qu'en amont et l'augmentation des contraintes hydrauliques est plus modérée. Par contre, il ne persiste qu'une faible capacité de dépôt… en l'absence de débordement.

Figure 96 : Vue de l'amont du verrou de Château Queyras.

6.4.3. Analyse des profils en long

Un remarquable ensemble de mesures est disponible dans ce secteur, notamment après la crue de 1957. Ces données sont évidemment beaucoup plus précises qu'une modélisation numérique, particulièrement complexe ici.

La figure suivante regroupe les profils en long disponibles sur ce tronçon mettant en évidence les évolutions lors de la crue de 1957, deux profils en long de cette période étant disponibles :

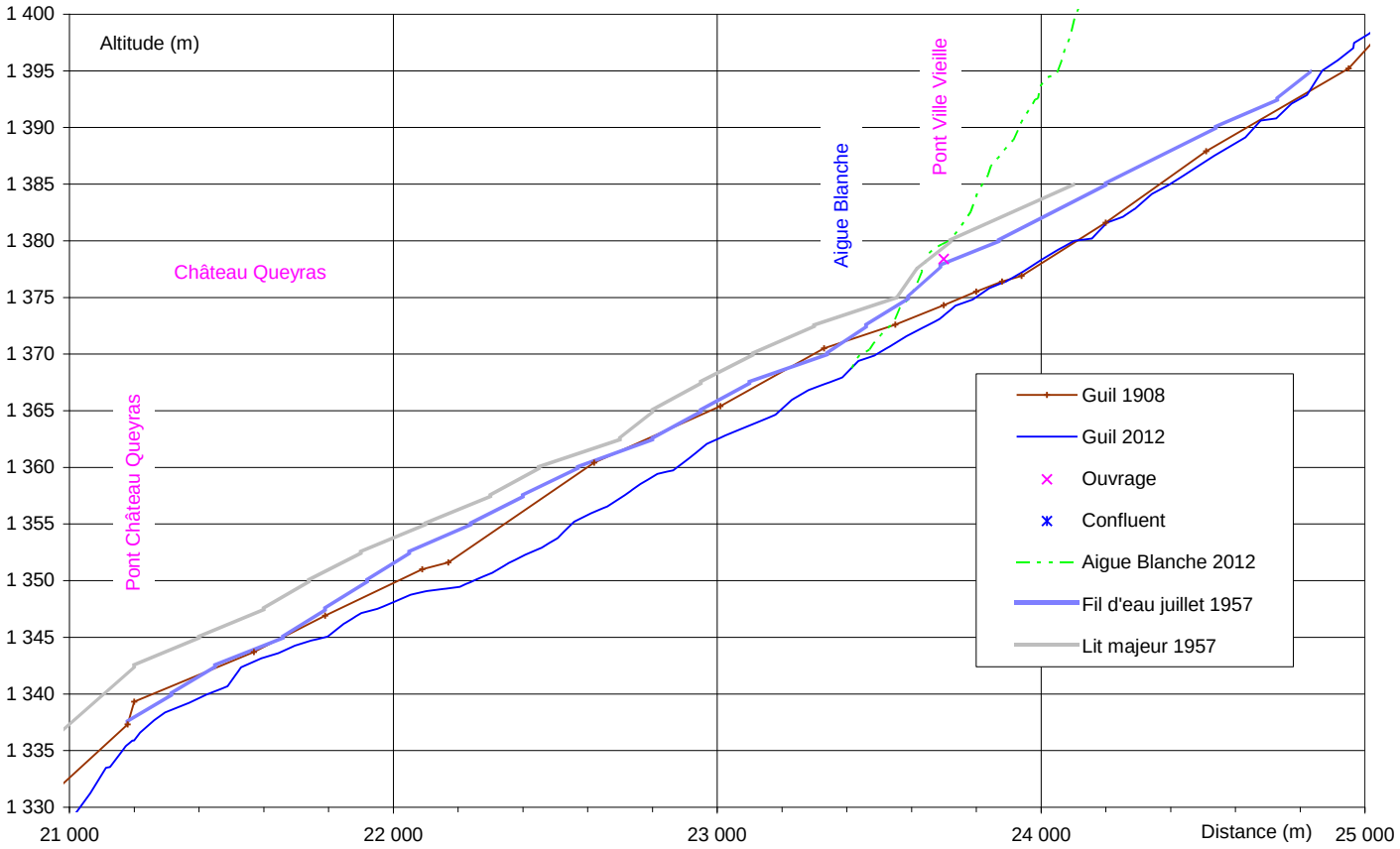


Figure 97 : Profils en long en amont de Château Queyras.

Il est possible de retracer les évolutions – et leurs causes – de la façon suivante :

- Le profil en long de 1907 est globalement régulier.
- Durant la crue de 1957 les engravements ont été majeurs, comme indiqué précédemment. Le profil en long du lit majeur indiqué sur le graphique montre le niveau durant la crue. L'engravement est considérable avec une remontée de l'ordre de quatre mètres dans la zone de confluence avec l'Aigue Blanche. Cette évolution est considérable même si le recalage des abscisses est ici très délicat à cause du déplacement du lit.
- Le profil en long correspondant au niveau après la décrue de 1957 montre la reprise des matériaux avec un "faible" débit. Elle s'est produite lorsque le rétrécissement de Château Queyras n'était plus sensible. Ainsi, la reprise des matériaux est très forte au droit du pont de Château Queyras puis diminue progressivement vers l'amont et deviennent très faible en amont du confluent avec l'Aigue Blanche. Malgré cette première reprise, le lit reste anormalement

haut. C'est sur ce niveau de base qu'ont vraisemblablement été dimensionnés les principaux ouvrages.

- Aujourd'hui, le niveau de 1907 est restauré en amont du pont de Ville Vieille. Par contre, les niveaux en aval de la confluence sont particulièrement bas. Le graphique suivant met en évidence les évolutions du fond lors des dernières décennies :

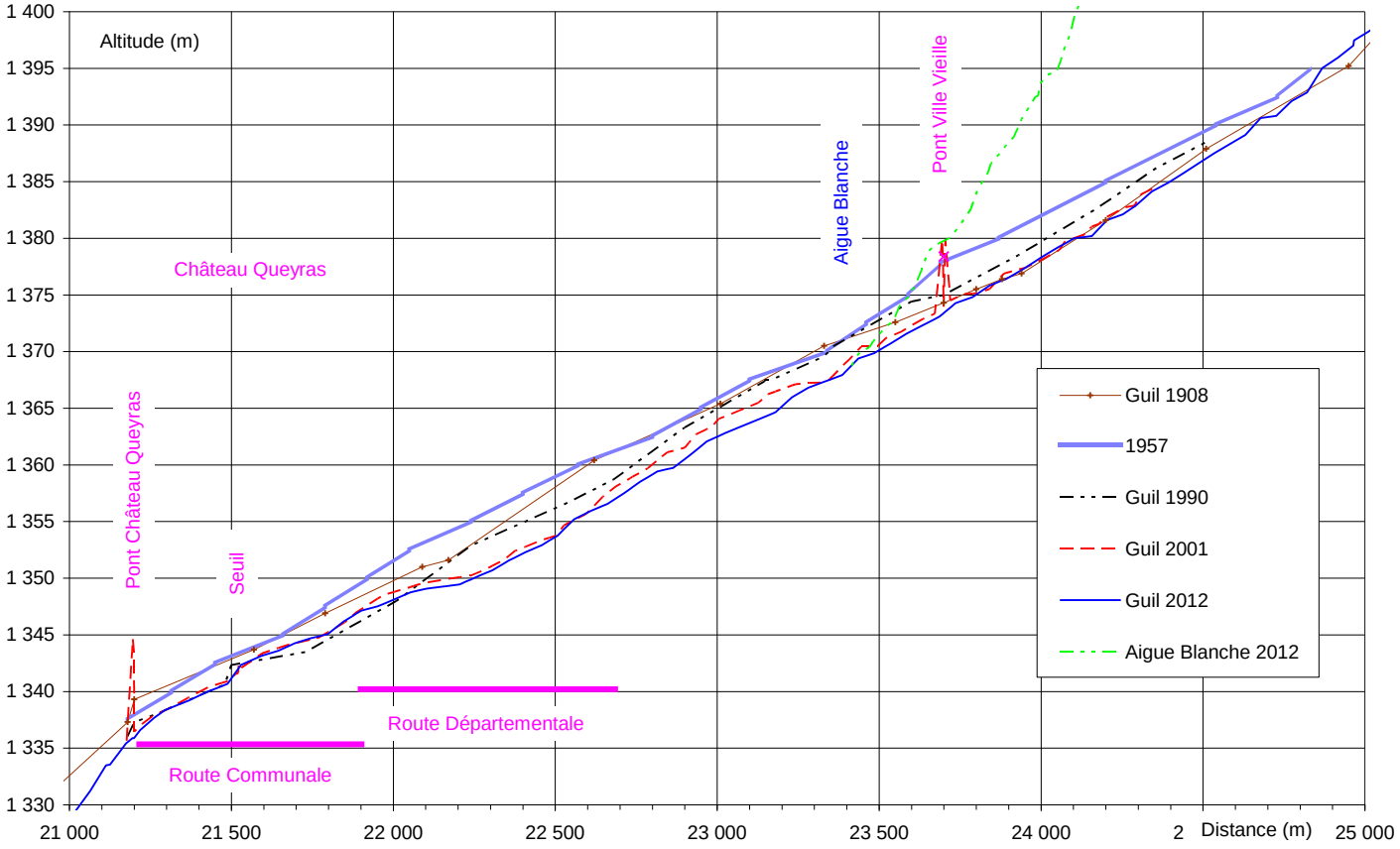


Figure 98 : Profils en long récents en amont de Château Queyras.

Ce graphique met en évidence les évolutions suivantes :

- Entre 1957 et 1990 (et même le début 2000), le phénomène de reprise se poursuit lentement en l'absence de forte crue. L'étude de 1990 indique que les affouillements d'ouvrage sont préoccupants dans ce tronçon. Un seuil a d'ailleurs été construit en amont du pont de Château Queyras.

- Les crues de 2000 (surtout celle de juin) ont nettement accéléré la reprise des matériaux dans ce tronçon, le lit retrouvant en différents points le niveau de 1907 (comme à Ville Vieille ou Château Queyras). Cependant, un phénomène lié à la conception des ouvrages d'après 1957 s'ajoute : Le lit, dans la partie centrale, est beaucoup trop étroit, coincé entre le versant (où quelques glissements de terrain sont désormais actifs) et la route qui ménage un lit majeur trop large dans ce tronçon au détriment du lit mineur. Un camping et un captage d'alimentation en eau potable sont implantés entre la route et le versant. Ce rétrécissement impose, lors des fortes crues, des vitesses très élevées et un surcreusement du fond. Les crues de 2000 ont été les premières à mettre ce phénomène en évidence. L'enfoncement du lit dans les zones les plus critiques dépasse 2 mètres durant la seule année 2000 ! Les ouvrages, déjà mal fondés, n'ont pu

résister et ont basculé dans le lit. Les zones où les protections de berge sont actuellement détruites correspondent exactement au surcreusement que l'on observe sur le profil en long.

- Après les crues de 2000, la zone étroite s'était particulièrement encaissée alors que le lit amont - plus large, n'avait pas subit cet enfoncement. En effet, le rétrécissement - en remontant les niveaux - réduit les risques d'affouillements en amont… pour les débits élevés. Par contre, les périodes de hautes eaux qui ont suivi, et même la crue de 2008 - déjà peu intense à ce niveau - ont propagé l'enfoncement du lit en amont par érosion régressive. Ainsi, L'enfoncement est de près de 2 mètres entre le confluent avec l'Aigue Blanche et celui avec le torrent de Platenq. Il s'agit - de loin - de la principale évolution du lit sur la dernière décennie. Elle témoigne d'un profond déséquilibre dans ce secteur. Suivant l'hydrologie, une poursuite de l'érosion dans le lit du Guil en amont de la confluence n'est pas exclue, mais vraisemblablement avec une ampleur plus faible. Les protections, dans ce secteur, sont déjà très sensibles à l'affouillement.

La photo ci-dessous montre le lit très encaissé dans ce secteur et les vestiges de protection de berge :

Photo 7 : Affouillement et destruction des protections de berges en aval de Ville Vieille.

La pente qui détermine le transport solide est celle de la ligne de charge[13]. Autrement dit, la rivière ajuste le fond de façon à lisser la pente de la ligne de charge. La figure suivante montre de façon schématique une telle évolution des fonds :

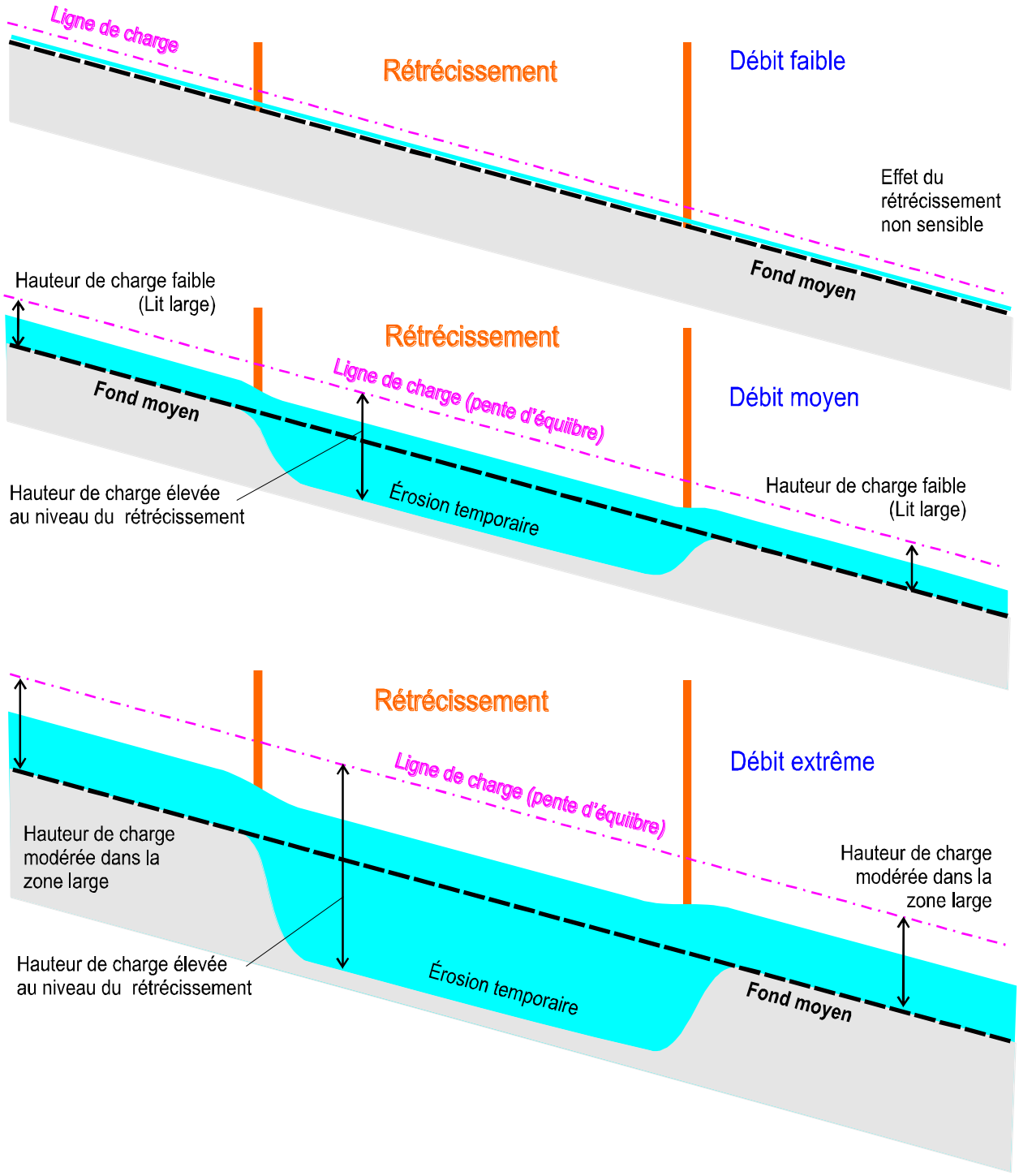


Figure 99 : Dépôt temporaire au droit d'un long rétrécissement.

[13] La charge est définie comme le niveau d'eau majoré du terme $V^2/2g$. Elle est représentative de l'énergie de l'écoulement et correspondant, par exemple, à la remontée du niveau à l'amont d'une pile de pont. C'est la pente de la ligne de charge qui est représentative du transport solide.

Cette figure montre le comportement dans une zone de rétrécissement :

- Pour un faible débit liquide, l'effet du rétrécissement n'est pas sensible : le profil en long a tendance à s'uniformiser mais le débit risque d'être trop faible pour une reprise complète et les surcreusements peuvent persister - de façon résiduelle - surtout si la décrue est rapide.
- Pour un débit intermédiaire, la hauteur d'eau et de charge est plus importante au niveau du rétrécissement. La pente de la ligne de charge étant constante, cela conduit à un enfoncement du lit dans la zone étroite. Cet enfoncement explique la destruction des protections de berge. Cette situation correspond aux crues récentes et particulièrement celle de juin 2000.
- Pour un débit extrême, la hauteur de charge est très importante au niveau du rétrécissement. Cela conduit à un creusement maximum. Il est nécessaire pour cela que le transport solide soit assez important pour que le lit s'adapte aux conditions d'écoulement par le creusement du lit. Le niveau bas n'est donc atteint que pour une pointe de crue très longue. Cette condition est remplie par les crues très longues du haut Guil, permettant un réel surcreusement. Les niveaux seraient alors fortement abaissés par rapport au lit très bas actuel.
- A la décrue, le niveau d'équilibre du lit est le même qu'à la crue pour un débit liquide donné. Il y a alors dépôt des matériaux dans la section étroite lors de la réduction du débit liquide. Le lit tend à retrouver son profil sans rétrécissement. Cette évolution peut être très lente, surtout si le linéaire du lit étroit est important, ce qui est le cas ici quasiment jusqu'au pont de Château Queyras.

6.4.4. Comportement en crue

6.4.4.1. Phénomène rencontré

Comme indiqué précédemment, le dépôt massif de matériaux dans la plaine de Château Queyras s'explique par le cumul des apports énormes de l'Aigue Blanche et par le rétrécissement brutal au pont de Château Queyras. Ce dernier conduit à une augmentation considérable des niveaux et génère un dépôt en amont pour les plus fortes crues. Cette contraction est encore amplifiée par le pont - très ancien - qui s'est tout naturellement implanté sur ce site, très favorable par ailleurs pour un franchissement.

Il est intéressant de remarquer que ces deux phénomènes concernent uniquement les très fortes crues. Pour une crue moyenne, telle que Juin 2000, aucun n'a été sensible :

- Le lit de l'Aigue Blanche n'a pas été dépavé et les apports solides sont restés très modérés.
- Le pont de Château Queyras n'a pas causé de surélévation considérable car il n'est pas passé en charge. Les dépôts en amont sont donc restés très réduits.

6.4.4.2. Écoulement au droit du pont

La simulation est réalisée pour une crue comparable à celle de juin 2000 ou pour une crue type 1957 ou centennale. La crue de juin 1957 est de loin la plus forte, avec un temps de retour dépassant les 100 ans dans la zone d'étude. Elle se distingue des autres "grosses" crues par le fait que tous les bassins versant ont été très sollicités, et tous les torrents ont ainsi apporté une quantité considérable de matériaux.

C'est particulièrement le cas de l'Aigue Blanche qui a apporté de grosses quantités de matériaux en 1957, alors que les apports de 2000 étaient plutôt médiocres. Il parait vraisemblable que les apports solides de l'Aigue Blanche lors de la crue de 1957 présentent une période de retour très supérieure au siècle.

La figure suivante correspond aux profils levés au droit du pont mais aussi en aval, à l'entrée dans la gorge (le pont n'est pas représenté) :

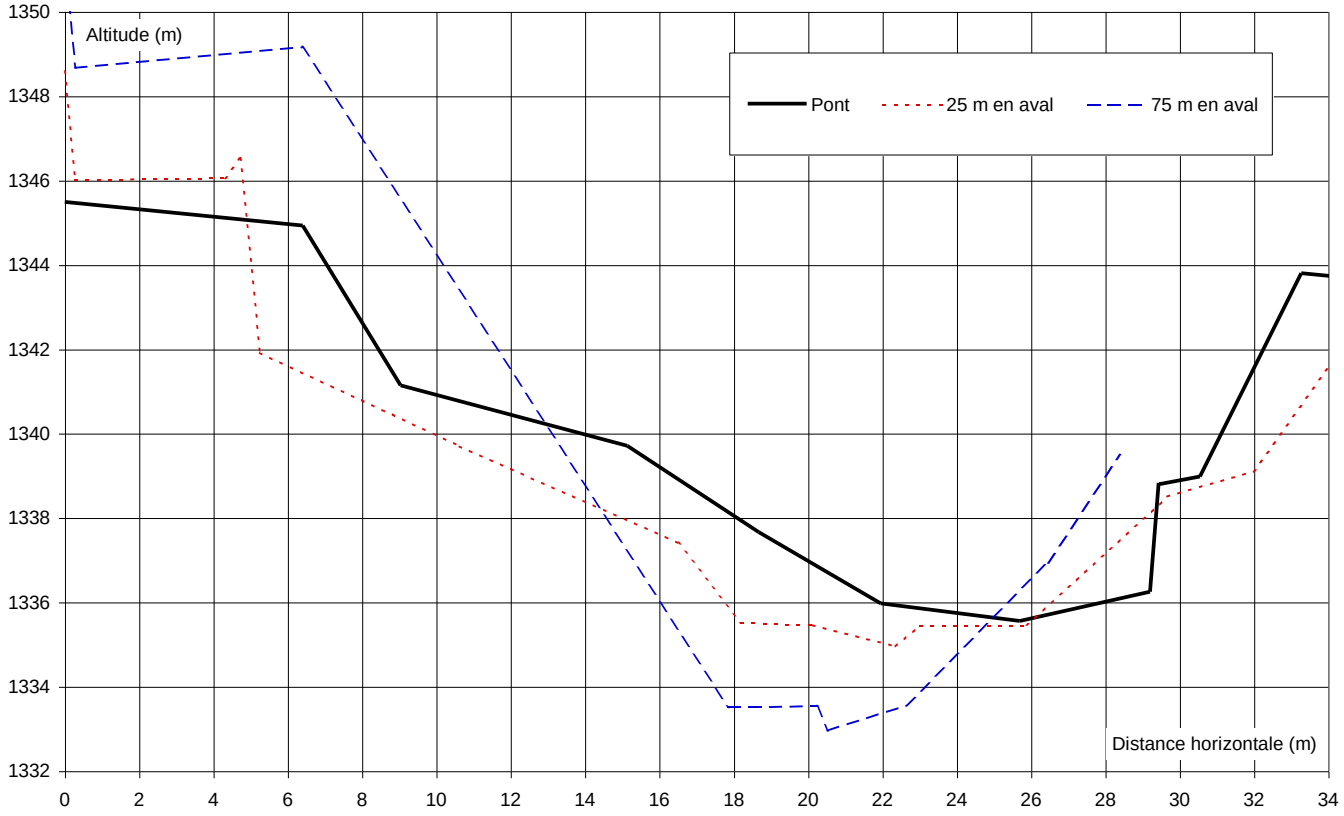


Figure 100 : Sections au droit en en aval du pont.

A partir de ces éléments, il est possible de calculer les niveaux d'eau atteints. Le calcul est réalisé en considérant un écoulement critique.

Pour la crue centennale Le calcul de la surface libre est effectué pour 3 conditions différentes :

- dans l'état actuel, avec la « petite voûte » obstruée,
- avec le pont et après nettoyage/curage de la petite voûte,
- sans le pont.

Les niveaux d'eau sont les suivants :

Dans l'état actuel	Après curage de la petite voûte	Sans le Pont
1343.5 NGF	1342.5 NGF	1341.2 NGF

- Dans les conditions actuelles, l'écoulement sous le pont est tout juste possible en faisant l'hypothèse forte qu'il n'y a pas obstruction par des flottants.
- En considérant que la petite voûte est totalement curée et permet de transiter une partie de l'écoulement, nous trouvons une cote de la surface libre à 1342.48 NGF, soit 2 cm au-dessus du plafond de la petite voûte. Elle est alors en charge, et les flottants arrivant de l'amont risquent d'être coincés contre le pont et de s'accumuler.

La figure suivante regroupe l'ensemble de ces résultats.

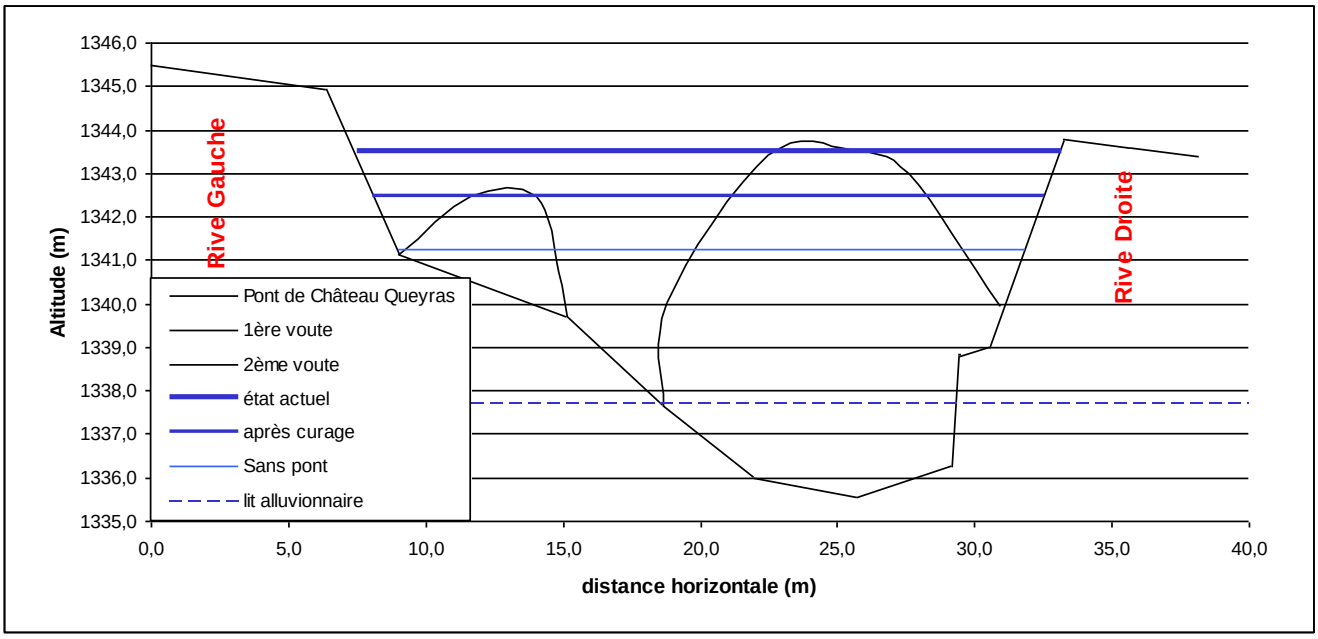


Figure 101 : Influence du Pont sur les niveaux liquides (crue centennale)

Sur ce même graphique, nous avons représenté la hauteur d'eau dans un lit alluvionnaire de 40 mètres de large, dans les mêmes conditions de débit et de pente.

Pour une crue centennale, le rétrécissement dû aux gorges provoque une surélévation de la surface libre de 3,5 mètres à laquelle vient s'ajouter une surélévation de 2 mètres due au rétrécissement provoqué par le pont.

Pour la crue de juin 2000, le débit a été déterminé à partir de l'écoulement au droit du pont. Le niveau d'eau était sensiblement voisin de la cote inférieure de la 1ère voûte, soit environ 1340 NGF. C'est à partir ce niveau qui a permis l'estimation du débit de pointe de 205 m^3/s observé lors de cette crue.

Le même type de calcul que précédemment conduit aux résultats suivants :

	Dans l'état actuel	Sans le pont
Niveau d'eau	1340 NGF	1339.57 NGF

La figure suivante est une coupe schématique au droit du pont :

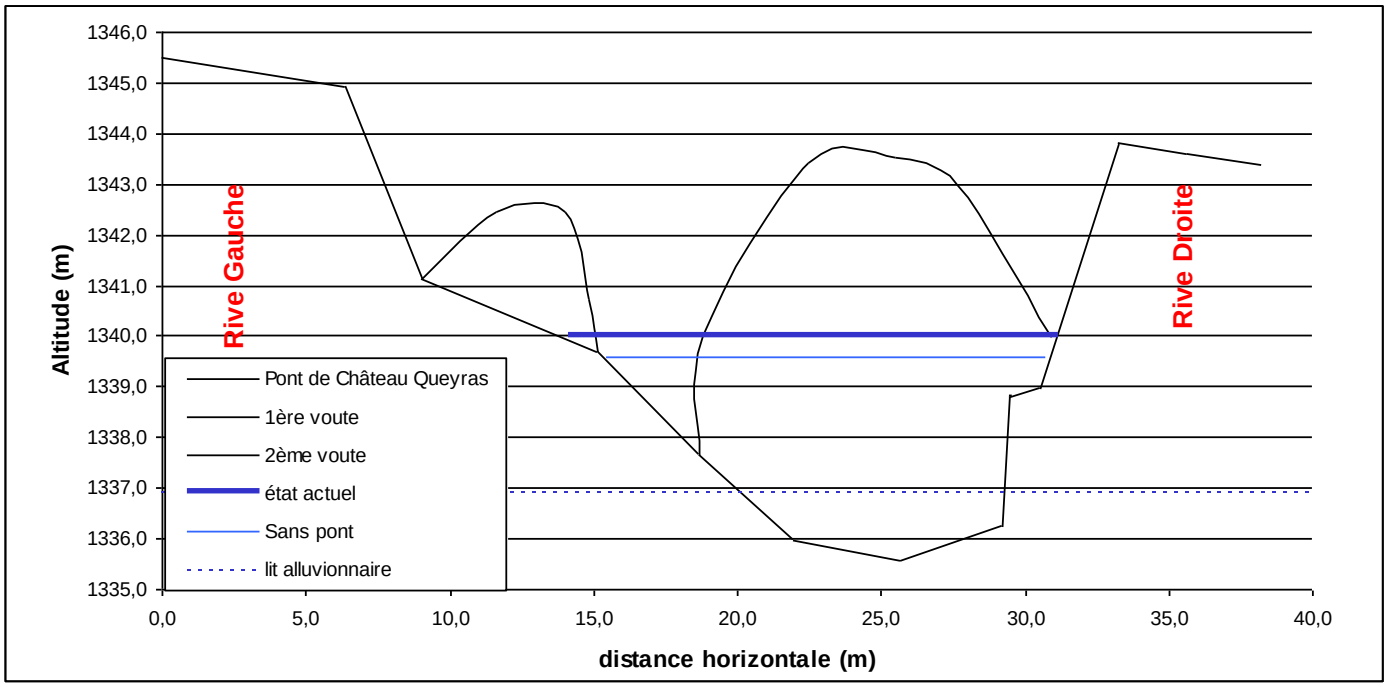


Figure 102 : Influence du pont sur les niveaux liquides (crue du type juin 2000).

Pour une crue du type juin 2000, le rétrécissement naturel (à l'entrée des gorges) est responsable d'une surélévation de la surface libre de 2,6 mètres et le pont de 40 cm supplémentaires, ce qui est beaucoup plus faible que pour une crue centennale.

La figure page suivante montre - de façon schématique - l'évolution des fonds lors d'une crue en amont d'un rétrécissement pour différents débits.

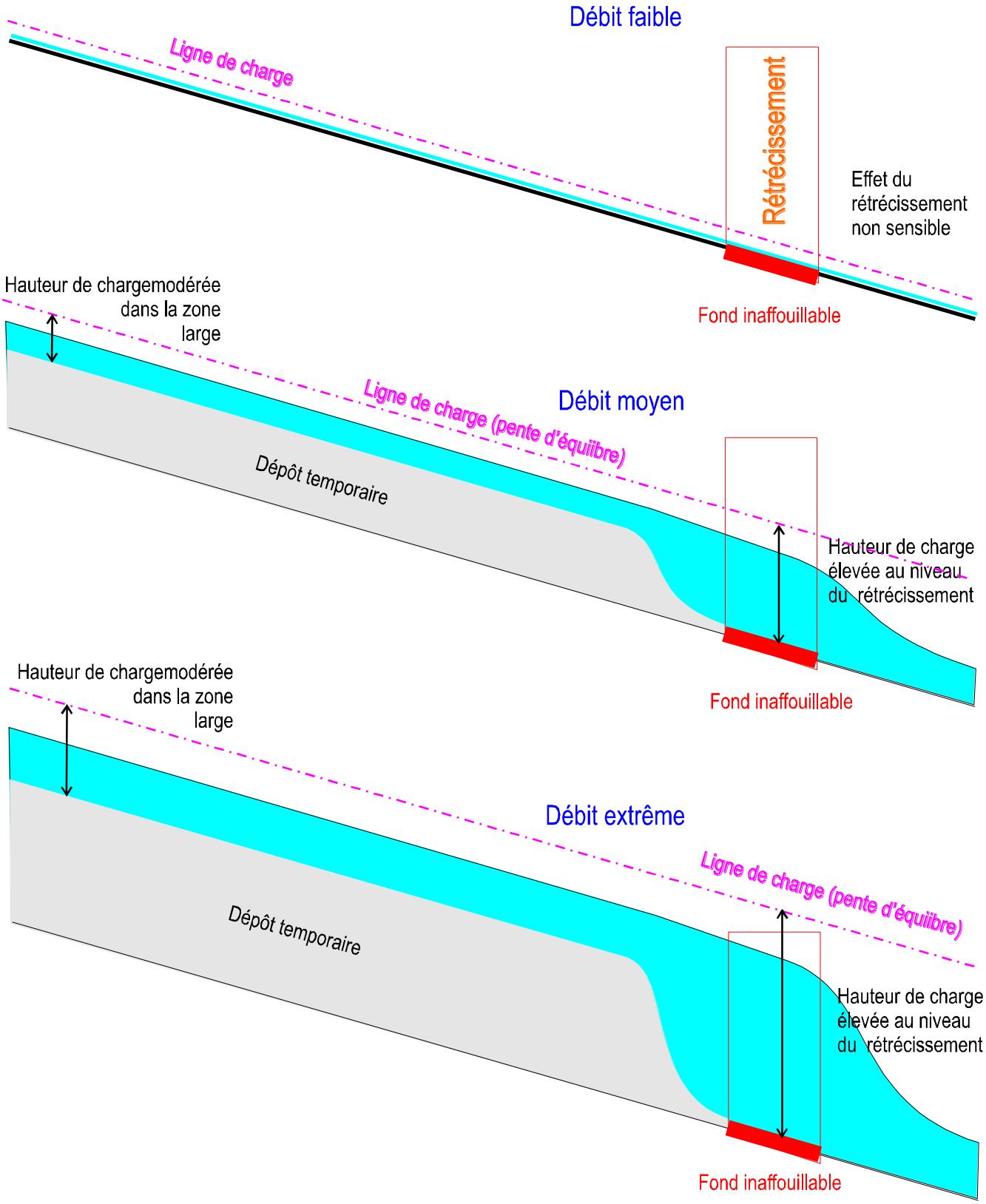


Figure 103 : Dépôt temporaire en amont d'un rétrécissement.

Cette figure montre le comportement en amont d'une contraction :

- Pour un faible débit liquide, l'effet du rétrécissement n'est pas sensible : le profil en long a tendance à s'uniformiser mais le débit risque d'être trop faible pour une reprise complète. Cependant, on observe souvent - comme ici - une augmentation de la pente en amont de la zone rétrécie, héritage du niveau du lit élevé à des débits liquides importants.
- Pour un débit intermédiaire, la hauteur d'eau - et de charge - est plus importante au droit du rétrécissement. Le fond n'étant pas affouillable, le niveau atteint par l'écoulement est élevé. Pour assurer la continuité du transport solide, la ligne de charge doit avoir la pente d'équilibre dans cette zone. En amont, dans la zone large, la hauteur de charge est plus faible : le fond doit remonter et le lit s'engrave donc dans toute la partie amont.
- Pour un débit extrême, la hauteur de charge est très importante au niveau du rétrécissement. Le dépôt en amont, dont l'épaisseur est égale à la différence des hauteurs de charge, est alors accru et devient temporairement très important. On note que le niveau de charge ainsi calculé est totalement indépendant du niveau du fond mais qu'il est imposé par la section de contrôle étroite et la pente d'équilibre. Il est nécessaire pour cela que le transport solide soit assez important pour que le lit s'adapte - par un dépôt - aux conditions d'écoulement. Cela est rapidement atteint en amont de la section de contrôle mais est de plus en plus difficile à atteindre lorsque l'on s'en éloigne. Les volumes transportés par le Guil étaient largement suffisants en 1957 pour s'approcher de l'équilibre. Durant la montée de crue, le dépôt amont entraîne une pénurie de transport solide en aval : le lit se creuse en aval de la section de contrôle s'il est alluvionnaire, ce qui n'est pas le cas ici.
- A la décrue, le niveau d'équilibre du lit est le même qu'à la crue pour un débit liquide donné. Il y a alors reprise des matériaux lors de la réduction du débit liquide. Là encore, la reprise n'est généralement que partielle et très lente. Elle a durée plusieurs décennies après la crue de 1957 et n'est pas totalement achevée malgré un rétrécissement très important du lit qui facilite la reprise.

6.4.4.3. Étude de la crue centennale

6.4.4.3.1. Méthode de calcul

Le calcul de la ligne d'eau entre Château Queyras et Ville Vieille doit tenir compte du phénomène de transport solide (dépôt de matériaux et/ou érosion).

Celui-ci sera effectué en deux étapes :

- La première permettra de déterminer la cote de la surface libre à partir d'un calcul classique de ligne d'eau. Pour chaque section considérée, nous vérifierons que la hauteur calculée correspond à un écoulement fluvial ($F_r < 1$) et dans le cas contraire, nous retiendrons la hauteur critique : ce type d'écoulement tantôt subcritique, tantôt supercritique est très difficilement calculable avec précision. De plus, dans la réalité, les écoulements supercritiques ont du mal à s'installer durablement dans un lit alluvionnaire.

- Dans un second temps, nous prendrons en compte le transport solide qui va être responsable des variations de fond : nous considérerons que le fond de la section « s'ajuste » naturellement avec la cote de la surface libre pour obtenir une pente de la ligne d'énergie constante sur toute la longueur du tronçon étudié (la valeur de cette pente assurera le transit des matériaux). Nous ferons donc varier à la fois le fond et la hauteur d'eau jusqu'à obtenir une pente de la ligne d'énergie constante et égale à 1,5 % (pente moyenne entre Ville Vieille et Château Queyras). Ce critère correspond à un lissage du fond par érosion ou dépôt de matériaux jusqu'à obtention d'une nouvelle pente d'équilibre. Il ne peut être respecté autour du pont de Château Queyras à cause de la forte perte de charge due à la singularité au niveau du pont.

6.4.4.3.2. Calcul de la ligne d'eau

Le calcul a été effectué en considérant que la petite voûte est curée. Il s'agit d'un cas plus favorable qu'actuellement car cette voûte est aujourd'hui presque complètement obstruée. Mais cette hypothèse permet de se rapprocher au mieux des conditions de 1957 pour pouvoir faire une comparaison plus pertinente. Le graphique suivant indique le résultat obtenu ainsi que les éléments suivants :

⇒ Niveau actuel des routes longeant le Guil en rive droite.

⇒ Terrain naturel derrière la digue rive droite (bas de digue),

⇒ Engravement observé en 1957.

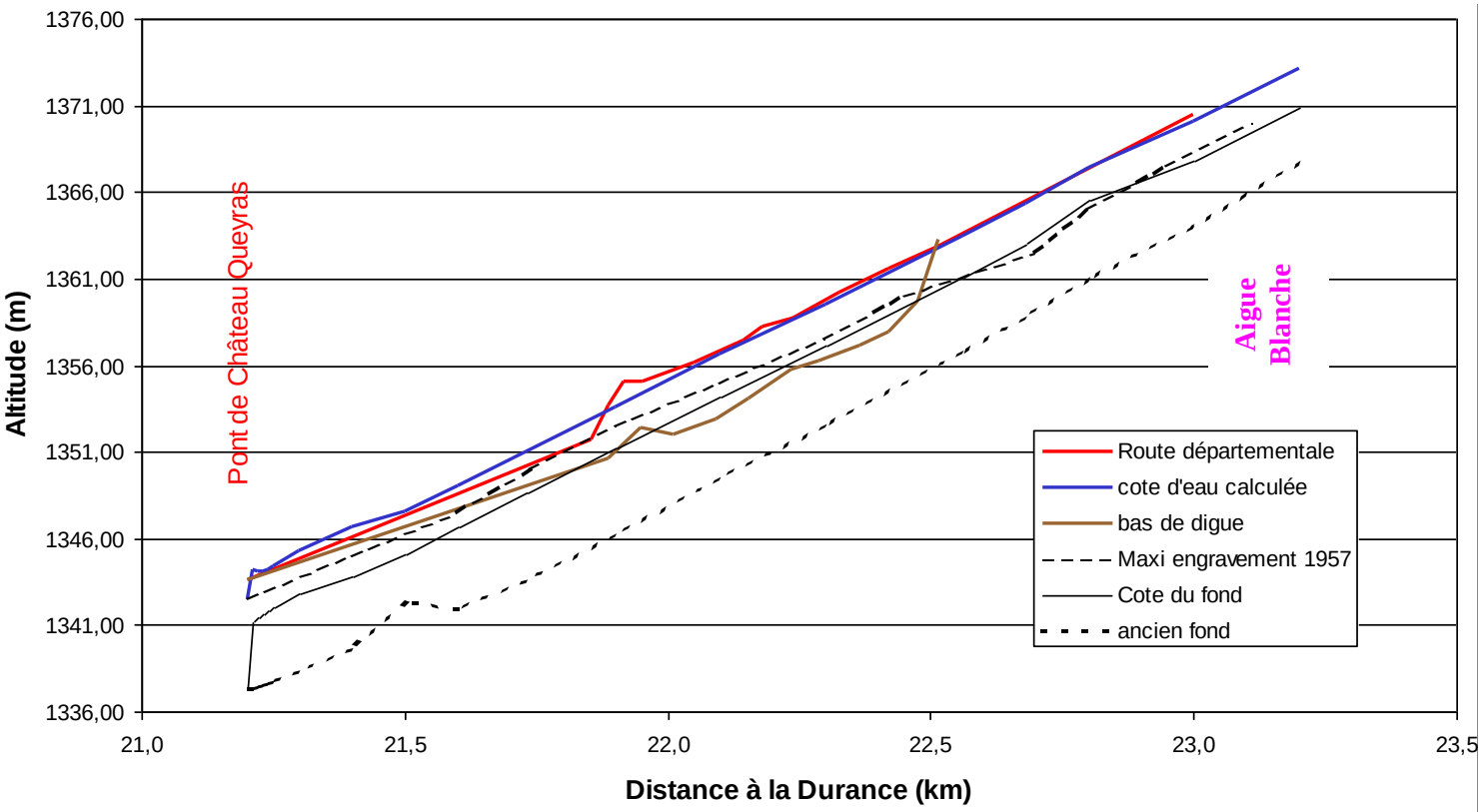


Figure 104 : Résultats du calcul de la ligne d'eau (Q=405m³/s, avec transport solide).

Ces résultats conduisent aux remarques suivantes :

- Sous réserve que la route communale, faisant actuellement office de digue, ne se fasse pas éroder pendant la crue, l'essentiel du débordement se produirait sur la route communale entre le pont et environ 700 mètres en amont, près du carrefour avec la route départementale.
- Le long de la route départementale, la hauteur d'eau arriverait quasiment au niveau du sommet de la digue. Celle-ci paraît donc tout juste dimensionnée pour une crue centennale. Ces résultats sont néanmoins à prendre avec précaution étant donnée les contraintes hydrauliques extrêmes et les risques d'érosion qui en découlent. Par contre, ce résultat valide l'analyse puisque la route, lors de sa reconstruction, a très vraisemblablement été construite au dessus de plus hautes eaux constatées en 1957.
- En aval du confluent avec le torrent de Platenq, dans la zone étroite, la route – dans l'état actuel – risque d'être fortement érodée en cas de forte crue, les protections de berge étant presque totalement disparues. En cas de rupture de cette digue/route, le débordement serait alors massif et brutal (la hauteur d'eau pourrait atteindre jusqu'à 3 mètres).
- La hauteur d'engravement varie entre 2,8 mètres et 5.2 mètres (engravement maximum à proximité du pont).
- À la confluence avec l'Aigue Blanche, l'engravement serait de l'ordre de 4 mètres… soit les observations réalisées en 1957. Ce résultat valide la démarche suivie.

Les hauteurs d'engravement relevées après la crue de juin 1957 sont très proches de celles calculées. Ce constat valide les calculs même si la topographie du site a beaucoup changé depuis 1957.

Notons que ce résultat est indépendant du niveau du fond actuel, les volumes de matériaux apportés étant suffisants pour compenser des évolutions du niveau du fond d'un lit étroit.

6.4.4.3.3. Dépôt de matériaux

Le calcul du volume dépôt est réalisé de trois façons différentes afin de dégager un ordre de grandeur, un calcul précis étant hors de portée notamment à cause de l'absence de levé topographique avant la crue de 1957.

Volume de dépôt par rapport à la simulation

A partir des profils en travers utilisés, de la cote du fond d'avant crue et d'après crue (obtenus par le calcul effectué), nous pouvons en déduire une estimation du volume de matériaux déposés lors d'une crue centennale. Celui-ci est estimé à environ 345 000 m^3. Il ne tient par compte des dépôts sur le cône de déjection du cône de déjection de l'Aigue Blanche. En effet, le pont de Château Queyras est un phénomène aggravant mais il n'explique qu'une partie des dépôts, le reste étant lié aux apports énormes de l'Aigue Blanche.

Bilan basé sur la superficie engravée

La photographie aérienne du secteur étudié prise en juin 57 permet de déterminer que la surface du lit concerné par le dépôt de matériaux atteint environ 430 000 m^2 entre le pont de Château Queyras et l'amont de la confluence avec l'Aigue Blanche.

La hauteur d'engravement est déterminée à partir des relevés des profils en long de 1907 et d'après crue de 1957. Nous avons considéré qu'il n'y a pas eu de modification importante du lit avant la

crue de 1957. L'analyse des deux profils en long nous conduit à retenir une hauteur d'engravement comprise entre 2 et 5 mètres, avec une hauteur moyenne d'environ 2,7 mètres.

L'estimation du volume déposé en 57 est plus délicate que précédemment, car nous ne disposons pas de profil en travers correspondant à cette époque.

L'hypothèse d'un lit mineur d'une largeur moyenne de 30 mètres (ce qui est le cas actuellement), sur une longueur de 2,5 km, en considérant le lit mineur 1,7 mètres en contrebas du lit majeur conduit aux résultats suivants :

	Lit mineur	Lit majeur	Total
Surface	75 000 m^2	355 000 m^2	**430 000 m^2**
Hauteur d'engravement	2,7 m	1 m	
Volume déposé	200 000 m^3	350 000 m^3	**550 000 m^3**

Bilan des capacités de transport

Les calculs précédents ne sont valables que si les apports amont sont suffisants. Dans le cas contraire, les niveaux d'engravement et donc les niveaux d'eau sont un peu inférieurs et l'équilibre n'est pas atteint pour la pointe de crue, contrairement aux hypothèses retenues pour le calcul.

Les calculs des apports solides ont été réalisés précédemment et conduisent aux résultats suivant :

Lieu	volume solide centennal (millier de m^3/s)
Apports amont (Guil + Aigue Blanche)	870
Capacité de transport aval (Guil à Château Queyras)	310
Dépôt durant la crue	560

C'est donc un dépôt considérable qu'il faudrait prendre en compte dans une telle zone. Ce résultat est plutôt réalisé par excès car le dépavage de l'Aigue Blanche ne concerne vraisemblablement pas toute la crue. Les apports auraient alors été plus faibles durant certaines périodes de la crue.

Synthèse

Les estimations du volume de matériaux déposés par les 3 méthodes sont bien du même ordre de grandeur. Ces résultats doivent cependant être utilisés avec précaution étant donnée la complexité des phénomènes dans cette zone. Il apparaît cependant que le dépôt de matériaux est énorme. Si l'on considère un dépôt uniforme sur le linéaire de 2.5 km qui séparent Ville Vieille de Château Queyras et un lit de 50 mètres de largeur, la hauteur de dépôt doit être de 4.5 mètres environ !

6.4.4.4. Étude de la crue de type juin 2000

6.4.4.4.1. Calcul de la ligne d'eau

Les résultats du calcul de la ligne d'eau et de la hauteur d'engravement en amont du pont de Château Queyras sont représentés sur le même graphique ci-dessous.

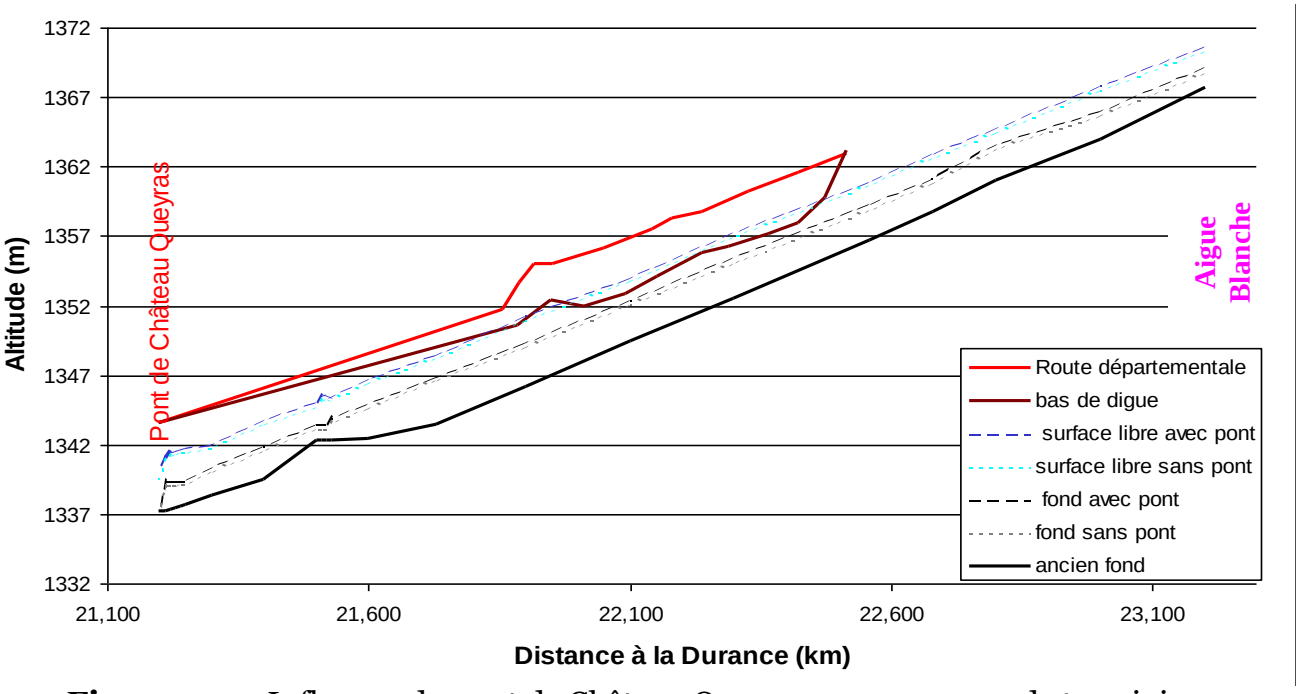


Figure 105 : Influence du pont de Château Queyras pour une crue de type juin 2000.

Ce graphique conduit aux remarques suivantes :

⇒ L'effet du pont pour cette crue moyenne est très faible (une trentaine de centimètres environ).

⇒ la hauteur d'engravement sur le seuil est de l'ordre de 80 centimètres, ce qui est l'ordre de grandeur constaté après la crue de juin 2000.

⇒ Ce calcul de ligne d'eau fait apparaître un engravement d'environ 2 mètres sur tout le linéaire, ce qui semble peu réaliste au vu des observations faites pendant la crue. En effet, dans le calcul avec transport solide, nous supposons un régime permanent établi : le calcul réalisé correspondrait à l'état du lit au bout d'un temps infini sous un débit de 205 m^3/s. Dans la réalité, la durée de crue correspondant au débit de pointe a été relativement faible, et un équilibre n'a pas pu se mettre en place. Par contre, un dépôt s'est bien formé en amont immédiat du pont. Mais le rétrécissement en aval du confluent avec le torrent de Platenq a favorisé le transport solide et conduit plutôt à des affouillements. Ce phénomène n'a pu être pris en compte par le calcul.

⇒ La route-digue est calée suffisamment haut pour éviter tout débordement. Si la digue venait à être érodée au cours de la crue, les terrains placés en retrait risqueraient de se voir inondés et sinistrés. Mais le débordement serait alors beaucoup moins brutal que pour une crue centennale.

Suivant la méthode exposée dans le cas de la crue centennale, nous pouvons avoir un ordre de grandeur du volume de matériaux déposés. Celui-ci est estimé à 195 000 m^3. Ces volumes semblent excessifs au vu des profils en long levés après la crue de 2000 ; nous pouvons expliquer cette

différence par le fait que l'Aigue Blanche a apporté peu de matériaux par rapport à sa capacité de transport.

6.4.4.4.2. Bilan du volume de matériaux transité

Nous rappelons les caractéristiques nécessaires au calcul de matériaux apportés lors de la crue décennale.

	Guil à Ville Vieille	Aigue Blanche à Ville Vieille	Guil à Château Queyras
Superficie du BV (km^2)	209	98	317
$P_{(5\ jours)}$ (mm)	122	200	122
Débit de pointe (m^3/s)	155	95	205
d_{90}/d_{30}	10	8	10
dm (cm)	6	6	6
Pente	1.4%	5.6 %	1.5%
Volume liquide (hm^3)	7.6	5.9	11.6
Volume solide (m^3)	35 000	265 000	60 000

Par différence, le volume déposé dans la plaine de Château Queyras atteint environ 240 000 m^3.

Ce chiffre est bien du même ordre de grandeur que celui estimé dans la partie précédente, mais les apports réels de l'Aigue Blanche ont vraisemblablement été très inférieurs aux valeurs retenues ici, le pavage dans les gorges ayant résisté à cette crue moyenne. Le volume réellement déposé est donc beaucoup plus faible.

L'approche développée ici parait peu pertinente dans ce cas car les apports solides amont sont trop faibles pour permettre d'atteindre un profil en long d'équilibre.

6.4.5. Synthèse sur l'état actuel

Le secteur de Château Queyras a connu des évolutions considérables de niveaux lors de la crue de 1957. Cette dernière a été remarquable par les apports extrêmes de l'Aigue Blanche. Ces apports sont vraisemblablement encore plus exceptionnels que les débits observés lors de cette crue, comme la situation en 1948 le montre.

Dans l'état actuel, des dégâts très importants se produiraient pour une crue aussi rare (dont la période de retour excède nettement le siècle) :

- Engravement majeur dans la zone de confluence.
- Destruction de la route digue dans le secteur étroit et débordement.
- Débordement puis dépôts massifs en amont du pont de Château Queyras.

Heureusement, ces phénomènes de grande ampleur sont lents, ce qui permet l'évacuation des personnes.

6.5. Confluence Chagne / Chagnon à Vars

6.5.1. Objectifs

Le village de Ste Marie, à Vars, est construit sur le cône de déjection du torrent du Chagnon, qui conflue en amont du village avec le Chagne. Les apports solides du Chagnon sont considérables et conduisent à des débordements et des engravements massifs lors des fortes crues, comme en 1856 et 1957.

De plus, le glissement de terrain du Ruinas, sur la rive du Chagne opposée au village, présente un volume de 3.5 millions de m^3. Sa vitesse est de l'ordre de 10 à 20 centimètres par an. Il réduit la largeur du lit Chagne, la rive gauche avançant alors que la rive droite reste fixe.

Le lit du Chagnon est le siège d'une érosion particulièrement active. L'État a réalisé un ensemble imposant de barrages qui réduisent l'érosion, même si elle reste encore importante. Le RTM poursuit le développement de la protection actuelle et l'entretient rigoureusement.

Le village étant très exposé, la commune a réalisé une étude de l'ensemble de cette zone :

Commune de Vars - Étude hydraulique de la confluence du Chagne et du Chagnon à Sainte Marie - ETRM - Octobre 2006

Les résultats de cette étude restent d'actualité et sont repris en partie ci-dessous. Cette étude prend en compte différents scénarios de crue en incluant un calcul de ligne d'eau.

Cette étude a été suivie d'un dimensionnement sur modèle réduit d'un ouvrage plage de dépôt dont les études sont en cours.

6.5.2. Hypothèses

6.5.2.1. Hydrologie

L'étude hydrologique conduit aux résultats suivants :

	Superficie bassin versant (km²)	Débit décennal (m³/s)	Débit centennal (m³/s)
Chagne	23.3	23	75
Chagnon	14.8	17	55

6.5.2.2. Apports solides

Les volumes transportés pour une crue centennale sont les suivants :

- 15 000 m^3 sur le Chagne amont, la pente étant seulement de 1.9 %.
- 130 000 m^3 sur le Chagnon avec une pente d'équilibre de 10 % seulement afin prendre en compte l'effet des ouvrages RTM dans le bassin versant (sinon, un volume de 150 000 m^3 devrait être retenu).
- 140 000 m^3 dans le cours aval du Chagne, la pente étant de 5.6 %.

6.5.2.3. Zone modélisée

La zone modélisée correspond à l'ensemble du cône de déjection du Chagnon et au Chagne en amont et surtout en aval de la confluence :

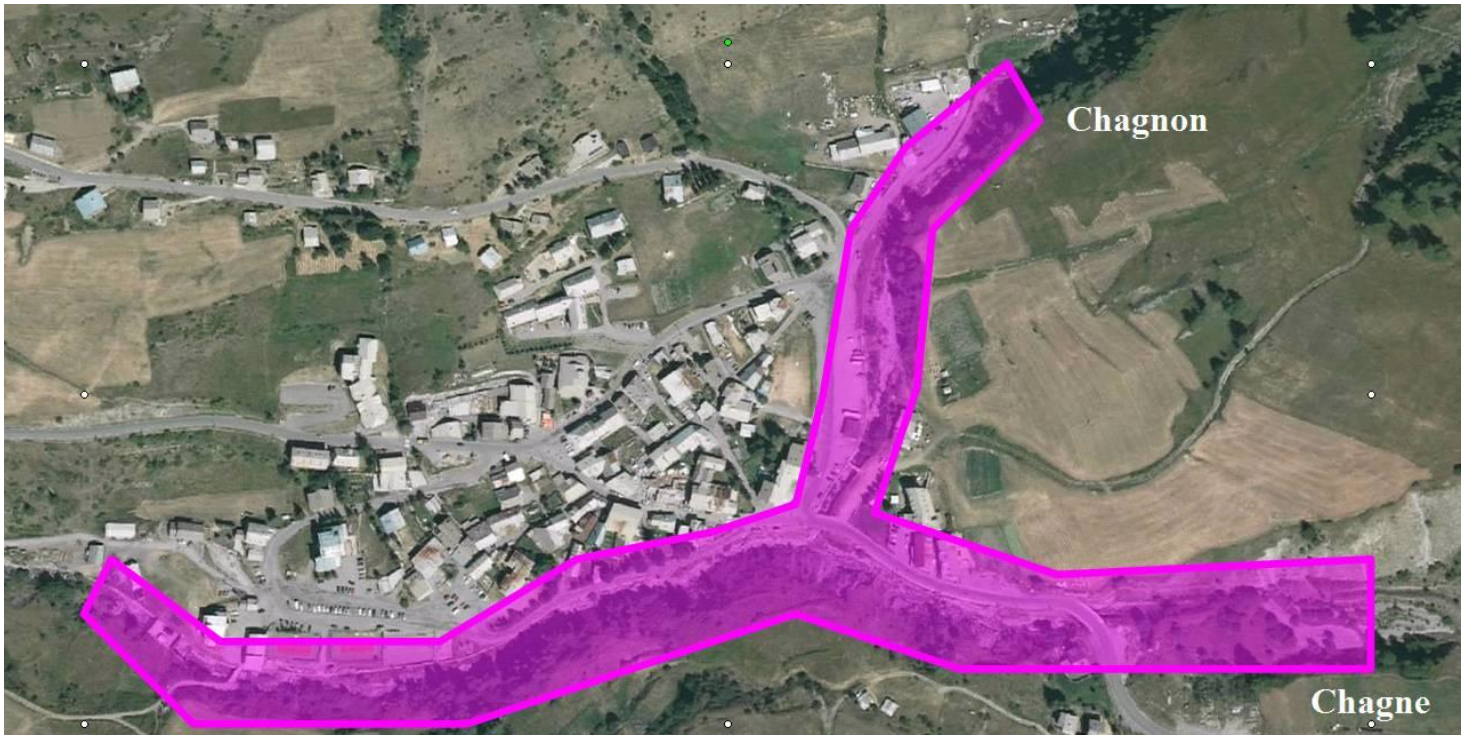


Figure 106 : Zone modélisée à la confluence avec Chagne / Chagnon.

6.5.3. Résultats obtenus

6.5.3.1. Crue centennale généralisée

On considère ici que chacun des deux affluents subit une crue centennale. Le décalage des pointes de crue permet de ne pas dépasser un débit centennal en aval, la crue du Chagne est retardée, ce qui n'est pas irréaliste, ce bassin versant étant un peu plus grand.

La figure suivant indique les hydrogrammes correspondants avec le débit solide associé. Elle montre aussi le débit liquide résultant en aval :

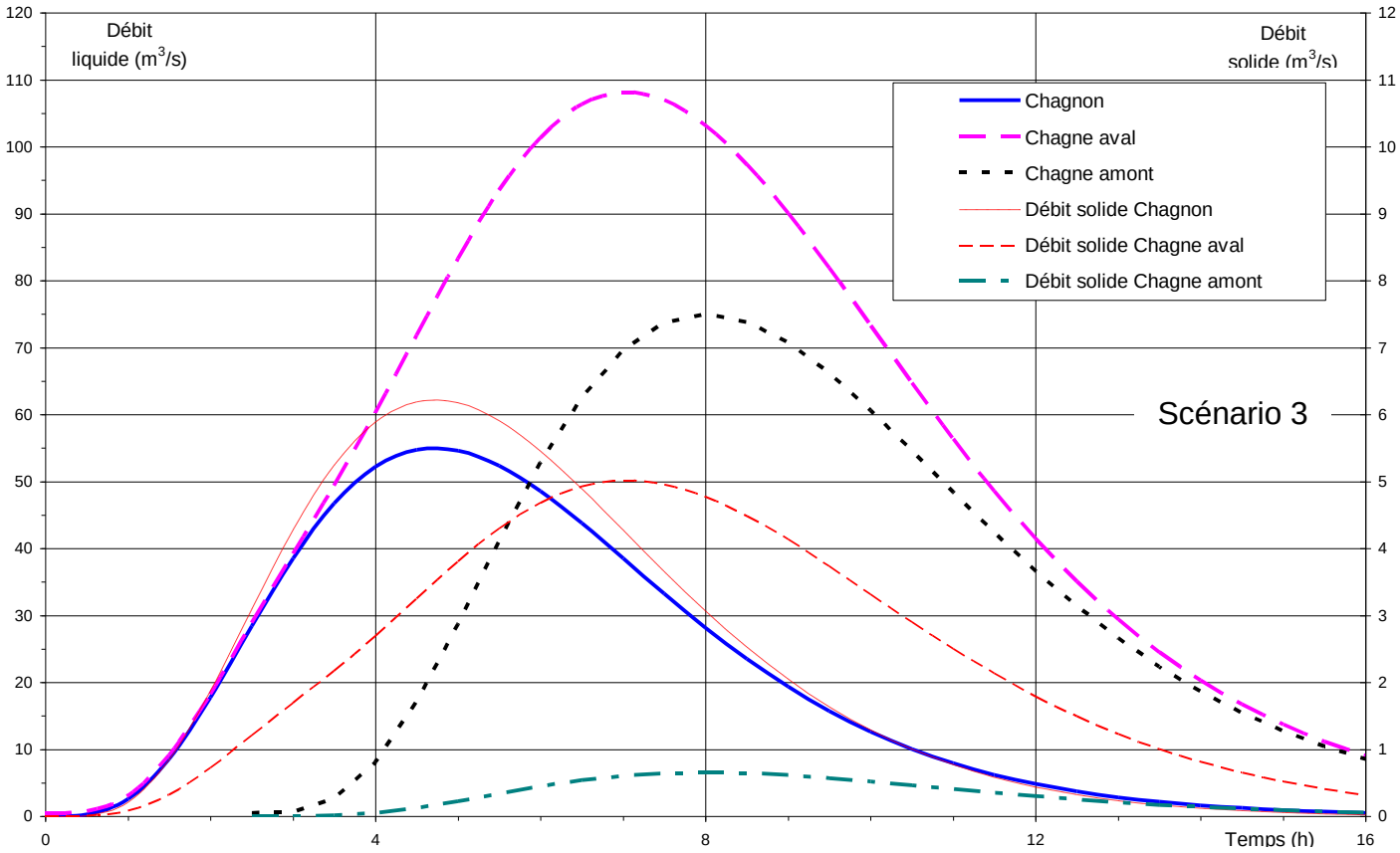


Figure 107 : Hydrogrammes d'une crue généralisée du Chagne et du Chagnon.

Le débit liquide aval maximum est de l'ordre de 110 m^3/s, soit le débit centennal du Chagne en aval de Ste Marie, ce qui est sensiblement moins que la somme des débits de pointe de chacun des affluents (130 m^3/s).

Les profils en long obtenus à différentes étapes de la crue sont les suivantes :

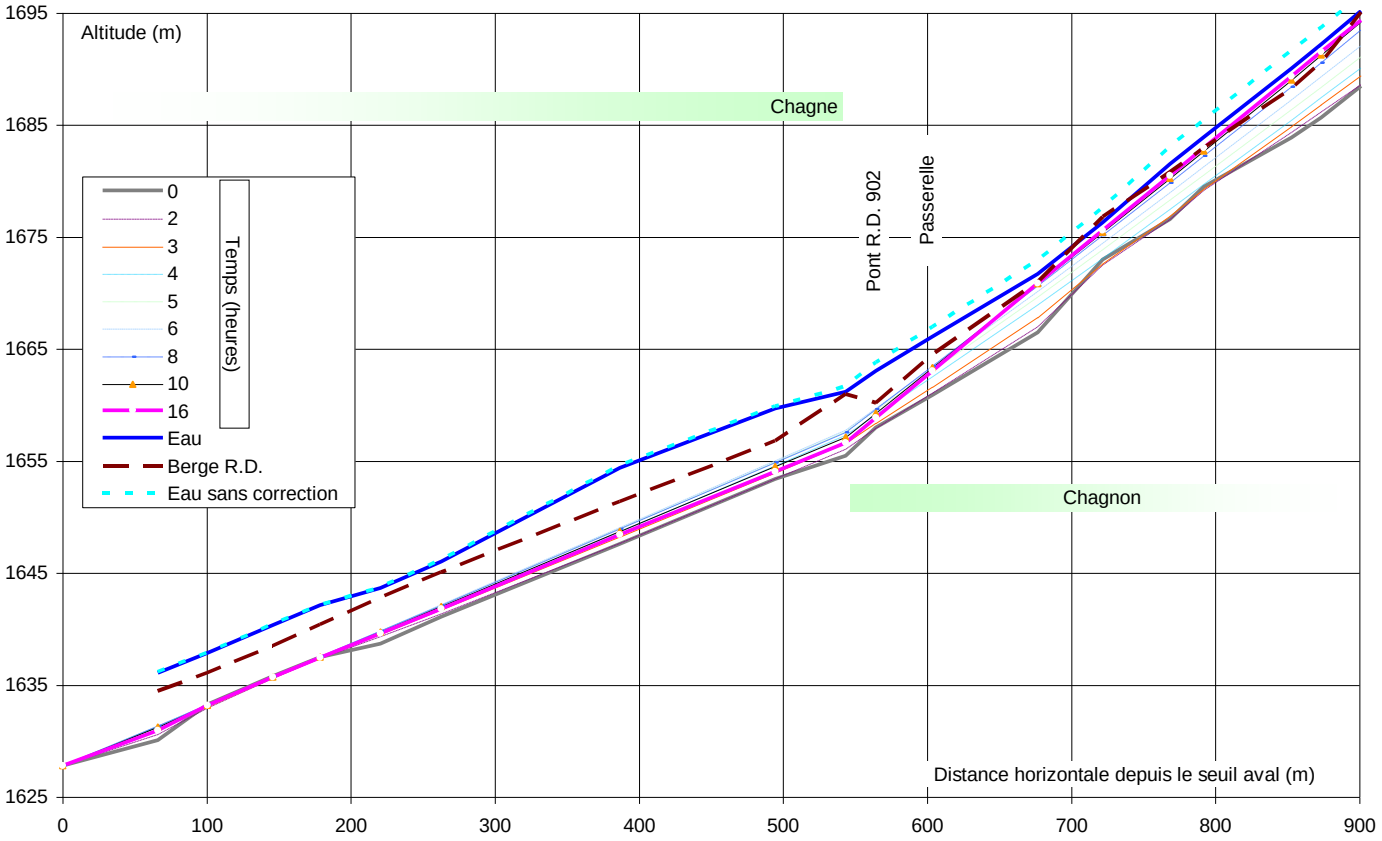


Figure 108 : Niveau atteint pour une crue centennale généralisée.

Ce graphique indique de plus le niveau d'eau maximum calculé en faisant abstraction des corrections RTM dans le bassin versant du Chagnon. L'amélioration liée à ces ouvrages atteint 1.5 mètres au sommet du cône de déjection… sans éviter le débordement.

Pour une crue centennale généralisée, les évolutions sont les suivantes :

- Le Chagne aval trouve durant presque toute la crue une pente d'équilibre proche de 5.3 %. Comme il s'agit de la pente moyenne du torrent dans cette zone, les engravements sont limités et causés, pour l'essentiel, par les seuils aval. Par contre, les débits liquides étant très élevés et le lit particulièrement étroit, les hauteurs d'eau sont considérables (plus de 3 mètres), conduisant à un franc débordement en aval de la confluence.
- Sur le Chagnon, la tendance au dépôt est rapide dès le début de la crue et conduit au débordement. Ensuite les niveaux se stabilisent avec une reprise lors de la décrue, très marquée en aval mais insignifiante en amont. En amont du cône de déjection, le lit est totalement rempli quatre heures après le début de la crue. Le débordement se dirigerait alors vers le centre ville.
- A la confluence, une surélévation sensible est visible durant la montée de crue, mais la reprise est ensuite très significative.

6.5.3.2. Crue centennale du Chagnon et décennale du Chagne

Ce cas diffère par une capacité de reprise en aval de la confluence nettement réduite par la forte diminution des apports liquides du Chagne amont. Les apports du Chagnon sont donc plus difficilement repris. L'apport solide amont total est près du double de la capacité de transport en aval. Près de la moitié des matériaux apportés va donc se déposer dans la zone d'étude.

La figure suivante montre l'évolution du lit dans ce cas :

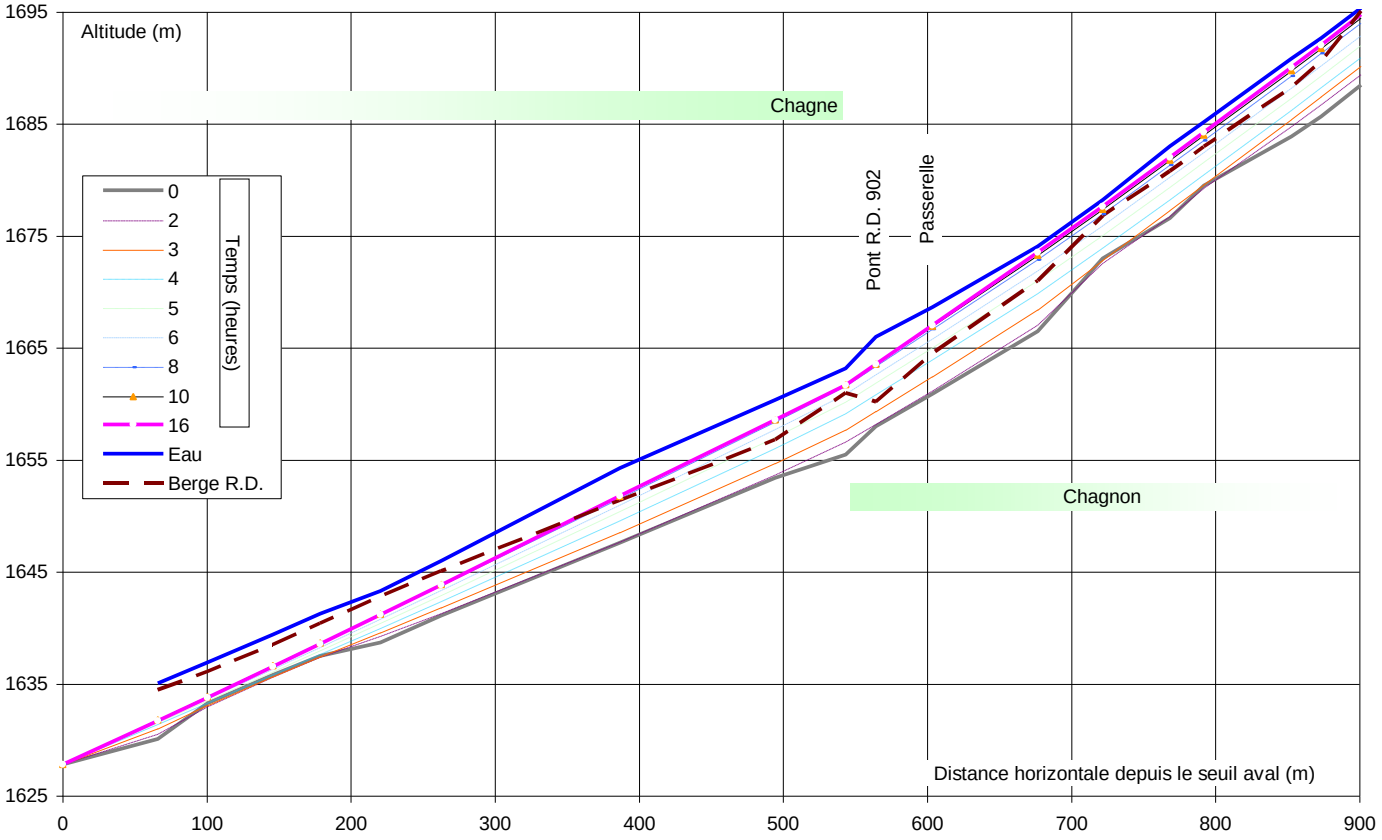


Figure 109 : Crue décennale du Chagne et crue centennale du Chagnon.

Évidemment, la tendance au dépôt est considérable. Les évolutions sont les suivantes :

- Le dépôt rempli totalement le lit sur tout le linéaire, à l'exception des 300 mètres en amont du seuil le plus en aval. Sur le Chagne, la hauteur de dépôt diminue régulièrement de l'amont vers l'aval. La pente est alors de 6.2 % dans la partie aval.
- Sur le Chagnon, le niveau du fond calculé dépasse de plusieurs mètres le sommet de la digue. Ce résultat est pessimiste car, dans la réalité, les matériaux s'étaleraient en dehors du lit, ce que le modèle numérique ne prend pas en compte. Il apparaît cependant, que le lit actuel serait "oublié" par l'écoulement qui divaguerait largement sur le cône de déjection et dans la zone urbaine.

6.5.3.3. Crue décennale du Chagnon et centennale du Chagne

L'apport solide total est important mais bien inférieur aux deux autres scénarios. Le débit liquide aval maximum est de l'ordre de 92 m^3/s, nettement inférieur au débit centennal sur le Chagne aval.

La figure suivante montre les niveaux d'engravement obtenus :

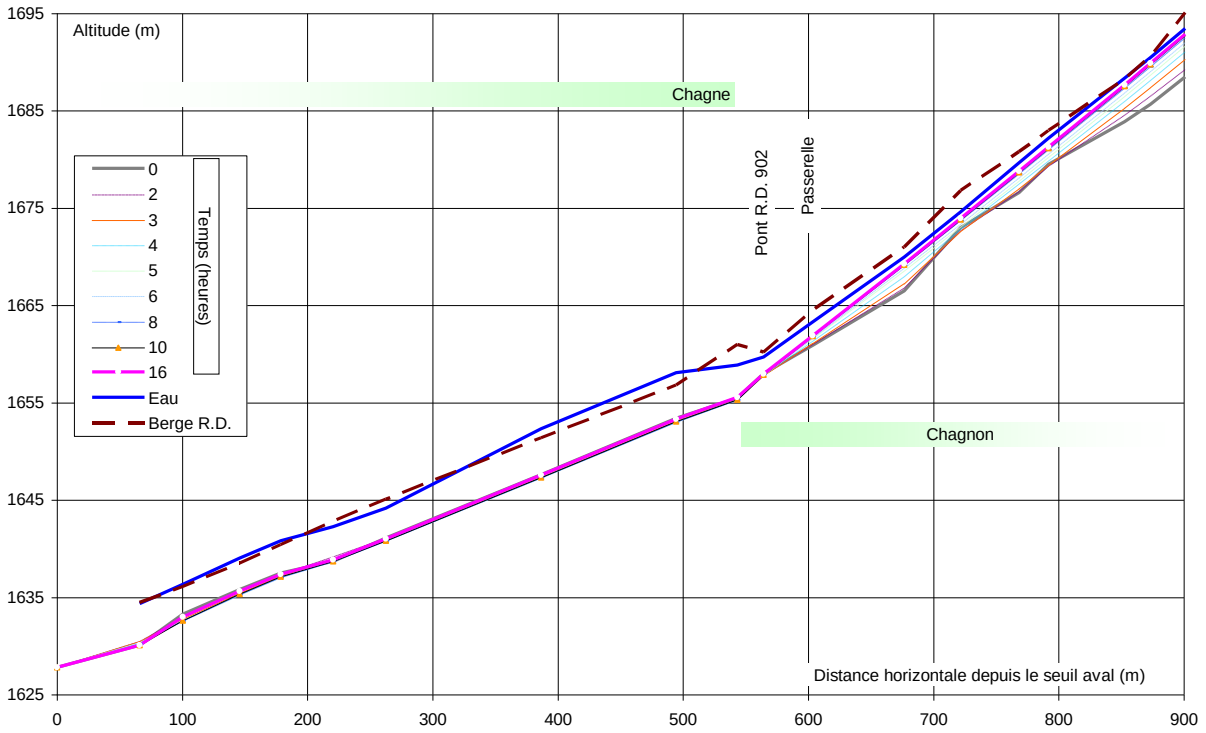


Figure 110 : Crue décennale du Chagnon et centennale du Chagne.

Ce graphique conduit aux remarques suivantes :

- Les débits liquides beaucoup plus élevés dans le Chagne - avec des apports solides très modérés - que dans le Chagnon expliquent une capacité de transport en aval du confluent très importante. Cette forte capacité de reprise permet d'éviter le dépôt.
- Des débordements sont observés sur le Chagne en aval de la confluence. En effet, le lit est particulièrement étroit dans cette zone à cause du glissement de terrain du Ruinas. La revanche n'est pas significative en aval, jusque dans la zone du télésiège. Il est probable dans ce secteur qu'un second bras se crée dans le lit majeur.
- Dans le Chagnon aval, les niveaux restent très bas durant toute la crue, ce qui montre que le Chagne parvient à reprendre les apports.
- Par contre, les niveaux élevés du lit du Chagnon en amont de la passerelle entraînent, plus en amont, un dépôt qui fini par prendre des proportions importantes et remplir, à l'amont, la quasi-totalité du lit. Il y a alors un risque de débordement au droit des bâtiments communaux, au sommet du cône de déjection. Ce débordement menacerait l'ensemble du cône de déjection.
- Le pont sur le Chagnon parait suffisant pour cette crue si l'on fait abstraction des risques d'obstruction par les flottants.

6.5.4. Synthèse

Les simulations numériques réalisées avec ces différents scénarios conduisent aux résultats suivants :

- Le lit présente une section réduite sur l'ensemble du linéaire, et particulièrement sur le Chagne en aval de la confluence à cause de l'avancée du glissement du Ruinas. Même en l'absence d'engravement, le débordement serait observé, pour le débit centennal, sur la partie basse du cône de déjection du Chagnon et sur le Chagne en aval du confluent.
- Les dépôts sont causés par les apports du Chagnon. En effet, plus les apports du Chagne sont importants et moins les dépôts sont marqués. Le débordement serait massif en dehors du lit en aval du confluent.
- Les calculs ne prennent pas en compte les risques d'obstruction par les flottants. Or, les franchissements dans la zone du télésiège, et plus encore le pont de la R.D. 902 sur le Chagnon, risquent de favoriser l'obstruction par les flottants. Le débordement pourrait alors concerner tout le débit et un dépôt (avec débordement associé) se propagerait en amont de l'embâcle.

Ainsi, une nouvelle crue centennale conduirait à des dégâts comparables à ceux des crues de 1856 ou 1957, avec un écoulement dans le centre du village et des engravements importants, comme le montre la photo suivante :

Figure 111 : Lit engravé du Chagnon en amont de Ste Marie en Juin 1957.

6.6. Modélisation de la confluence Guil - Chagne

6.6.1. Objectifs

Il s'agit ici de mettre en évidence le fonctionnement de la confluence du Guil avec le Chagne. Cette modélisation s'inscrit dans un contexte de forte incertitude sur les apports solides de cet affluent. L'objectif principal de la modélisation est de mettre en évidence l'ampleur des engravements à la confluence et dans la partie aval du Chagne :

- Dans le chenal du Guil - très régulier et étroit - en aval de la confluence jusqu'à proximité de la station d'épuration.
- Dans le lit plus naturel et irrégulier du Guil en amont de la confluence. Les enjeux y sont particulièrement réduits.
- Dans le cours aval du Chagne. Celui-ci est limité en amont par le seuil situé sous le pont de la RD 902. L'analyse des apports solides montre que le risque de dépôt en amont est faible et - dans l'état actuel - totalement déconnecté des dépôts dans le lit aval.

Il s'agit pour l'essentiel d'un bilan de volume de matériaux. Ainsi, la simulation est réalisée avec des débits élevés et constants durant une longue période afin de simuler l'engravement observé.

Cette simulation est avant tout destinée à réaliser des tests de sensibilité sur les paramètres plutôt que de déterminer des niveaux précis atteints durant une crue.

6.6.2. Hypothèses

6.6.2.1. Hydrologie

Le tableau suivant indique les débits de pointe (en m^3/s) et les volumes liquides (en million m^3) :

	Superficie (km^2)	Débit décennal	Débit centennal	Volume décennal	Volume centennal
Guil	580	200	600	30.5	97
Chagne	120	82	221	4.8	18

6.6.2.2. Apports solides

Le tableau suivant indique la pente d'équilibre, les caractéristiques granulométriques et le volume des apports solides :

	Pente (%)	Diamètre moyen (cm)	d_{90}/d_{30}	Volume décennal (m^3)	Volume centennal (m^3)
Guil	1	6	10	50 000	230 000
Chagne	2.5	10	10	52 000	170 000

La pente d'équilibre du Chagne constitue une inconnue majeure qui devra faire l'objet d'un test de sensibilité. La modélisation inclut un tri granulométrique sur le Guil amont comme sur le Chagne.

La simulation est réalisée en considérant un débit constant durant 120 heures. Cela correspond - pour respecter le volume des apports solides - aux débits liquides suivants (en m^3/s) :

	Superficie (km^2)	Débit simulation décennale	Débit simulation centennale
Guil	580	79	236
Chagne	120	19	53

6.6.2.3. Zone modélisée

La zone modélisée correspond à la partie terminale du Chagne (en aval du seuil de grande hauteur du pont de la RD 902) et au Guil de part et d'autre de la confluence :

Figure 112 : Zone modélisée à la confluence avec le Chagne.

6.6.3. Résultats obtenus

6.6.3.1. Crue centennale généralisée

Il s'agit ici de mettre en évidence l'évolution des fonds dans le cas - défavorable - d'une crue centennale sur les deux cours d'eau. Le calcul est réalisé ici avec une pente d'équilibre du Chagne de seulement 2.5 %. La figure suivante montre l'évolution des profils en long en fonction du temps (ou du volume de matériaux apporté durant la crue) dans l'ensemble de la zone modélisée :

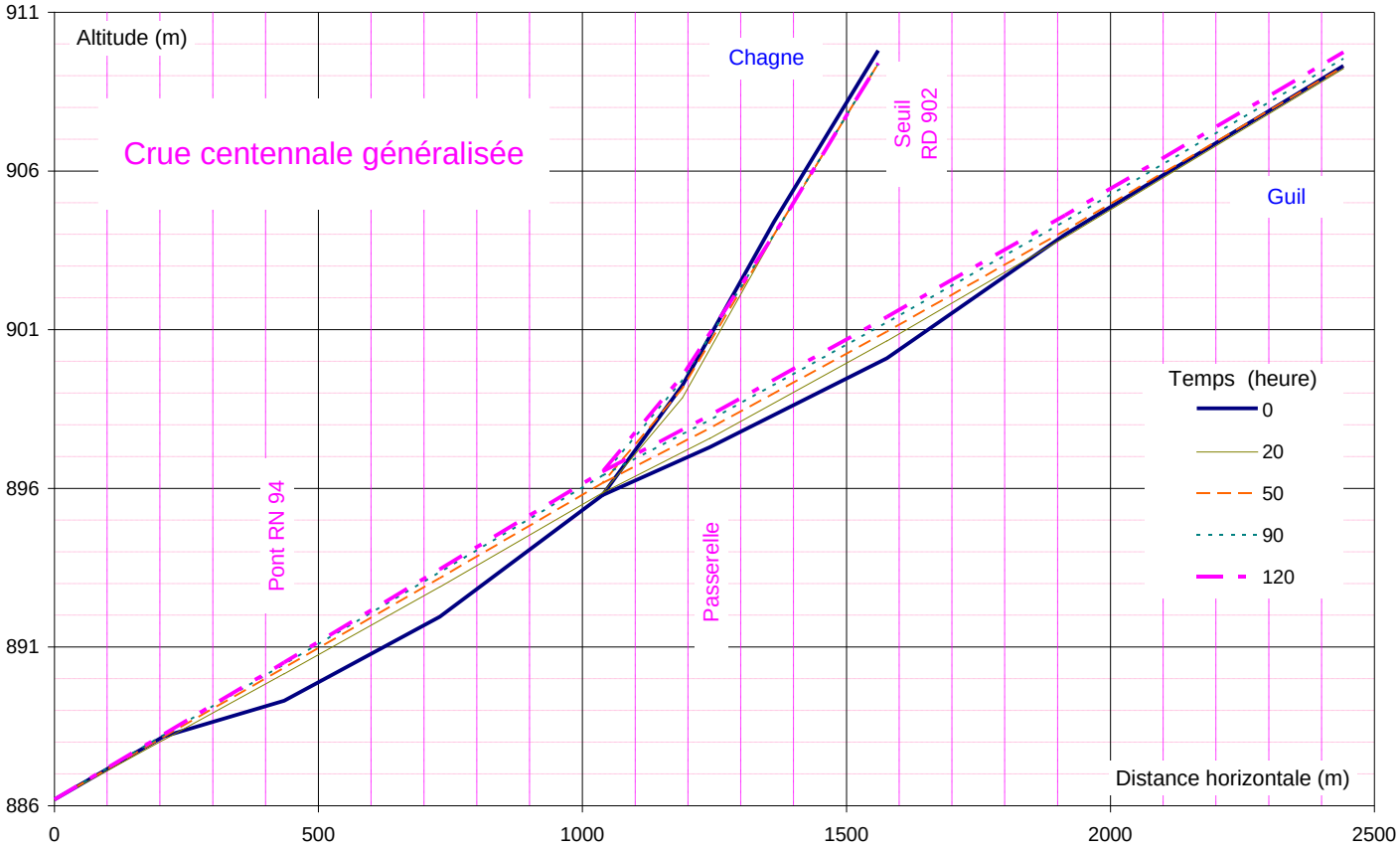


Figure 113 : Crue centennale généralisée au confluent du Chagne.

Ce graphique montre que l'ensemble de la zone connaît un engravement important :

- Sur le Guil amont, l'épaisseur des dépôts parait relativement modérée, le lit étant large dans cette zone. Ce comportement semble assez proche de celui observé en 1957.
- Entre la confluence et le pont de la RN 94, la dépression actuelle est rapidement comblée puis l'engravement se poursuit. Ce calcul est réalisé en considérant qu'il n'y a pas d'engravement dans la zone de la station d'épuration. Le mode de calcul mis en œuvre ici sous-estime l'effet de l'endiguement qui réduirait la tendance au dépôt. L'étude SOGREAH de 2007 analyse en détail cet aspect.
- Le dépôt à la confluence est inférieur au mètre. Il se propage peu dans le lit du Chagne, le pavage étant sensible sur l'ensemble du linéaire.

Il s'agit d'engravement moyen sur l'ensemble de la crue. Dans les faits, les hydrogrammes n'étant pas concomitants, ces engravements peuvent connaître une dynamique différente.

6.6.3.2. Crue centennale du Chagne et décennale du Guil

Ce cas diffère par une capacité de reprise en aval de la confluence nettement réduite par la forte diminution des apports liquides du Guil. Les apports du Chagne sont donc plus difficilement repris, même si le volume global des apports est plus faible.

La figure suivante montre l'évolution du lit dans ce cas :

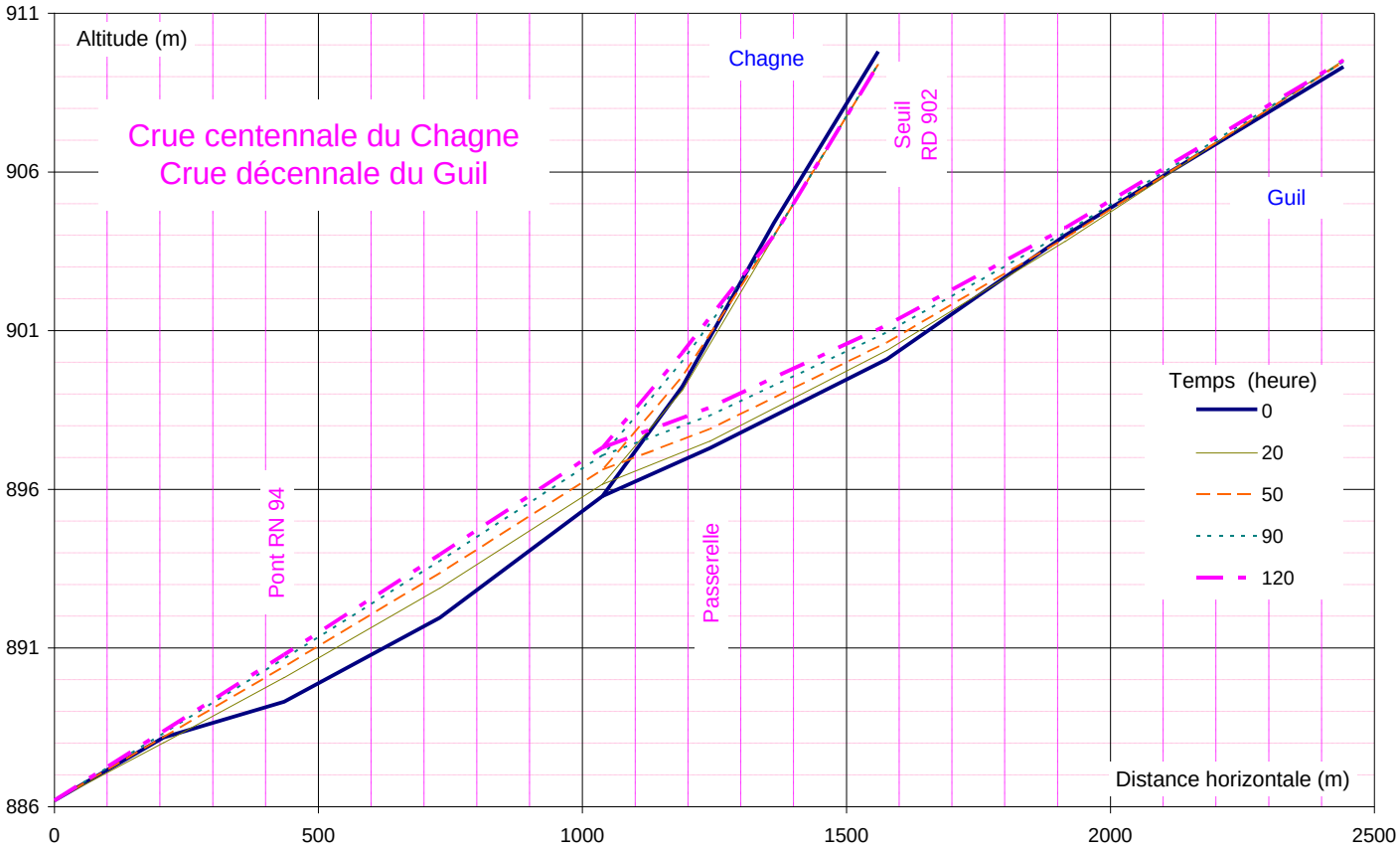


Figure 114 : Crue décennale du Guil et crue centennale du Chagne.

La capacité de reprise et de transport du Guil est plus réduite, ce qui conduit aux évolutions suivantes :

- Le dépôt à la confluence est près du double de celui du scénario précédent.
- En amont, le transport solide du Guil est faible et ce dépôt majoré se propage peu en amont, les dépôts étant négligeables dans la partie amont de la plaine du Simoust.
- En aval, les dépôts restent importants - toujours avec un comblement rapide de la dépression, mais le lissage des pentes est incomplet. La minoration de l'engravement par la contraction du lit est moins nette ici car les débits liquides sont nettement réduits.
- Le Chagne ne montre pas d'évolution importante par rapport à la crue centennale généralisée, avec un dépôt plus important à la confluence mais qui remonte peu. Le pavage limite les évolutions du lit dans la partie amont.

6.6.3.3. Crue décennale du Chagne et centennale du Guil

Les apports -surtout solides - du Chagne sont ici nettement réduits. La figure suivante montre l'évolution du lit dans ce cas :

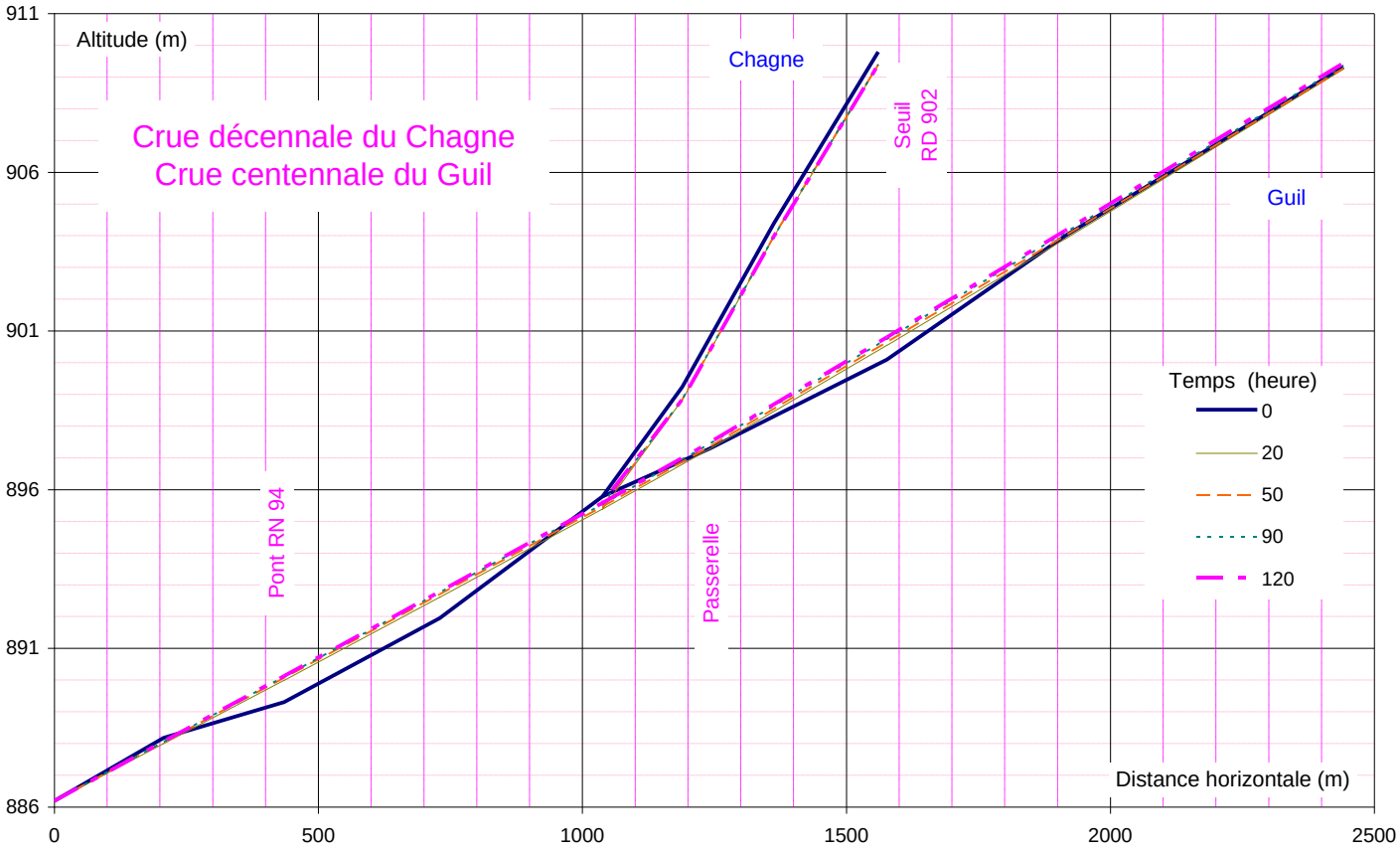


Figure 115 : Crue centennale du Guil et crue décennale du Chagne.

Les évolutions sont ici aussi réduites que possible :

- Aucune évolution de la confluence n'est perceptible.
- Le Guil, très puissant, lisse les pentes avec essentiellement le comblement de la dépression entre la confluence et le pont de la RN 94.
- L'absence de dépôt à la confluence permet d'éviter un dépôt dans le lit du Chagne. Au contraire, le pavage est indispensable pour éviter un creusement du lit.

Ce scénario avec de très faibles évolutions dans le lit aval en cas d'absence de forte crue du Chagne est assez proche de celui des crues récentes durant lesquelles le niveau à la confluence a peu varié.

6.6.3.4. Engravement de la confluence avec la Durance

Les simulations réalisées dans le cadre du plan de gestion de la haute Durance ne montrent pas d'évolution importante de la zone de confluence sur le long terme. Cependant, en l'absence d'une forte crue concomitante de la Durance, un engravement significatif de la confluence parait probable, même si son ampleur est limitée par la largeur très importante du lit du Guil dans la zone de confluence et de la Durance en aval.

Dans le cadre du plan de gestion de la Durance, une simulation a été conduite en considérant une crue décennale de la Durance (avec les mêmes hypothèses hydrologiques que sur le Guil) et une crue centennale du Guil. Cette approche ne peut fournir qu'un ordre de grandeur une analyse plus fine étant nécessaire pour une quantification des niveaux d'eau avec notamment plusieurs scénarios de concomitance des crues.

La figure suivante montre l'engravement à la confluence en combinant le transit solide en aval de la situation et le fonctionnement de la Durance :

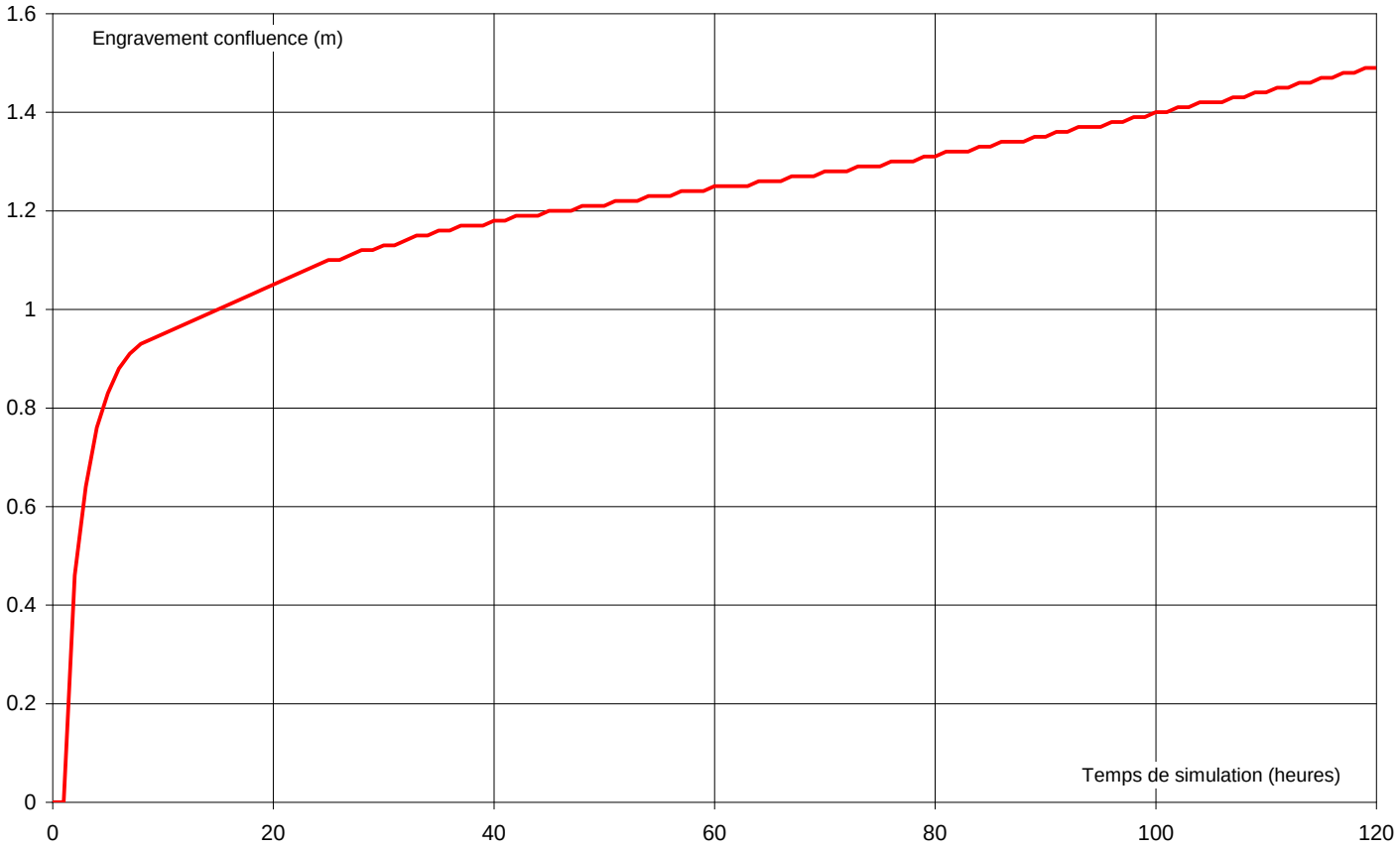


Figure 116 : Engravement à la confluence du Guil avec la Durance (Source ARTELIA).

Il ne s'agit que d'un ordre de grandeur qui conduit plutôt à des dépôts par excès car le calcul n'intègre pas les dépôts entre l'amont de la déchèterie et la confluence. Comme le montre la simulation suivante, le dépôt est dégressif depuis la confluence, et serait donc inférieur en amont de la déchèterie par rapport à la confluence.

Ce calcul montre qu'un équilibre est loin d'être atteint et qu'une crue supérieure conduirait à des dépôts plus importants. Le dépôt dans la zone de confluence est donc prépondérant, ce qui montre que toute réduction de largeur du lit doit être évitée.

Ainsi, la simulation est réalisée en considérant un engravement d'un mètre en amont de la station d'épuration, ce qui correspondrait à un engravement sensiblement supérieur à la confluence. Ce dépôt est pris en compte dès le début de la simulation, ce qui est très défavorable.

La simulation a été refaite dans le cas de la crue centennale généralisée :

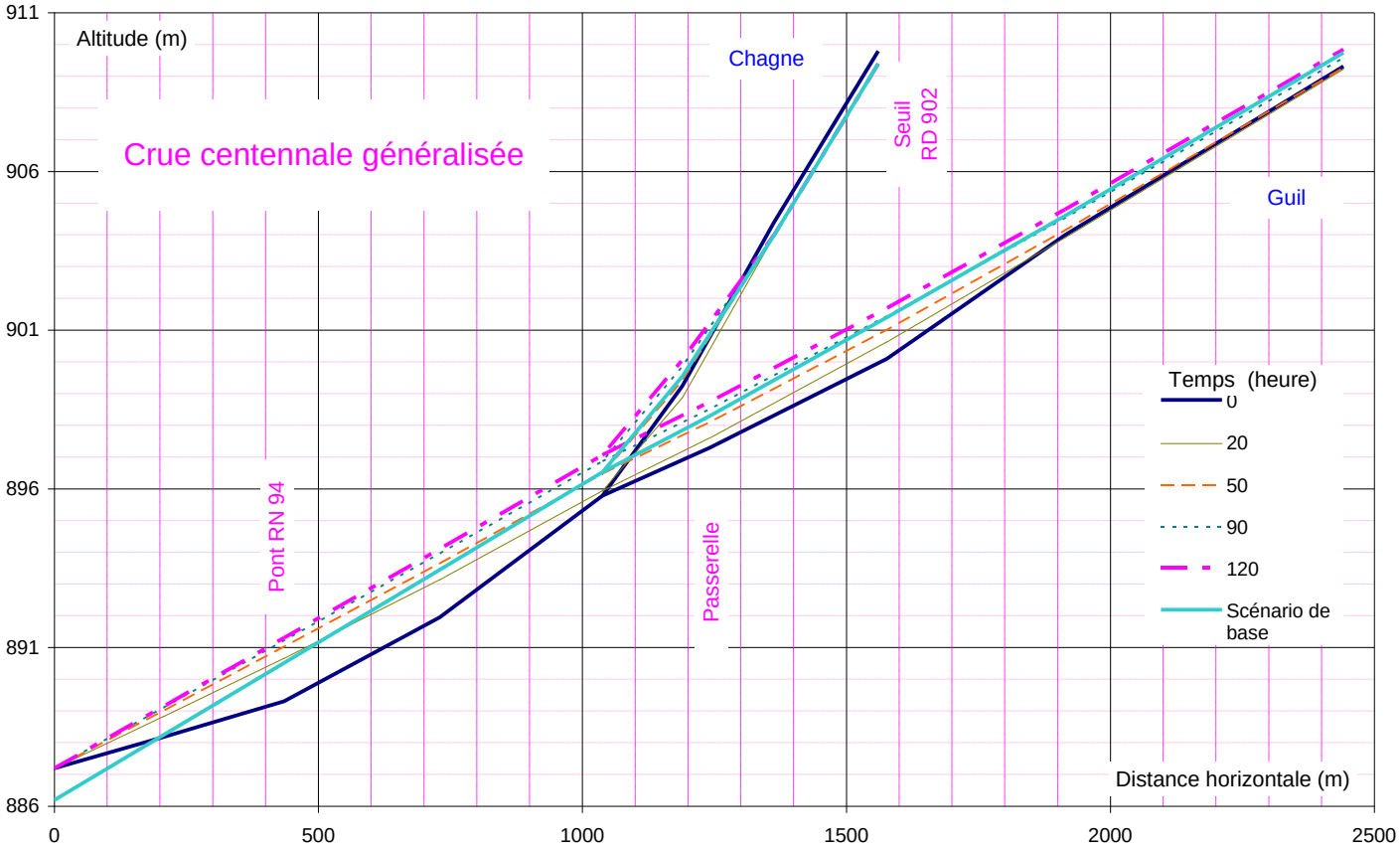


Figure 117 : Crue centennale généralisée et engravement d'un mètre au droit de la STEP.

Ce graphique indique aussi le niveau atteint en fin de crue pour le scénario de base.

Ce calcul montre que l'adaptation du lit à l'engravement est très rapide dans le chenal étroit. L'effet de l'engravement diminue lentement en allant vers l'amont. Ainsi, la majoration des niveaux en fin de crue est de 1 mètre en aval, mais de 53 centimètres seulement à la confluence et devient négligeable à l'extrémité amont de la zone modélisée, tant sur le Chagne que sur le Guil.

Dans les faits, il est probable que la chenalisation réduise un peu l'engravement dans la zone étroite par rapport à celui qui a été calculé.

6.6.3.5. Apports solides supérieurs du Chagne

L'analyse du Chagne montre que la détermination des apports est particulièrement délicate à cause d'un probable pavage mobile. Les simulations réalisées précédemment avec une pente d'équilibre de 2.5 % conduisent à l'absence de dépôt en dehors de la zone de confluence.

Ce résultat parait surprenant et il est difficile d'exclure que la pente d'équilibre soit un peu supérieure. Ainsi, une nouvelle simulation est réalisée en considérant une pente d'équilibre de 3 % sur le Chagne.

La simulation a été refaite dans le cas de la crue centennale généralisée qui est la plus préoccupante par rapport à cette nouvelle hypothèse :

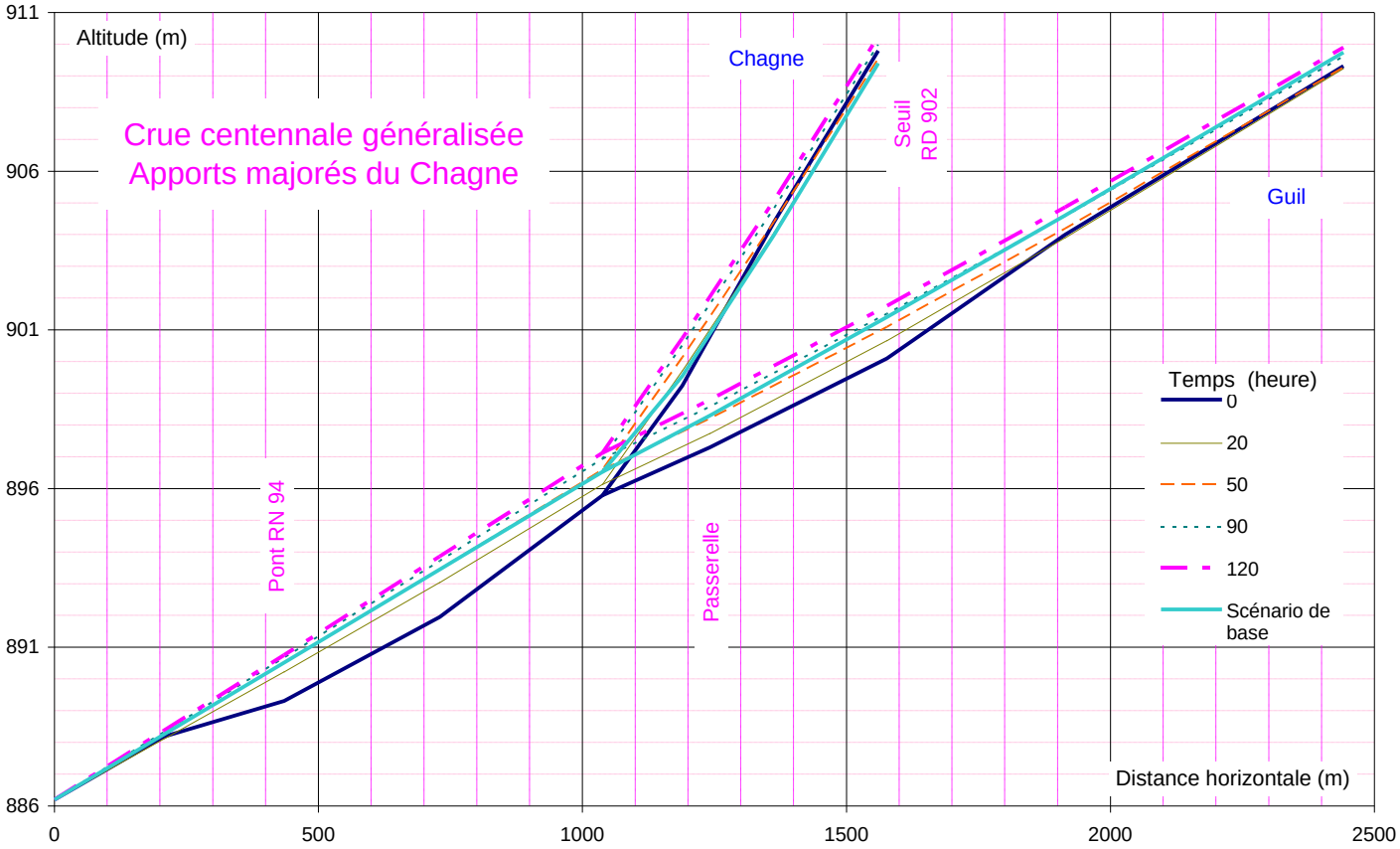


Figure 118 : Crue centennale généralisée et engravement d'un mètre au droit de la STEP.

Pour cette hypothèse, les apports solides du Chagne approchent 250 000 m³, soit plus que le Guil.

Cette majoration importante des apports conduit à des évolutions modérées des niveaux :

- Dans la zone de confluence, l'engravement est majoré de 60 centimètres.
- Cet engravement remonte dans le Chagne avec une pente supérieure au résultat précédent. L'écart est donc de plus en plus important et atteint 85 centimètres au pied du seuil de la RD 902a, qui reste encore très marqué.
- Sur le Guil, cet écart décroit progressivement pour s'annuler, tant en aval qu'en amont de la zone modélisée.

➲ Cette majoration du transport solide, très crédible, conduit à une dégradation relativement modérée de la situation.

6.6.4. Synthèse

Les modélisations de la confluence Chagne / Guil présentent des caractéristiques assez peu dépendantes des scénarios retenus :

- Entre la confluence et le pont de la RN 94, la dépression actuelle est rapidement comblée dans tous les cas. Le mode de calcul sous-estime l'effet de l'endiguement qui réduirait la tendance au dépôt pour les plus fortes crues, mais cet engravement reste clairement établi.
- En cas d'apport du Chagne, l'engravement est maximum à la confluence où il peut localement dépasser 2 mètres. Il est plus fort si les débits du Guil sont modérés. Il s'atténue progressivement en amont comme en aval.
- Avec les hypothèses d'apports solides retenus, l'engravement remonte peu dans le lit du Chagne.

Il semblerait qu'une crue centennale conduirait à un débordement dans cette zone si l'on cumule la hauteur maximum des dépôts et la hauteur maximum de l'eau. Cependant, ces deux hauteurs ne sont pas forcément concomitantes et seule une analyse de détail de ce tronçon permettrait de conclure.

Le calcul des lignes d'eau très détaillé réalisé par SOGREAH dans cette zone est indiqué à la page suivante.

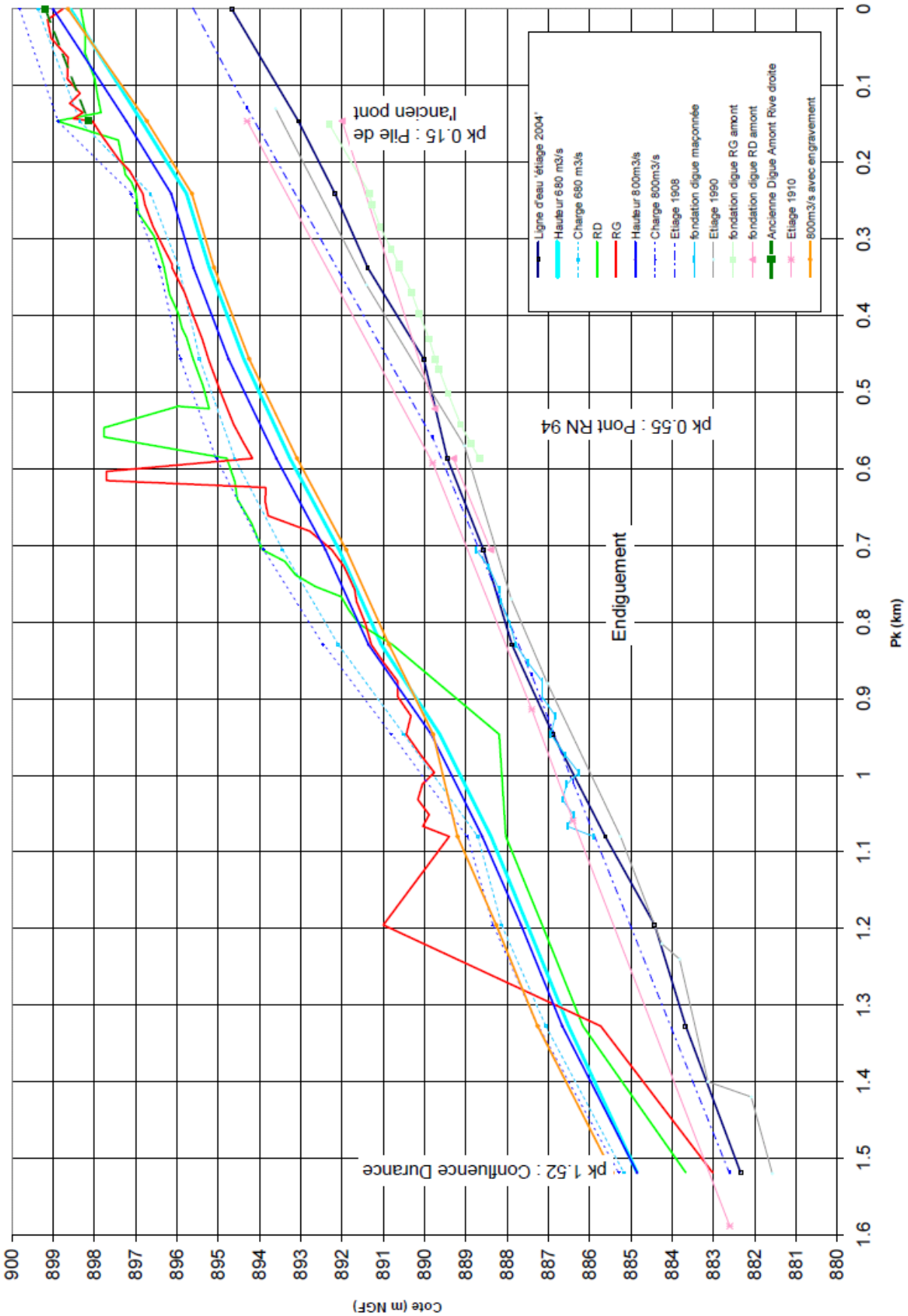


Figure 119 : Profils en long du Guil en aval de la confluence avec le Chagne.

Liste des graphiques et dessins

Figure 1 : Différents types de transport solide en rivière. 4
Figure 2 : Vue schématique d'un transport solide par charriage équilibré. 6
Figure 3 : Régulation du transport solide en cas de pénurie des apports. 7
Figure 4 : Début de l'évolution du profil en long en cas de réduction des apports. 8
Figure 5 : Nouvelle pente d'équilibre en cas de pénurie de matériaux amont. 8
Figure 6 : Nouvelle pente d'équilibre en cas d'augmentation des apports amont. 9
Figure 7 : Pavage avec disparition du lien entre le transport solide et le lit. 10
Figure 8 : Vue schématique d'un pavage endogène. 12
Figure 9 : Précipitations cumulées sur l'année à Ceillac. 17
Figure 10 : Cumul de précipitations en juin 1957 (METEO France 2011). 18
Figure 11 : Précipitations relevées début juin 1957. 19
Figure 12 : Cumul de précipitations en juin 57. 20
Figure 13 : Cumul de précipitations en juin 2000 (METEO France 2011). 21
Figure 14 : Précipitations relevées à Abriès. 22
Figure 15 : Précipitations horaires à Abriès en octobre 2000. 24
Figure 16 : Cumul de précipitations en octobre 2000 (METEO France 2011). 25
Figure 17 : Précipitations de Juillet 2002. 26
Figure 18 : Cumul de précipitations en octobre 2000 (METEO France 2011). 27
Figure 19 : Cumul de précipitations en juin 2011 (METEO France 2011). 29
Figure 20 : Pluies à Ristolas en juin 2011. 30
Figure 21 : Cumul de précipitations sur 5 jours. 31
Figure 22 : Précipitations journalières maximum. 32
Figure 23 : Hyétogrammes comparés des crues de Juin et Octobre 2000. 33
Figure 24 : Précipitations journalières à Ceillac. 34
Figure 25 : Ajustement de Gumbel sur Abriès. 35
Figure 26 : Précipitations sur 5 jours à Abriès. 36
Figure 27 : Cumuls de précipitations sur plusieurs jours. 37
Figure 28 : Ajustement de Montana à Ceillac. 38
Figure 29 : Ajustement de Gumbel sur l'ensemble des stations. 40
Figure 30 : Ajustement des Valeurs extrêmes en Haute Maurienne et dans le Queyras. 41

Figure 31 : Ajustement sur les pluies à faible pas de temps. 43
Figure 32 : Coefficient de Montana sur les pluviographes. 44
Figure 33 : Évolution des débits observés en fonction de la superficie du bassin versant. 50
Figure 34 : Ajustement des débits observés à la Maison du Roy. 52
Figure 35 : Profil en long général du Guil. 63
Figure 36 : Profil en long en amont du Gouret. 64
Figure 37 : Profil en long dans la traversée d'Aiguilles. 66
Figure 38 : Profil en long du Guil à Château Queyras. 67
Figure 39 : Profil en long du Guil dans la Combe du Queyras. 68
Figure 40 : Profil en long du Guil sur son cône de déjection. 69
Figure 41 : Profil en long du torrent de Ségure. 70
Figure 42 : Profil en long du Bouchet en aval du Roux. 71
Figure 43 : Profil en long du Peynin en 1999 et 2012. 72
Figure 44 : Profil en long de l'Aigue Blanche et de l'Aigue Agnelle. 74
Figure 45 : Profil en long du torrent d'Izoard et de ses affluents. 75
Figure 46 : Profils en long du Cristillan à proximité de Ceillac. 76
Figure 47 : Profil en long général du Chagne. 77
Figure 48 : Profil en long du Chagne du Rif Bel et du Palps à Guillestre. 78
Figure 49 : Évolution du lit en amont de l'Échalp. 79
Figure 50 : Évolution du lit entre la Monta et Ristolas. 80
Figure 51 : Nouvelle pente d'équilibre en cas de réduction de la largeur du lit. 81
Figure 52 : Évolution du lit dans le secteur d'Abriès. 82
Figure 53 : Évolution des fonds dans le secteur du Gouret. 83
Figure 54 : Évolution des niveaux dans la traversée d'Aiguilles. 85
Figure 55 : Évolutions des profils en long dans la plaine de Château Queyras. 87
Figure 56 : Évolution des profils en long du Guil en aval de Château Queyras. 89
Figure 57 : Évolution des profils en long du Guil en amont de la Maison du Roy. 90
Figure 58 : Évolution du lit dans la basse vallée du Guil. 92
Figure 59 : Courbes granulométriques du Guil. 94
Figure 60 : Évolution du diamètre moyen. 95
Figure 61 : Mesures de granulométrie réalisées sur le Bouchet 96
Figure 62 : Mesures de granulométrie sur le cône de déjection du Peynin. 97
Figure 63 : Granulométries mesurées sur Cristillan. 98
Figure 64 : Formes différentes d'hydrogramme de crue. 100
Figure 65 : Estimation des volumes transportés dans le bassin versant du Guil. 101

Figure 66 : Chronologie des évolutions des niveaux dans une zone de confluence. 104
Figure 67 : Volume transité dans les zones de confluence pour des crues centennales..... 105
Figure 68 : Capacité de transport à saturation dans le Chagne aval et le Rif Bel..... 109
Figure 69 : Capacité de transit dans le Chagne aval et le Rif Bel.....110
Figure 70 : Divagations modérées du Chagne en 1957. 111
Figure 71 : Zone modélisée à la confluence avec le torrent de Ségure. 114
Figure 72 : Évolution des profils en long pour une crue centennale généralisée à Ristolas. 115
Figure 73 : Évolution des niveaux pour une crue centennale généralisée. 116
Figure 74 : Crue décennale du Guil et crue centennale du torrent de Ségure. 117
Figure 75 : Crue décennale du Ségure et centennale du Guil - Évolution du profil en long. 118
Figure 76 : Crue centennale généralisée et lit étroit. 119
Figure 77 : Crue centennale généralisée et lit étroit. 120
Figure 78 : Crue centennale généralisée et apports solides du Ségure majorés. 121
Figure 79 : Zone modélisée à la confluence avec le Bouchet. 124
Figure 80 : Évolution des profils en long pour une crue centennale généralisée à Abriès. 125
Figure 81 : Crue décennale du Guil et crue centennale du Bouchet 127
Figure 82 : Crue centennale du Guil et crue décennale du Bouchet..... 128
Figure 83 : Principe d'aménagement de la confluence du Bouchet avec le Guil. 129
Figure 84 : Crue centennale généralisée avec aménagement de la confluence. 130
Figure 85 : Crue centennale généralisée avec - ou sans - aménagement de la confluence. 131
Figure 86 : Zone modélisée à la confluence avec le Peynin. 134
Figure 87 : Évolution des profils en long pour une crue centennale généralisée à Aiguilles. ...135
Figure 88 : Crue décennale du Guil et crue centennale du Peynin 136
Figure 89 : Crue centennale du Guil et crue décennale du Peynin.....137
Figure 90 : Évolution des profils en long pour une crue centennale généralisée à Aiguilles... 138
Figure 91 : Zone de confluence en 1948. 142
Figure 92 : Lit étroit et stable avant 1957. 142
Figure 93 : Cône de déjection de l'Aigue Blanche en 1957. 143
Figure 94 : Confluence actuelle du Guil avec l'Aigue Blanche et ancien tracé du Guil. 144
Figure 95 : Vues de la zone centrale avant et après 1957 et actuellement. 145
Figure 96 : Vue de l'amont du verrou de Château Queyras. 147
Figure 97 : Profils en long en amont de Château Queyras. 148
Figure 98 : Profils en long récents en amont de Château Queyras. 149
Figure 99 : Dépôt temporaire au droit d'un long rétrécissement. 151
Figure 100 : Sections au droit en en aval du pont. 153

Figure 101 : Influence du Pont sur les niveaux liquides (crue centennale).....154
Figure 102 : Influence du pont sur les niveaux liquides (crue du type juin 2000). 155
Figure 103 : Dépôt temporaire en amont d'un rétrécissement. 156
Figure 104 : Résultats du calcul de la ligne d'eau (Q=405m³/s, avec transport solide). 158
Figure 105 : Influence du pont de Château Queyras pour une crue de type juin 2000. 161
Figure 106 : Zone modélisée à la confluence avec Chagne / Chagnon. 164
Figure 107 : Hydrogrammes d'une crue généralisée du Chagne et du Chagnon.....165
Figure 108 : Niveau atteint pour une crue centennale généralisée. 166
Figure 109 : Crue décennale du Chagne et crue centennale du Chagnon. 167
Figure 110 : Crue décennale du Chagnon et centennale du Chagne. 168
Figure 111 : Lit engravé du Chagnon en amont de Ste Marie en Juin 1957. 169
Figure 112 : Zone modélisée à la confluence avec le Chagne. 171
Figure 113 : Crue centennale généralisée au confluent du Chagne. 172
Figure 114 : Crue décennale du Guil et crue centennale du Chagne.....173
Figure 115 : Crue centennale du Guil et crue décennale du Chagne. 174
Figure 116 : Engravement à la confluence du Guil avec la Durance (Source ARTELIA). 175
Figure 117 : Crue centennale généralisée et engravement d'un mètre au droit de la STEP. 176
Figure 118 : Crue centennale généralisée et engravement d'un mètre au droit de la STEP.....177
Figure 119 : Profils en long du Guil en aval de la confluence avec le Chagne.....179

Liste des photos

Photo 1 : Lit alluvionnaire mobile dans le tronçon aval. 7
Photo 2 : Pavage rocheux et par des blocs dans les gorges du Guil. 11
Photo 3 : Tri granulométrique et pavage à la confluence avec le torrent du Clot. 13
Photo 4 : Lit de Chagne avec pavage mobile sur le cône de déjection. 14
Photo 5 : Engravement généralisé du Peynin après la crue de Juin 2000. 73
Photo 6 : Respiration du lit du Ségure en amont de la confluence avec le Guil. 106
Photo 7 : Affouillement et destruction des protections de berges en aval de Ville Vieille. 150