



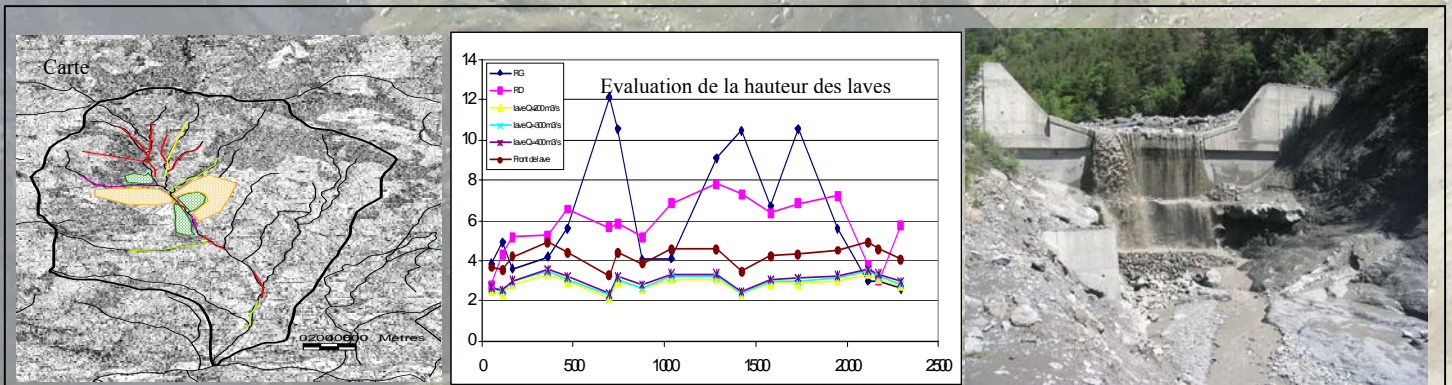
Ecole Nationale du Génie de
l'Eau et de l'Environnement
de Strasbourg



restauration des terrains en montagne
Service des Alpes de Haute Provence
Division Ubaye/Blanche

Etudes d'aménagements de cours d'eau torrentiels

Applications aux contextes d'écoulements à fort charriage et à laves torrentielles



Mémoire présenté pour l'obtention
du diplôme d'Ingénieur des Travaux Ruraux de l'ENGEES

FOUQUET MARC
Promotion Lot

Du 03/01/2006 au 30/06/2006

Remerciements

Je voudrais, tout d'abord, remercier vivement Christian Deymier, mon maître de stage. Son expérience et son sens de la rigueur m'ont permis de m'enrichir et d'apprendre énormément dans l'appréhension des risques torrentiels en montagne. Sa patience et sa gentillesse m'ont procuré une source d'encouragement permanente et ont contribué à rendre ce stage de 6 mois agréable.

Je remercie ici également de tout cœur M.Guiter, pour sa manière passionnelle d'envisager et de faire partager son travail, mais aussi M.Peyron pour sa bonne humeur quotidienne. Merci pour votre disponibilité et votre aide sans laquelle rien n'aurait été possible.

De même, que Florent Charles, trouve ici des remerciements sincères pour son aide au bon déroulement administratif et logistique de ce stage mais aussi pour son intérêt à mes travaux.

Merci à M.Mathelin pour son aide efficace en matière de Système d'Information Géographique et à tout le personnel du RTM de Digne, de l'ONF de Barcelonnette pour leur accueil.

Huguette Meunier, de la DIREN d'Aix en Provence, se voit ici remercié pour son aide à la délimitation des bassins versant de grande taille de la vallée e l'Ubaye et pour la journée agréablement passée en sa compagnie.

Un grand merci aussi à Emile Tron, maire de Méolans Revel, et à Mme Lombard, première adjointe au maire de Larche, et aux habitants de ces magnifiques communes pour leur aide généreuse, particulièrement en ce qui concerne l'étude historique des torrents. Merci à tous pour votre aide et pour l'intérêt que vous avez porté à mon travail.

Merci à Jean Marc Jaehn, mon tuteur de stage, qui m'a conseillé sur les démarches à suivre pour élaborer ce rapport et pour son soutien.

Enfin, je remercie vivement Christophe Péteuil, hydraulicien attitré du service RTM national, pour ses conseils précieux concernant la mise au point pratique d'une étude hydraulique.

Résumé

Etudes d'aménagements de cours d'eau torrentiels. Applications aux contextes d'écoulements à fort charriage et à laves torrentielles

Les services RTM des Alpes et des Pyrénées contribuent aux politiques de prévention et de protection des enjeux existants. L'élaboration d'une étude hydraulique d'un torrent de montagne requiert des connaissances spécifiques, tant sur la genèse des phénomènes que de leur manifestation. Confiées, jusqu'à maintenant, à des bureaux spécialisés, les études torrentielles tendent à être réalisées de plus en plus par le service RTM.

D'un point de vue pratique, dans le but de dresser une synthèse hydraulique complète destinée à être réutilisée par les agents du service RTM, il convient de s'intéresser aux modèles et outils en présence dans le service et, si possible, de les optimiser.

A partir de la maîtrise préalable de ces éléments, l'édification d'une méthodologie d'étude hydraulique torrentielle est exposée. Elle prend forme au travers du torrent de l'Abéous, choisi car le siège des deux modes de transport solide pouvant être rencontrés dans un torrent. L'étude balaye l'ensemble des problèmes que l'on peut rencontrer en terrain de montagne.

Elle débute par une étude historique dont le but est d'évaluer les principaux problèmes rencontrés mais aussi de comprendre la situation passée, actuelle et future du lit. Suit une analyse hydrologique, destinée à déterminer les caractéristiques des crues de projet servant à l'analyse des risques et des aménagements de protection, puis une analyse des apports solides en temps de crue des versants et des lits. Elle est complétée par une description générale du profil en long du torrent, véritable indicateur de son fonctionnement. Par la suite, au travers de l'utilisation de logiciels de simulation, l'évaluation des conditions d'écoulement permet de localiser les risques, et en fonction de la vulnérabilité du site, de proposer des aménagements.

Abstract

Management studies of torrents. Applications to the contexts of flows with strong bedload transport and debris flows

The RTM services of the Alps and Pyrenees contribute to the policies of prevention and protection of the existing stakes. The elaboration of a hydraulic study of a mountain torrent requires specific knowledge, both on the genesis of the phenomena and their manifestation. So far assigned to specialized agencies, torrential flow studies tend to be realized more and more by the RTM service.

Practically, in order to achieve a complete hydraulic synthesis intended to be reused by the RTM service, it is advisable to be interested in the models and the tools aboard the valley of Ubaye and, if possible, to optimize them.

With the preliminary control of these elements, the construction of a methodology for a torrential hydraulic study is exposed. It is performed for the case of the Abeous torrent, which has been chosen because frame of both types of solid transport which can be met in a torrent. The study alludes to all the problems which can be met in mountain areas.

It begins with a historic study the purpose of which is to estimate the main met problems but also to understand the current and future situations of the river channel. A hydrological analysis follows and is intended to determine the characteristics of the project floods in order to analyse the risks and the preventive installations, then comes the analysis of the flood solid contributions of the channels and the hillsides. It is completed by a general description of the torrent long profile, the real indicator of its functioning. Afterward, thanks to the utilisation of simulation software, the evaluation the flow conditions enables to localise the risks, and, according to the vulnerability of the site, to propose river installations.

Sommaire

<i>Symboles et Abréviations</i>	6
<i>Liste des Tableaux et Photos</i>	6
<i>Liste des Figures</i>	7
<i>Introduction</i>	8
I. <u>Contexte général de l'étude</u>	9
A. <u>Le service RTM</u>	9
1. <i>Rôle de la Restauration des Terrains en Montagne</i>	9
2. <i>Approche historique</i>	9
3. <i>Fonctionnement administratif</i>	10
B. <u>Le service RTM des Alpes de Haute Provence</u>	10
C. <u>Problématique</u>	10
1. <i>Enjeux de l'étude</i>	10
2. <i>Objectif de l'étude</i>	11
D. <u>Contexte géographique : la vallée de l'Ubaye</u>	11
1. <i>Situation géographique</i>	11
2. <i>Géologie</i>	11
3. <i>Conditions Climatiques</i>	12
4. <i>Hydrographie</i>	12
II. <u>Prise en main et évolution de données et d'outils utilisés en hydraulique torrentielle.</u>	14
A. <u>Données et outils hydrologiques</u>	14
1. <i>Quels sont les moyens de mesure ?</i>	14
2. <i>Synthèse locale pluviométrique et hydrométrique</i>	14
3. <i>Choix des postes représentatifs de la vallée de l'Ubaye</i>	15
4. <i>Présentation des outils de calcul</i>	16
5. <i>Description sommaire de l'outil « CALCUL HYDROLOGIQUE »</i>	16
B. <u>Données et outils de transport solide</u>	17
1. <i>Estimation des volumes solides</i>	17
a) <i>Cas du charriage torrentiel</i>	17
b) <i>Cas du volume des laves torrentielles</i>	17
2. <i>Estimation des conditions d'écoulement</i>	18
a) <i>Cas du charriage torrentiel</i>	19
b) <i>Cas des laves torrentielles</i>	19
III. <u>Conception d'une étude hydraulique type : le torrent de l'Abéous</u>	20
A. <u>Pourquoi ce choix ?</u>	20
B. <u>Objet de l'étude hydraulique</u>	20
1. <i>Objectif</i>	20
2. <i>Crués historiques</i>	21
3. <i>Historique morphologique du torrent</i>	22
C. <u>Etude Hydrologique</u>	23
1. <i>Utilité</i>	23
2. <i>Pluviométrie du Bassin Versant de l'Abéous</i>	23
a) <i>Pluviométrie journalière</i>	23
b) <i>Pluviométrie de durée inférieure à 24 heures</i>	24
3. <i>Relations entre pluie et débit</i>	26
a) <i>Présentation des formules utilisées</i>	26
b) <i>Durée caractéristique de la réponse du bassin versant aux pluies</i>	27
c) <i>Estimation du débit décennal à partir des méthodes transformant la pluie en débit</i>	27
d) <i>Estimation du débit décennal par la méthode de transfert de bassins versants</i>	28
e) <i>Estimation du débit centennal</i>	28
D. <u>Transport Solide</u>	30

1.	<i>Profil en long général</i>	30
2.	<i>Profil en long de la partie aval du chenal d'écoulement</i>	30
3.	<i>Etude du profil en long de l'Ubaye</i>	32
4.	<i>Description général du lit et analyse de l'érosion du bassin versant</i>	32
a)	<i>Partie amont</i>	33
b)	<i>Le chenal d'écoulement principal supérieur et ses versants.</i>	33
c)	<i>Partie inférieure du chenal d'écoulement.</i>	34
5.	<i>Cartographie des phénomènes d'érosion</i>	35
6.	<i>Prédétermination des volumes solides susceptibles d'être mobilisés</i>	35
7.	<i>Quantification du transport solide</i>	37
a)	<i>Phénomènes observés.</i>	37
b)	<i>Description d'une lave torrentielle.</i>	37
c)	<i>Calcul des volumes de laves.</i>	38
8.	<i>Transport solide par charriage</i>	41
E.	Conditions découlement	44
1.	<i>Le charriage torrentiel</i>	44
a)	<i>Problématique</i>	44
b)	<i>Outils et Hypothèses de simulation</i>	44
c)	<i>Résultats obtenus</i>	45
2.	<i>Les laves torrentielles</i>	45
a)	<i>Loi de comportement</i>	45
b)	<i>Estimation des paramètres caractéristiques des laves de l'Abéous</i>	46
3.	<i>Conditions d'écoulement sur la partie aval du chenal d'écoulement (aval des gorges)</i>	48
a)	<i>Analyse générales du profil en long</i>	48
b)	<i>Enjeux et aléas au niveau des zones de débordement</i>	49
4.	<i>Bilan</i>	51
a)	<i>Volume solide et érosion :</i>	51
b)	<i>Les débordements</i>	51
F.	Proposition d'aménagements	53
1.	<i>Possibilités</i>	53
a)	<i>Limitation des apports solides.</i>	53
b)	<i>Limitation des débordements</i>	53
2.	<i>Aménagements proposés</i>	54
a)	<i>Plage de dépôt.</i>	54
b)	<i>Rehaussement de berge</i>	55
c)	<i>Aménagement de la confluence</i>	57
d)	<i>Dispositif d'alerte</i>	58
	CONCLUSION GENERALE	61
	Bibliographie	62
	ANNEXES	64

Symboles et Abréviations

Bi	: Barrage numéro i
$C_{\text{ruissellement}}$: Coefficient de ruissellement
D	: Durée caractéristique de la réponse du bassin versant
DDAF	: Direction Départementale de l'Agriculture et de la Forêt
D 900	: route Départementale n°900
DIREN	: Direction Régionale de l'ENVironnement
EDF	: Electricité De France
ETRM	: Bureau d'étude Eaux, Torrents & Rivières de Montagne de V.Kouliniski
Gradex	: Gradient des valeurs Extrêmes
GSM	: Global System for Mobile
MAAPR	: Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation, de la Pêche et de la Ruralité
NE	: Nord Est
P (T)	: Pluie de période de retour T
PACA	: région Provence Alpes Côte d'Azur
PPR	: Plan de Prévention des Risques
PT	: Profil en Travers
Q_T	: Débit de période de retour T
R^2	: Coefficient de corrélation
RTM	: Restauration des Terrains en Montagne
S	: Surface
SCS	: Soil Conservation Service, méthode de détermination d'un paramètre de stockage des pluies
SIG	: Système d'Information Géographique
SO	: Sud Ouest
T	: période de retour
TFE	: Travail de Fin d'Etude
v	: vitesse

Liste des Tableaux et Photos

<i>Tableau 1 : Mémento « Contexte général de l'étude »</i>	13
<i>Tableau 2 : Mémento « Données et Outils utilisables en hydraulique torrentielle »</i>	19
<i>Tableau 3: Etude historique des crues de l'Abéous</i>	21
<i>Tableau 4 : Mémento « Historique du torrent »</i>	22
<i>Tableau 5 : Caractéristiques des précipitations à faible pas de temps à Embrun</i>	25
<i>Tableau 6 : Caractéristiques des précipitations à faible pas de temps sur l'Abéous</i>	25
<i>Tableau 7 : Paramètres de Montana calculés</i>	26
<i>Tableau 8 : Caractéristiques des bassins versants de référence et débits décennaux obtenus, méthode de transfert de bassin</i>	28
<i>Tableau 9 : Mémento « Hydrologique »</i>	29
<i>Tableau 10 : Récapitulation des volumes susceptibles d'être érodés</i>	36
<i>Tableau 11 : Mémento « Analyse du profil en long »</i>	36
<i>Tableau 12 : Volumes obtenus par la méthode basée sur les précipitations</i>	38
<i>Tableau 13 : Paramètres retenus pour l'estimation des volumes par les méthodes sommaires</i>	39
<i>Tableau 14: Volumes obtenus par l'ensemble des méthodes sommaires</i>	39
<i>Tableau 15 : Paramètres granulométriques de l'Abéous</i>	42
<i>Tableau 16 : Mémento « Volumes Solides »</i>	43

<i>Tableau 17 : Paramètres retenus dans le logiciel EFL vs 4</i>	<i>44</i>
<i>Tableau 18 : Valeurs des Exhaussements obtenus avec le logiciel EFL vs 4</i>	<i>45</i>
<i>Tableau 19 : Débits des laves torrentielles de l'Abéous</i>	<i>47</i>
<i>Tableau 20 : Estimation des paramètres rhéologiques des laves de l'Abéous</i>	<i>48</i>
<i>Tableau 21 : Mémento « Conditions d'écoulement »</i>	<i>52</i>
<i>Tableau 22 : Récapitulatif des avantages et inconvénients de la plage de dépôt</i>	<i>54</i>
<i>Tableau 23 : Récapitulatif des avantages et inconvénients de l'aménagement au niveau du pont de la CD 900</i>	<i>57</i>
<i>Tableau 24 : Récapitulatif des avantages et inconvénients de l'aménagement au niveau de la confluence.....</i>	<i>58</i>
<i>Tableau 25 : Mémento « Proposition d'Aménagements ».....</i>	<i>60</i>
<i>Photo 1 : Situation de l'érosion dans les gorges à l'amont du barrage 3.....</i>	<i>33</i>
<i>Photo 2 : Plages d'atterrissement et Photo 3 : incision du torrent à l'aval du passage à gué.....</i>	<i>34</i>
<i>Photo 4 : Aperçu de la hauteur de respiration</i>	<i>40</i>

Liste des Figures

<i>Figure 1: Localisation des services RTM en France</i>	<i>10</i>
<i>Figure 2: Organigramme de la division "Ubaye"</i>	<i>10</i>
<i>Figure 3: Localisation de la vallée de l'Ubaye</i>	<i>11</i>
<i>Figure 4: Coupe géologique de la "fenêtre" de Barcelonnnette</i>	<i>12</i>
<i>Figure 5: Description de l'outil « Calcul Hydrologique »</i>	<i>16</i>
<i>Figure 6: Description de l'outil de calcul des volumes de laves sous Excel.....</i>	<i>18</i>
<i>Figure 7 : Répartition des précipitations à proximité du torrent de l'Abéous</i>	<i>24</i>
<i>Figure 8 : Coefficient b de stations voisines.....</i>	<i>26</i>
<i>Figure 9 : Profil en long général du torrent de l'Abéous</i>	<i>30</i>
<i>Figure 10 : Profil en long du cône de déjection.....</i>	<i>31</i>
<i>Figure 11 : Profil en long de l'Ubaye (Kouliniski, 2005)</i>	<i>32</i>
<i>Figure 12 : Structure d'une lave torrentielle, Internet [7].....</i>	<i>37</i>
<i>Figure 13 : Hydrogrammes solides et liquides d'une crue décennale sur l'Abéous.....</i>	<i>43</i>
<i>Figure 14 : Situation dans le cas d'une crue à charriage au niveau de la maison du bois.....</i>	<i>45</i>
<i>Figure 15 : Différence des hauteurs des laves par rapport au sol.....</i>	<i>48</i>
<i>Figure 16 : Localisation des débordement en tête du cône de déjection</i>	<i>49</i>
<i>Figure 17 : Localisation des débordements au niveau des Trons</i>	<i>50</i>
<i>Figure 18 : Localisation des débordements dans la partie aval du cône de déjection.....</i>	<i>51</i>
<i>Figure 19 : Représentation de la situation actuelle au niveau du pont de la CD 900</i>	<i>55</i>
<i>Figure 20 : Visualisation de l'aménagement au niveau du pont de la CD 900, vue de profil.....</i>	<i>56</i>
<i>Figure 22 : Vue de dessus de l'aménagement de la confluence</i>	<i>57</i>

Introduction

D'une manière générale, les torrents sont des cours d'eau à pente forte (supérieure à 6%) présentant des débits irréguliers et des écoulements très chargés. Ils sont générateurs de risques d'inondation, pouvant s'accompagner d'un transport de matériaux importants au fort pouvoir destructeur.

Les hommes ont fréquenté très tôt les territoires implantés au sein des bassins versants torrentiels. Des documents anciens témoignent des difficultés engendrées au voisinage d'un torrent. C'est le cas d'une capitulation de 1682, du conseil de communauté de Jausiers (Ubaye), qui évoque les dommages provoqués par le débordement du torrent de Sanières et les moyens d'y remédier. Cependant, les activités des montagnards se sont toujours exercées au sein même du bassin versant torrentiel, c'est-à-dire dans des zones susceptibles d'être exposées aux conséquences du fonctionnement érosif. Le plus souvent, il s'agit des dommages et des préjudices engendrés par les crues torrentielles : courants rapides, dépôts, affouillements, divagation de lits, chocs destructeurs.

La maîtrise des risques liés aux crues devient donc un enjeu majeur dans ces régions où il s'avère indispensable de trouver un équilibre entre le système érosif, naturel et inéluctable, et le système socio-économique.

Depuis l'épopée de la RTM au cours de la seconde moitié du 19^{ème} siècle, les bassins versants montagnards français ont connu des évolutions physiques, et surtout socio-économiques, importantes : exode des populations, abandon des terres agricoles, augmentation de la fréquentation touristique montagnarde, difficulté de financer les projets... Le contexte des décisions en est devenu plus complexe et il s'avère désormais nécessaire d'effectuer, notamment, des études hydrauliques poussées de bassins versants afin de protéger les enjeux des risques liés aux torrents.

Après de fortes pluies, l'eau peut devenir source de destruction. Les enjeux matériels justifient à eux seuls qu'on s'intéresse aux crues des bassins versants de montagne. Elles sont généralement soudaines et violentes et peuvent prendre plusieurs formes, allant de la crue brève et intense aux laves torrentielles, en passant par tous les types d'écoulements plus ou moins chargés en débris flottants et en sédiment (Galéa, 1993). Les vallées de l'Ubaye et de la Blanche, plus particulièrement concernées par ce TFE, ne font pas abstraction à ces phénomènes redoutables, bien au contraire. Les conditions géologiques, climatiques et nivologiques y sont en effet tout à fait propices.

Les services RTM des Alpes et des Pyrénées contribuent aux politiques de prévention (élaboration de Plan de Prévention contre les Risques naturels, avis divers au titre de l'application du droit du sol) et de protection des enjeux existants. Ceci nécessite une analyse de la genèse des phénomènes, une localisation et une caractérisation de leurs manifestations. L'évolution, des techniques et outils, mais aussi du contexte général d'intervention du service, pousse le RTM à envisager la réalisation d'études hydrauliques jusqu'alors confiées à des bureaux d'études.

Cependant aucune analyse n'a été effectuée à ce jour et c'est à ce stade qu'intervient mon stage. Cette étude vise à proposer un canevas méthodologique de conduite des études courantes par la réalisation de deux études hydrauliques. L'une sur un torrent à charriage simple (Rouchouse), et l'autre, sur un torrent connaissant, de même, ce type de phénomène de transport solide mais étant, en plus, le lieu du phénomène de lave torrentielle (l'Abéous).

Nous présentons donc, dans un premier temps, le contexte général de l'étude détaillant la structure d'accueil, la problématique rencontrée et les spécificités de la zone d'étude. Dans un second temps, les données et outils disponibles sont répertoriés. Nous en expliquons leur rôle et leurs limites dans la réalisation d'une étude hydraulique et, lorsque cela est nécessaire, procédons à la description de nouveaux outils. Enfin, l'élaboration d'une étude hydraulique type se réalise au travers l'exemple de l'Abéous. Elle aborde, de manière méthodologique et critique mais vraisemblablement non exhaustive, l'ensemble des aspects, outils et problèmes rencontrés en hydraulique torrentielle.

I. Contexte général de l'étude

A. Le service RTM

1. Rôle de la Restauration des Terrains en Montagne

Les territoires de montagne, de par leur topographie, sont le siège de phénomènes naturels multiples, essentiellement dus à l'action de l'eau et de la pesanteur, se traduisant par des phénomènes gravitaires rapides tels que les mouvements de terrains, les crues torrentielles, les avalanches... Si cette érosion est inévitable sur le long terme, la protection des personnes et des biens d'une part, le maintien et le développement de l'activité économique d'autre part, demandent qu'elle soit, au moins, partiellement maîtrisée. En effet, les montagnards, habitués à ce milieu, ont su s'adapter même si la vie et le travail sont rendus difficiles par la vigueur du climat et du relief. Actuellement, une population toute autre, bien souvent juste de passage, fréquente également ces montagnes et en ignore les dangers. Les risques sont constants pour chacune de ces populations et le besoin de les protéger devient de plus en plus grand.

La mission première du service RTM est donc, comme son nom l'indique, de Restaurer les Terrains de Montagne afin de protéger la population et les biens des risques naturels.

2. Approche historique

En montagne, lors de la décennie de 1850 à 1860, de très graves inondations ont eu lieu (C.Flez, 2000). En France, la dégradation des sols, par défrichement et surpâturage, fut mise en cause. Certains observateurs remarquèrent que ces facteurs contribuent à augmenter fortement le ruissellement, mais aussi l'érosion sur les versants et donc le transport solide dans le lit des cours d'eau. Ayant une forte volonté d'éradiquer ces problèmes, l'état décida d'acquérir les terrains les plus dégradés afin de reboiser les pentes montagnardes. Cette mission fut tout naturellement confiée à l'administration forestière, avec la création d'un nouveau service : c'est la naissance du service RTM.

En complément de reboisements, le service RTM a également entrepris d'importants travaux de génie civil, mettant en œuvre des travaux d'une grande audace (corrections torrentielles, génie paravalanche...). Ainsi, depuis plus d'un siècle, 380 000 ha de terrains domaniaux ont été acquis, 250 000 reboisés et ce sont plus de 1500 torrents, versants en glissement ou couloirs d'avalanche qui ont été « traités ».

De nos jours, l'Etat a nettement infléchi sa politique d'acquisition foncière et privilégie une diminution de la vulnérabilité dans les zones soumises aux aléas les plus forts. Le rôle de « reboiseur », qui était la fonction première du RTM, a donc très largement évolué. Il en reste pas moins que c'est le seul service de l'Etat spécialisé dans la prévention et la protection contre les risques naturels en montagne. Ses missions principales sont les suivantes :

- Continuité de la mission historique d'aménagement et d'entretien des séries domaniales.
- Restauration des Terrains en Montagne : gestion forestière, ouvrages de génie civil sur les torrents, filets et râteliers paravalanches.
- Aide technique aux collectivités pour la réalisation de travaux de protection : diagnostic de situation, propositions de programmes de travaux, montage de dossiers pour recherche de financement. Les partenaires sont généralement des communes rurales ne disposant pas de services administratifs et techniques suffisants.
- Réalisation de Plans de Prévention des Risques (PPR) : élaboration technique, concertation et négociation avec les communes.

crues permettent désormais d'envisager la réalisation d'études sérieuses par le service RTM des Alpes de Haute Provence.

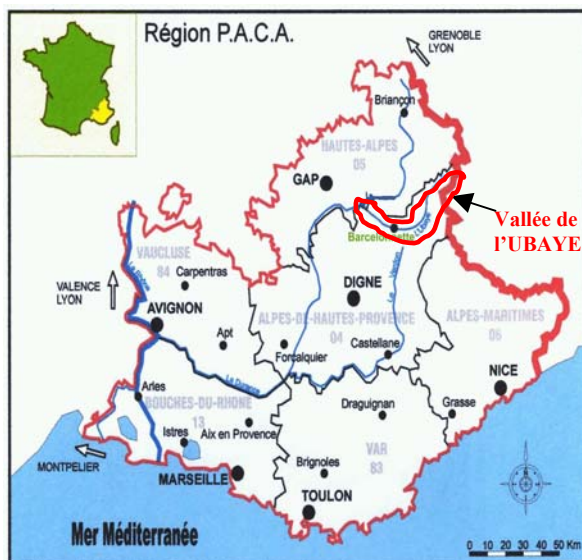
2. Objectif de l'étude

Le but général de mon stage est de contribuer à l'élaboration d'une étude hydraulique type dont la vocation est d'être réutilisée par les ingénieurs du service pour de futures études. Afin de mener à bien cette dernière, un bilan critique et une mise au point des données et outils utilisables en hydraulique torrentielle, sont nécessaires.

D'autre part, l'élaboration d'une étude de référence se réalise à travers l'étude du torrent de l'Abéous, choisi car présentant toutes les caractéristiques et problématiques que l'on peut rencontrer dans un bassin versant de montagne. La méthodologie utilisée sur ce dernier a été appliquée, durant mon stage, à un second torrent, et un rendu d'une deuxième étude hydraulique, sur le torrent de Rouchouse¹, fut effectué.

D. Contexte géographique : la vallée de l'Ubaye

1. Situation géographique



La vallée de l'Ubaye est située à l'extrême sud est de la France. L'Ubaye est une rivière torrentielle, affluent de la rive gauche de la Durance, située dans les Alpes Françaises méridionales, dans le département des Alpes de Haute Provence (04). D'une longueur d'environ 80 kilomètres, elle prend sa source dans le massif du mont Viso (Alpes piémontaises), près du col du Longet (2646m), à proximité de la frontière italienne. Elle s'écoule selon un axe NE / SO. et est surplombée par différents sommets dépassant les 3000m, comme les aiguilles du Chambeyron (3411m) ou encore la Font Sancte (3387m).

Figure 3: Localisation de la vallée de l'Ubaye

Cette vallée communique avec l'Italie par l'intermédiaire du col de Larche et avec la vallée du Var grâce au col de la Cayolle. Le col de la Bonnette relie Jausiers à la vallée de la Tinée, affluent du Var, dans le massif du Mercantour.

2. Géologie

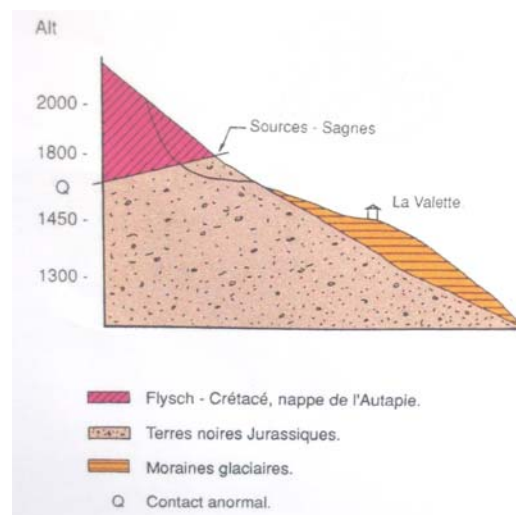
La géologie ubayenne se compose de deux grands types de roche et d'une formation superficielle. Premièrement, le flysch dissocié, qui est une roche sédimentaire rabattue lors de la croissance des Alpes sur les marnes du Jurassique.

Deuxièmement, les terres noires du Jurassique (ou marne noire) qui sont aussi des roches sédimentaires autochtones et qui ont la particularité d'être très sensibles à l'érosion et donc, très favorables au développement d'activité torrentielle.

¹Le choix de ces torrents n'est pas du au hasard. En effet, le service RTM a été démarché par les communes concernées (respectivement Méolans Revel et Larche) afin qu'il leur dresse, à la manière d'un bureau spécialisé, une étude hydraulique.

La formation superficielle est constituée de moraine glaciaire. Cette dernière est très riche en matière argilo limoneuse et est à l'origine des instabilités chroniques des pentes. Ces moraines approvisionnent les torrents en matériaux et peuvent devenir d'immenses glissements de terrains préoccupant pour la population locale comme le glissement de Valette au dessus de la commune de Saint Pons qui représente plus de 8 millions de mètres cubes de matériaux en mouvement.

Figure 4: Coupe géologique de la "fenêtre" de Barcelonnette sur le glissement de la Valette (source: RTM Barcelonnette)



3. Conditions Climatiques

Le climat ubayen peut être qualifié de montagnard à influence méditerranéenne et à tendance continental. L'été est chaud et sec et l'hiver est froid et sec.

Les reliefs font barrière aux vents et aux masses d'air chaud et humide remontant de la mer méditerranée. Les taux annuels pluviométriques sont de l'ordre de 900 mm. Les précipitations sont le plus souvent amenées soit par Lombarde (vent de secteur est touchant particulièrement la Haute Ubaye) soit par le Mistral (vent de secteur nord touchant particulièrement le reste de la vallée). On retrouve des saisons sèches (respectivement saisons humides) en été /hiver (respectivement printemps/automne). L'altitude joue un rôle important sur les précipitations qui sont plus importantes sur les crêtes que dans les fonds de vallée. Les précipitations hivernales tombent sous forme de neige principalement et cela crée des réserves d'eau pour les saisons les plus sèches.

L'orientation est/ouest de la vallée oppose des versants sud très ensoleillés à des ubacs frais et humide à fonte de neige tardive. Par ailleurs, les orages violents d'été, venant d'ouest, sont générateurs de la plupart des déclenchements de crues et glissements de terrain d'ampleur souvent spectaculaire. L'alternance gel/dégel est particulièrement répandue dans cette vallée aux contrastes thermiques saisissant ce qui accélère le processus de déstabilisation des versants.

4. Hydrographie

La vallée de l'Ubaye tire son nom de la rivière du même nom. L'Ubaye prend sa source à la frontière entre la France et l'Italie, au col du Longet, dans le massif du Mont **Viso**. Elle coule d'est en ouest et parcourt la vallée pendant environ 80 km, avant de se jeter dans le lac de **Serre-Ponçon** puis dans la **Durance**. L'Ubaye a pour affluent principal l'Ubayette qui prend sa source dans le lac du **Lauzanier**. La vallée compte de nombreux lacs permanents ou temporaires. Les lacs permanents principaux sont le lac des Sagnes (appelé aussi lac d'Abriès) et le lac de Terre Plaine. À la fonte des neiges ou lors des orages, les torrents, comme celui de Faucon ou des Sanières, prennent vie, provoquant parfois de gros dégâts : la chaussée de la D900 a été fortement endommagée il y a quelques années lors d'un orage par le torrent de Faucon. Avant le **XIX^e siècle**, on comptait plusieurs dizaines de torrents de ce genre, lorsque la vallée était déboisée, ce qui occasionnait chaque été des dégâts importants. Ainsi, au **XVIII^e siècle**, un de ces cours d'eau occasionnels a provoqué un important glissement de terrain en Haute Vallée, au point que l'Ubaye a été bloqué par un barrage naturel, menaçant Jausiers d'un mini tsunami qui heureusement n'a pas eu lieu. Depuis, la vallée a été reboisée, et le risque est devenu moins important même s'il existe encore, surtout sur les affluents.

Les crues des torrents affluents peuvent prendre la forme de laves torrentielles au grand pouvoir destructeur, de charriage avec élévation du niveau du lit et débordement désastreux ou encore conjuguer, selon les crues, les deux types de phénomènes.

Mémento : Contexte général de l'étude

- Etude destinée à être utilisée comme modèle pratique et méthodologique par le service RTM pour l'édification de futures études hydrauliques.
- Etude hydraulique type réalisée à travers celle de l'Abéous, commandée par la commune de Méolans Revel. Le RTM joue le rôle de bureau d'étude.
- Le contexte géologique de la vallée de l'Ubaye, marnes friables, flyschs désagrégés et moraines glacières, allié à des conditions climatiques plutôt méditerranéennes (orages violents, forte variation des températures), fait que les torrents se manifestent souvent de manières brutales : éboulements, glissements de terrains... En ce qui concerne les nombreux torrents de la vallée, et ce pour des épisodes rares, cette violence s'exerce souvent par la formation de laves torrentielles.

Tableau 1 : Mémento « Contexte général de l'étude »

II. Prise en main et évolution de données et d'outils utilisés en hydraulique torrentielle.

La réalisation d'une étude hydraulique nécessite la prise en main préalable de données, d'outils de calcul et de modélisation permettant d'approfondir chaque étape la constituant.

A. Données et outils hydrologiques

L'évaluation de ces paramètres est le point déterminant et fondamental d'une étude hydrologique d'un torrent. Le choix judicieux des paramètres pluviométriques les plus représentatifs du contexte local sert de base à la manipulation et à l'application des formules hydrologiques transformant les pluies en débits. La maîtrise de ces dernières et la mise en place d'outils aisément manipulables et adaptés à l'univers torrentiel constituent, enfin, deux composantes essentielles dans le choix des débits de crue.

1. Quels sont les moyens de mesure ?

Les données que l'on est amené à chercher pour mener à bien une étude hydrologique sont les valeurs de pluie et de débit.

En ce qui concerne les pluies, selon que le poste soit doté d'un pluviomètre ou d'un pluviographe enregistreur, on pourra disposer soit de pluies journalières, soit d'enregistrements sur des durées plus courtes (1h, 2h, 4h...). De manière générale, les pluviographes sont moins nombreux que les pluviomètres, et le département des Alpes de Haute Provence ne déroge pas à la règle. Les données de ces pluviographes ne sont en général pas dépouillées pour les durées inférieures à la journée et exigent un gros travail préalable à leur utilisation. Il est clair que dans le cas des torrents, ce sont les pluies de durée inférieure à la journée qui nous intéressent car ce sont elles qui génèrent les crues. Toutefois, les pluies journalières décennale et centennale seront nécessaires pour utiliser certaines méthodes de prédétermination des débits de crue. Nous les emploierons, non comme les pluies qui provoquent la crue, mais plutôt comme un indice pluviométrique local.

Pour les débits liquides, les stations de mesure sont rares sur les petits bassins versants de montagne. Il faut rappeler qu'une station de jaugeage mesure des hauteurs et que la détermination des débits passe par la connaissance de la relation entre hauteur et débit, appelée tarage. Lorsque les données sont publiées, on dispose soit des seuls débits moyens journaliers, soit également, de certains maxima instantanés. Ce sont ces derniers maxima qui correspondent aux débits de pointe recherchés.

2. Synthèse locale pluviométrique et hydrométrique

Au niveau pluviométrique, aucun bilan des stations de mesure n'avait été effectué avant mon arrivée. Les recherches des postes pluviométriques et pluviographiques, destinés à mesurer la quantité de **pluie** tombée pendant un intervalle de temps donné (journalière pour le premier et de durée < 24 heures pour le second) constituent donc un point essentiel.

De l'analyse de documents météorologiques (Djeboua, 2001 ; Boiret, 1982), il ressort les résultats suivant :

- 38 postes pluviométriques et 14 pluviographes sont recensés dans le département des Alpes de Haute Provence.
- Seulement 5 pluviomètres et 2 pluviographes existent dans la vallée de l'Ubaye.

L'analyse hydrométrique menée à partir de la Banque HYDRO de Météo France (Internet [6], 2006), nous permet de soulever les résultats généraux suivants:

- 32 postes hydrométriques, gérés principalement par la DIREN de la région PACA et par EDF, sont recensés dans le département des Alpes de Haute Provence.
- 5 postes concernent la vallée de l'Ubaye.

Remarques :

Les valeurs pluviométriques et hydrométriques de chaque station, associées aux durées d'exploitation de ces dernières, sont développées en annexe 1.

D'autre part, les résultats précédents prennent en compte les stations existantes, ou ayant existées, parfois même pendant une durée très courte.

Enfin, les stations possédant une véritable valeur hydrologique, et donc exploitables afin de déterminer des débits de crue de période de retour de l'ordre de 100 ans, sont celles qui présentent une chronique de mesures exploitables suffisamment élevée. La limite généralement admise est de 15 à 20 ans. C'est cette dernière valeur que nous retiendrons par la suite.

3. Choix des postes représentatifs de la vallée de l'Ubaye

Des valeurs et remarques précédentes, le choix des postes potentiellement utilisables se restreint de manière considérable.

Au niveau des postes de mesure de débits, ceux de Barcelonnette, situé au cœur de la vallée, et du Lauzet-Ubaye, situé en basse vallée, respectent ces conditions. D'autre part, tous les postes pluviométriques et pluviographiques de la vallée de l'Ubaye répondent à ces restrictions et ils sont donc aussi retenus. Certains de ces postes présentent, cependant, des conditions climatologiques bien spécifiques et non représentatives des bassins versants torrentiels étudiés dans la vallée de l'Ubaye.

De ce fait, certaines stations demandent un recul tout particulier et ne sont pas aisément utilisables. Nous pouvons citer :

- La station de La Condamine Châtelard, qui possède une pluviométrie anormalement faible pour la haute vallée de l'Ubaye. Son utilisation est donc fortement déconseillée.
- Le poste d'Uvernet Fours indique une pluviométrie très élevée. C'est la conséquence de son positionnement géographique. En effet, il est placé dans une vallée très élevée et très encaissée qui canalise et accumule les perturbations. Elle est donc réservée à une comparaison avec un bassin versant d'exposition et d'altitude similaire.

D'autre part, comme nous l'avons vu dans le contexte général de l'étude, les conditions météorologiques extrêmes varient selon la position géographique du bassin au sein même de la vallée de l'Ubaye. La haute vallée de l'Ubaye est exposée au phénomène de Lombarde, tandis que le reste de la vallée subit plutôt des perturbations extrêmes venant d'ouest. Ainsi, selon la nature des perturbations rencontrées, et au vu du nombre très restreint des postes de la vallée, il paraît plus judicieux de comparer la pluviométrie du bassin versant avec d'autres postes de départements voisins à caractère météorologique relativement similaire et choisis selon les critères cités précédemment. Les listes finales des postes pluviométriques et pluviographiques, prenant en compte la localisation du bassin versant au sein même de la vallée de l'Ubaye, sont détaillées en annexe 2.

4. Présentation des outils de calcul

Le service RTM des Alpes de Haute Provence possédait déjà, avant mon arrivé, un outil de calcul hydrologique, réalisé par F.GRUFFAZ en décembre 1998, et se nommant « DEBITS.xls ». Comme son nom l'indique, il s'agit d'un logiciel Excel qui permet de calculer les débits liquides et solides en rentrant un minimum de paramètres pluviométriques et donc assez aisée d'utilisation.

Les quatre premières feuilles de calcul présentent des formules nécessaires à l'estimation : du profil en long du torrent, du temps de concentration et des durées caractéristiques de crue, du débit de pointe décennal et enfin du débit de pointe centennal.

Cependant, l'inadéquation de certaines formules au contexte torrentiel (comme les formules de Laget et de Caquot par exemple¹), l'évolution récente des connaissances dans ce domaine et enfin, les difficultés à rechercher et à évaluer les nombreux paramètres nécessaires au calcul des débits de crue, sont autant de facteurs qui m'ont poussés à créer, sur le plan hydrologique uniquement, un nouveau logiciel Excel de calcul nommé « CALCUL HYDROLOGIQUE ».

5. Description sommaire de l'outil « CALCUL HYDROLOGIQUE »

Il est dressé aussi selon 4 feuilles de calcul Excel. Elles permettent de calculer préalablement les temps de concentration et le profil en long général du torrent afin d'évaluer, au final, les débits de crue décennaux et centennaux.

C'est un outil aisément manipulable par les techniciens et ingénieurs du service RTM, c'est-à-dire, le plus souvent, par des non-spécialistes.

En effet, sa prise en main est facilitée par l'utilisation d'un jeu de couleur permettant de savoir quelles sont les cases à remplir (bleues), celles calculées automatiquement (vertes) et celles à retenir utilisables dans les autres pages (orange). La figure suivante donne un aperçu de la mise en forme du logiciel via l'utilisation de la feuille de calcul destinée à évaluer le débit centennal.

The screenshot shows the following components:

- DEBIT LIQUIDE CENTENNAL** (Title)
- Commune :** (Input field)
- Torrent :** (Input field)
- Altitude point de Calcul des Débits (m)** (Input field)
- Grandeurs** table:

Grandeurs	S	t _c	b	G _{qhc(T>10)}	r
	(km ²)	(h)		(m ³ /s)	
- Bassin de référence** and **Bassin d'étude** tables:

Grandeurs à entrer	Bassin de référence				Bassin d'étude		
	S (km ²)	Q (10) (m ³ /s)	Q(2) (m ³ /s)	Gq(T<10)m ³ /s	P10/24(mm)	Q ₂ m ³ /s	Gq(T<10)m ³ /s
ubaye Barcelo	549.00	162.00	75	46.18	66.00		
- GRADEX brutal** and **GRADEX Progressif** tables:

GRADEX brutal	Q ₁₀ (m ³ /s)	Q ₁₀₀ (m ³ /s)	k _{100/10}	GRADEX Progressif	Q ₁₀ (m ³ /s)	Q ₁₀₀ (m ³ /s)	k _{100/10}
- RATIONNELLE** table:

RATIONNELLE	C ₁₀₀	P _{100hc} (mm)	Q ₁₀₀ (m ³ /s)	k _{100/10}
	0.55			
- Méthode Sommaire** table:

Méthode Sommaire	Q ₁₀₀ (m ³ /s)
	0
- S.C.S.** table:

S.C.S.	D _r (h)	D _{3oc/3} (h)	D _{scs} (h)	P _{100/DSCS} (mm)	J _{scs} (mm)	Ca	r.Ca
		#VALEUR!	#VALEUR!	#VALEUR!		#VALEUR!	#VALEUR!
- S.C.S.** table:

S.C.S.	Q _{100 moy} (m ³ /s)	Q ₁₀₀ (m ³ /s)	k _{100/10}
	#VALEUR!	#VALEUR!	#VALEUR!
- débit de pointe centennal retenu (en m³/s)** (Output field)

Figure 5: Description de l'outil « Calcul Hydrologique »

¹La formule de Caquot ($Q = 1,43 I^{0,29} C^{1,20} A^{0,78}$) est très utilisée en hydraulique urbaine de part ses conditions d'utilisation très restrictive. En effet, elle est utilisable à condition que la pente I soit comprise entre 0,2 % et 5 %, que le ruissellement C soit supérieur à 20 %, que la surface A ne dépasse pas 200 hectares et que le site étudié ne soit pas trop allongé.

Les formules impliquées sont très dépendantes des conditions d'utilisation et elles ont été choisies après avoir effectué des tests sur plusieurs torrents différents. Concrètement, celles donnant des ordres de grandeur vraiment trop aberrants dans le logiciel « Débits.xls » ont été supprimées. D'autres formules ayant fait leurs preuves en hydraulique torrentielle, et utilisées dans le seul véritable bureau d'étude spécialisé français (ETRM), ont été insérées au nouveau logiciel en complément des précédentes. La méthode du « gradex progressif », utilisée pour l'estimation du débit centennal, est un exemple de formule tout à fait nouvelle et vraiment manquante, de part la qualité de ses résultats, à l'ancien logiciel. Une description plus détaillée de la prise en main de ce logiciel, des formules utilisées et de leurs limites est présentée en *annexe 3*. L'application de cet outil, fournit en *annexe 13*, et la description de la méthodologie, pour choisir judicieusement certaines méthodes plus adaptées à d'autres, se réalisent à travers l'étude hydraulique de l'Abéous présentée ci après en *III*.

B. Données et outils de transport solide

L'estimation des débits liquides est suivie, dans une étude hydraulique type, par l'estimation des volumes solides transitant dans le chenal. Ces derniers peuvent être le résultat de deux phénomènes : le charriage et la lave torrentielle (la description de ces deux phénomènes intervient au *III*). A partir de ces résultats, l'application d'outils modélisant ces deux phénomènes nous permet d'obtenir les hauteurs d'écoulement dans le chenal de transit et de déterminer les conditions d'écoulements en temps de crue.

1. Estimation des volumes solides

a) Cas du charriage torrentiel

Les volumes transportés par charriage peuvent être déterminés via l'utilisation de la formule de Lefort détaillée dans la suite de l'étude (cf *III/D/8*). Cette formule fait partie des multiples formules utilisables en transport solide mais se démarque par une facilité d'utilisation et une précision bien supérieures aux autres. Elle est utilisée par l'ensemble des bureaux d'études spécialisés en hydraulique torrentielle et évalue, de manière simple, le débit solide à partir du débit liquide. Le logiciel Excel «CHARRIAGE» réalisé par C.Péteuil, hydraulicien du service RTM, est destiné à effectuer un tel calcul. Il est d'utilisation très aisée dès lors que le relevé granulométrique du torrent d'étude est réalisé et que l'on ait défini un hydrogramme de crue. Un exemple de son utilisation est apporté en *annexe 5* sur le torrent de l'Abéous. La construction de l'hydrogramme de crue est détaillée au *III* de cette étude.

b) Cas du volume des laves torrentielles

De nombreuses méthodes permettent de déterminer le volume des laves torrentielles. Les plus courantes sont les suivantes : ajustement d'une loi statistique à un échantillon de volumes de laves, utilisation d'une approche géomorphologique et enfin, par application de méthodes globales sommaires.

La première méthode nécessite une accumulation de mesures effectuées immédiatement après le passage d'une lave torrentielle. Elle n'est donc pas utilisable sur beaucoup de torrent car la plupart de ces derniers ne possèdent pas de suivi aussi précis.

La deuxième se base sur une étude géomorphologique du bassin versant et consiste à délimiter les zones d'érosion potentielle puis à appliquer des coefficients d'apport (m^3/ml) selon le type de phénomène. Cette méthode est utilisée et détaillée en *III/D/6*.

Enfin, les méthodes globales sommaires relient le volume de la lave à des paramètres rendant compte des facteurs permanents - les caractéristiques morphologiques du bassin versant ou du cône de déjection, la couverture végétale, etc - de la genèse des laves torrentielles. A la manière des formules d'hydrologie, de nombreuses formules ont été édifiées empiriquement dans des conditions bien spécifiques et propres au torrent d'étude.

Le service RTM ne possédant pas d'outils correspondant à l'évaluation des volumes de lave par les méthodes sommaires, j'ai élaboré une feuille de calcul Excel résumant l'ensemble des procédés les plus utilisés et calculant automatiquement les volumes à partir de quelques données d'entrer. Le choix de ces formules a été dicté, en grande partie, par un document de synthèse de calcul des volumes de lave (Brochot, 2002).

La figure suivante présente cet outil de calcul des volumes de lave par les méthodes sommaires :

Altitude maximale du BV (km)	
Altitude à l'exutoire (km)	
Dénivelé spécifique (%)	
Distance Formation de lave/exutoire (km)	
Pente moyenne (%)	
Pente du cône de déjection (%)	
Surface non végétalisée (%)	
Surface du Bassin Versant (km ²)	
Indice géologique D'Agostino	
Indice torrentialité D'Agostino	
Indice Robert Marie	
Indice Kronfellner-Krauss	

Formule	volume de lave (m ³)
D'Agostino	
D'Agostino simplifiée	
Zeller min	
Zeller max	
Rickenmann	
Bianco	
Kronfellner-Krauss	

Données morphologiques du torrent.
 Elles peuvent être déterminées à partir de la feuille « Bassin » de l'outil « Calcul Hydrologique ».

Paramètres géologique et phénoménologique. Estimés à partir de tableaux donnés en annexe 6.

Résultats calculés automatiquement à partir des données ci-dessus.
 Formules explicitées en annexe 6.

Figure 6: Description de l'outil de « calcul des volumes de laves » sous Excel

Critique de la méthode :

Ces méthodes ne peuvent donner qu'une estimation approximative des volumes des laves torrentielles. En effet, les paramètres utilisés sont issus d'une approche géographique à petite échelle ne rendant pas compte de la complexité de la genèse des laves torrentielles. D'autre part, les données ne sont pas obtenues à partir d'expérimentations mais au mieux, issues d'estimations immédiatement après un évènement, au pire collecté dans les archives anciennes. Elles comportent beaucoup d'incertitudes et une bonne part d'interprétation. Enfin, il s'agit d'évènements extrêmes, voire catastrophiques, mais la fréquence du volume estimé n'est en général pas évoquée.

L'estimation des volumes finaux ne peut donc être que le résultat croisé d'une comparaison avec l'ensemble de ces différentes formules mais aussi avec des méthodes plus spécifiques au terrain d'étude (notamment l'approche géomorphologique).

2. Estimation des conditions d'écoulement

L'estimation des volumes engendrés par les différents phénomènes ne nous permet pas d'effectuer une cartographie des zones susceptibles de déborder. Cette dernière s'effectue à l'aide de deux logiciels de modélisation, utilisés par C.Péteuil du fait de leurs résultats très pertinents, selon le type de phénomène que l'on veut simuler.

a) Cas du charriage torrentiel

EFLvs4, pour Evolution du Fond du Lit version 4, est un outil numérique développé en 1993 par P.COUSSOT, membre du CEMAGREF, qui a été mis à la disposition du service RTM. Il est réalisé en Visual Basic sous Excel et est destiné à calculer l'évolution du transport et des dépôts de matériaux pendant la crue. Plus précisément, il permet de calculer la hauteur d'évolution du fond à n'importe quel moment de la crue et ce, à n'importe quel endroit du profil en long. L'évaluation de la hauteur d'eau additionnée de la hauteur du fond comparée à la hauteur des berges permet de prévoir de possibles débordements. Il est développé plus en détails, à travers son utilisation et ses limites, sur le torrent de l'Abéous en annexe 7 et plus spécifiquement au *III/E/1*.

b) Cas des laves torrentielles

Le logiciel Excel de calcul « Lavfoprtm », réalisé par Philippe FREY, permet de simuler les conditions d'écoulement en cas de formation de laves torrentielles. Son objectif est de calculer la vitesse et le débit connaissant la hauteur dans une section trapézoïdale de fruit unité ou de section rectangulaire de fruit nul. A l'inverse, il permet de calculer la hauteur et la vitesse connaissant le débit. Enfin, il édifie une comparaison entre les hauteurs de berges et les hauteurs de laves sous forme graphique. Là encore, une description et un exemple de son utilisation se réalise par son application sur le torrent de l'Abéous présentée en annexe 8 et 9.

Bien que non testé durant cette étude, un autre logiciel de calcul concernant le phénomène de lave torrentielle est utilisable. Il s'agit du logiciel LAVE 2D du Cemagref (Laigle1997, Laigle et *al.*2003). Les équations sont les mêmes que sur le logiciel précédent mais édifiées de manière bidimensionnelle. Elles sont résolues en tenant compte de la topographie du terrain par l'intermédiaire d'un Modèle Numérique de Terrain ce qui permet de visualiser, en plus de la hauteur de débordement, l'étendue et le parcours de la lave.

Mémento : Données et Outils utilisables en hydraulique torrentielle

- L'analyse hydrologique d'un bassin versant torrentiel en vallée de l'Ubaye, de part sa spécificité locale, doit se jouer d'un manque d'informations pluviométrique et hydrométrique.
- La prise en compte des conditions météorologiques du bassin d'étude est essentielle dans le choix de postes météorologiques de référence. Pour la vallée de l'Ubaye, les postes utilisables sont scindés en deux parties : ceux présentant, pour les précipitations extrêmes, le phénomène de retour d'est (Haute Ubaye) et ceux présentant des perturbations extrêmes venant d'ouest.
- A partir du choix des conditions pluviométriques propres au contexte local, l'estimation des débits liquides de crue peut s'effectuer à l'aide de l'outil « CALCUL HYDROLOGIQUE » prenant en compte les dernières évolutions du domaine torrentiel.
- L'estimation des volumes solides et les outils de modélisation sont bien différents selon le mode de transport du torrent :

Transport solide par Charriage

Volumes solides : intégration d'un hydrogramme de crue. Utilisation de « Debits.xls » ou « Charriage » de C. Péteuil.

Modélisation conditions d'écoulement :

EFL vs 4

Transport solide par Laves Torrentielles

Volumes solides : nombreuses méthodes utilisables. Outil Excel « calcul des volumes de lave » pour les formules sommaires. Autres méthodes détaillées par la suite (*III*)

Modélisation conditions d'écoulement : « Lavfoprtm »

- Grande prudence à adopter dans l'utilisation des différents outils. Une analyse fine du terrain est indispensable en complément.

Tableau 2 : Mémento « Données et Outils utilisables en hydraulique torrentielle »

III. Conception d'une étude hydraulique type : le torrent de l'Abéous

A. Pourquoi ce choix ?

L'objectif final de mon stage est de réaliser deux études hydrauliques sur deux torrents distincts de la vallée de l'Ubaye (l'Abéous et Rouchouse) afin qu'elles servent de modèle méthodologique en vue d'une réutilisation future par le service RTM. Le choix du torrent de l'Abéous n'est pas dû au hasard, bien au contraire. L'Abéous possède, en effet, toutes les caractéristiques requises à la réalisation d'un canevas hydraulique type :

- Son étude hydrologique n'est guère différente de celle du torrent de Rouchouse. En effet, la méthodologie adoptée est de l'ordre du classique dans l'univers torrentiel. La sélection de postes pluviométriques de référence (présentée précédemment) constitue une des seules étapes propres au bassin versant d'étude.
- Les apports solides de l'Abéous sont l'effet d'une déstabilisation entière de son bassin versant et non d'une partie limitée de son cône de déjection comme c'est le cas sur le torrent de Rouchouse. Les problèmes à résoudre, concernant les apports massifs en matériaux, y sont donc plus complexes.
- L'Abéous présente les deux types de phénomènes que l'on peut rencontrer dans une étude de bassin versant torrentiel. En effet, bien que la plupart des crues majeures prennent la forme de laves torrentielles, le phénomène de charriage peut aussi être très violent comme nous le montre la crue de 1993 (Cf. ci après III/B/2). Une méthodologie bien plus détaillée et l'utilisation d'outils très différents prennent nécessairement place dans son étude hydraulique. Le torrent de Rouchouse ne présente, pour sa part, que le phénomène de fort charriage sans évolution probable en lave torrentielle. Le temps consacré à ce dernier est, de ce fait, bien moins important que pour l'Abéous.
- Le corollaire de la complexité du fonctionnement du bassin versant de l'Abéous est donc que les aménagements à proposer sont bien plus nombreux et diversifiés que sur le torrent de Rouchouse.

B. Objet de l'étude hydraulique

1. *Objectif*

Le torrent de l'Abéous draine un bassin versant de 14,2 km² au nord de la commune de Méolans Revel (carte de positionnement du bassin en annexe 10 et délimitation du bassin en annexe 11). Il prend sa source au pied de La Montagnette, à 2811 m d'altitude, et son versant comporte des terrains instables engendrant d'importants apports en matériaux dans le torrent.

L'Abéous conflue avec l'Ubaye au bout de 6350 mètres (point le plus éloigné) après avoir traversé un bassin versant presque non urbanisé et être passé sous le pont de la route départementale 900, véritable verrou de la vallée de l'Ubaye. La lave importante de 2003 mais aussi, plus récemment, celle de 2005, bien qu'engendrant des dégâts relatifs, traduisent une activité continue et très intense du torrent.

Cette étude est nécessaire afin de:

- Comprendre le fonctionnement général du torrent de l'Abéous.
- Préciser les principaux enjeux et aléas dans la partie terminale du torrent jusqu'à l'Ubaye.

- Proposer des aménagements hydrauliques permettant une réduction des risques. Ceci passe par une compréhension totale du fonctionnement de l'Abéous sur l'ensemble de son profil en long mais aussi dans sa zone de confluence avec l'Ubaye.
- De dresser un canevas pratique de l'édification d'une étude hydraulique type utilisable par le service RTM

L'Abéous, à défaut de la plupart des torrents dangereux de la vallée de l'Ubaye, n'a été corrigé que tardivement, et bien que la correction soit amorcée depuis 1988 par le service RTM, suite à l'acquisition de la partie haute du bassin par l'Etat, elle ne permet pas de stopper la progression des laves torrentielles dans la partie aval du bassin.

2. *Crués historiques*

La base de donnée RTM permet de dresser le tableau suivant :

23-08-1984 : crue subite, lave torrentielle importante, blocs charriés atteignant 5 m ³ <u>conséquences</u> : débordement sur le chemin qui va de la Fresquière aux Troncs menaçant des habitations
20-08-1988 : lave torrentielle et eaux boueuses <u>conséquences</u> : barrage de l'Ubaye par la boue et les galets sur les 3/4 de sa largeur, élévation du niveau de l'Ubaye sous le pont de Méolans
14-08-1990 : coulée de boue, obstruction partielle du lit de l'Ubaye <u>conséquences</u> : débordement sur chemin d'accès au passage à gué, début d'affouillement, barrage n°2 endommagé
21-07-1992 : lave torrentielle importante <u>conséquences</u> : parafouilles des enrochements du B1 et du B2 et du radier communal détruits
10/07/1993 : des charriages importants se produisent sans qu'il n'y ait de laves torrentielles
27-07-2003 : lave torrentielle ; volume de lave estimé ≈ 30 000 m ³ <u>conséquences</u> : Engravement sur 250 m à l'amont du pont CD 900, engravement aval et obstruction du lit de l'Ubaye, formation d'un plan d'eau sur 300 m à l'amont du pont CD 27
19-06-2005 : crue torrentielle <u>conséquences</u> : barrage B1 détruit en domanial. Passerelle de l'Abéous endommagée

Tableau 3: Etude historique des crués de l'Abéous

La surveillance de ce bassin versant a été très tardive. Cependant cet historique nous conduit aux remarques suivantes :

- Les crués notables prennent lieu sous forme de laves torrentielles très violentes mais aussi, de manière plus rare, sous forme de fort charriage.
- Les crués interviennent préférentiellement durant l'été après des orages violents. Le mois d'août est le plus favorable à la formation de laves torrentielles.
- Lors de telles crués, l'Ubaye est fortement perturbé par l'arrivée en masse du volume solide de l'Abéous.

D'autre part, nous pouvons soulever le fait que l'Abéous ait connu 6 crués en 21 ans et qu'aucune crue n'ait été répertoriée avant. Le témoignage de monsieur Tron, maire de Méolans, nous permet de confirmer que l'Abéous n'ait connu aucune crue majeure entre les années 1950 et 1984.

Cependant, l'activité torrentielle apparaît significative depuis longtemps car ce torrent figure dans le périmètre initial de Restauration des Terrains en Montagne, institué par la loi du 4 avril 1882.

3. Historique morphologique du torrent

Le torrent de l'Abéous est très actif de nos jours comme nous le montre le tableau précédent. Mais l'a-t-il toujours été ? La société a nettement évolué au fil des siècles et les conséquences ont été nettement visibles sur l'ensemble du bassin versant.

En comparant des photos prises par le RTM, en 1894 et 1896 (Flez, 2000), il apparaît que le paysage était nettement moins végétalisé qu'actuellement. Les versants dénudés, en raison d'un pacage intensif, étaient fort propices au ruissellement et donc soumis à l'érosion. Les pratiques traditionnelles agricoles ont évolué au cours du 20ème siècle et ce n'est qu'en 1988 que les premières corrections torrentielles ont débutées.

Si l'on confronte les photos aériennes disponibles (clichés des campagnes de 1948, 1973 et 1995), depuis 1948 (date du cliché le plus ancien disponible), la bande active du torrent s'est considérablement réduite dans sa partie inférieure, c'est-à-dire aujourd'hui au niveau du début de la plage de dépôt du barrage n°3 (Cf. *annexe 12*). En 1948, le lit s'étale sur une largeur qui peut dépasser 75 mètres au niveau du hameau des Trons et 65 mètres au niveau de la ferme des Combes contre une dizaine de mètres aujourd'hui (Cf. carte de localisation du cône de déjection en *annexe 16*). Cette réduction de la bande active du torrent de l'Abéous semble être le fruit :

- De l'abandon progressif du surpâturage qui a provoqué une colonisation et une fixation du lit majeur puis une incision progressive du lit, accélérée, probablement, par son aménagement en partie amont dans les années 90.
- De l'abaissement du niveau de la rivière principale de la vallée, l'Ubaye, en réaction aux reboisements artificiels dans la vallée (Piégay & Salvador, 1997).

Suite à la construction des deux gros barrages B2 et B3 en 1988 et 1990, une partie des alluvions se dépose à leur amont, conformément à leur objectif. Cependant, l'eau devenue plus claire reprend son énergie disponible et incise, à l'aval, dans le lit tapissé d'alluvions torrentielles. L'incision peut atteindre à certains endroits 5 mètres (C.Flez, 2000). Ses aspects négatifs sont les suivants : l'augmentation de l'érosion, de la vitesse d'écoulement, et donc de l'occurrence, des éventuelles laves torrentielles et de ce fait l'augmentation du risque d'obstruction de l'Ubaye. Les aspects positifs de l'incision sont d'entraîner la fixation du torrent dans un chenal unique avec reconquête de la végétation mais aussi, de diminuer les risques de débordements.

Mémento : Historique du torrent	
<i>Méthodologie</i>	<i>Correspondance sur l'Abéous</i>
<ul style="list-style-type: none"> • L'analyse historique du torrent permet : De se rendre compte de son activité et de son évolution. De comprendre quel est le type de phénomène rencontré dans le torrent en période de crue. L'analyse des principaux enjeux & aléas déjà touchés par la crue. • Si possible, la consultation de photos aériennes permet d'estimer les modifications morphologiques du lit et de comprendre plus aisément le fonctionnement du torrent. 	<ul style="list-style-type: none"> • 7 crues en 21 ans, activité très marquée et récente. • En cas de crue importante, la formation d'une lave torrentielle semble irrévocable. Des crues de charriage simple existent aussi mais sont beaucoup plus rares. • L'Ubaye est souvent touchée. De même, mais de manière légère, pour le pont de la CD 900. • Rétrécissement marqué du lit depuis 1954, érosion et transit des laves accrus au fil des ans.

Tableau 4 : Mémento « Historique du torrent »

C. Etude Hydrologique

1. *Utilité*

A travers cette étude, on cherche à connaître les débits de crues de l'Abéous et notamment, les caractéristiques de crue de projet prises en compte pour les analyses des risques et d'aménagements de protection. Pour cela, il faut préalablement:

- Etudier la pluviométrie locale et le régime des précipitations journalières et à faible pas de temps.
- Choisir les paramètres hydrologiques représentatifs du bassin versant puis calculer les débits de pointe correspondant.
- Comparer les résultats avec des bassins versants voisins.
- Evaluer les débits caractéristiques de crue.

2. *Pluviométrie du Bassin Versant de l'Abéous*

a) **Pluviométrie journalière**

Afin de pouvoir utiliser les mesures pluviométriques d'un poste de référence, il faut que ce dernier possède suffisamment d'années de mesures. La limite communément admise se situe entre 15 et 20 ans et c'est cette dernière valeur qui est retenue dans la suite de cette étude afin de s'assurer une marge concernant la légitimité des valeurs.

Le poste pluviométrique le plus proche du bassin versant de l'Abéous se situe sur la commune du Lauzet-Ubaye à 930 mètres d'altitude. Cependant, il ne présente que 15 années de mesures et il ne sera donc pas exploité. En outre, d'autres postes (pluviographes et pluviomètres) sont présents aux alentours du bassin versant de l'Abéous. Ces derniers sont gérés pour la plupart par Météo France et EDF et l'on considère que sur chacun, la loi de Gumbel est applicable aux précipitations de chaque durée. La relation est explicitée ci après :

$$P_T = P_{T_o} + g \times \left[-\ln\left(-\ln\left\{\frac{T-1}{T}\right\}\right) + \ln\left(-\ln\left\{\frac{T_o-1}{T_o}\right\}\right) \right] \text{ Avec } \begin{array}{l} \text{PT : Pluie de période de retour T} \\ \text{PTo : Pluie de période de retour To} \\ \text{G : Gradex de la pluie (mm)} \end{array}$$

Ne possédant pas, naturellement, de mesure de précipitation sur le bassin versant d'étude, des postes de référence ont du être choisis. Ils sont tous localisés à proximité du bassin d'étude et s'étalent sur les départements des Alpes de Haute Provence (04), des Hautes Alpes (05) et des Alpes Maritimes (06). Leur choix a été dicté par la nature des phénomènes météorologiques qui y prennent place. La majeure partie des perturbations, et notamment celles engendrant des crues notables, au niveau de ces postes, proviennent d'ouest. D'autre part, ils sont localisés à des altitudes différentes afin de se rendre compte de l'effet de l'altitude sur la pluviométrie. Les caractéristiques de ces postes sont détaillées en annexe 2.

Remarque :

Nous pouvons noter, au niveau du poste du Lauzet - positionné à 930m d'altitude et constituant intrinsèquement le poste le plus proche de l'Abéous - et ce, pour une période de retour décennale, c'est-à-dire assez faible pour être indicative, que la pluie journalière avoisine les 70 mm. Le schéma suivant indique, pour chacun des postes précédents, la pluie journalière décennale, la pluie centennale et le gradex correspondant :

Du graphique suivant, les remarques suivantes apparaissent :

- L'altitude du poste n'est pas en soit l'unique facteur explicatif de la pluviométrie. Par exemple, les postes de St Paul sur Ubaye et de Barcelonnette, situés respectivement à

1903 et 1135 mètres d'altitude présentent une pluviométrie décennale sensiblement équivalente.

- L'effet du relief est très net pour les fortes précipitations. En effet, ceci est très visible sur les sites d'Entraunes et d'Uvernet qui sont très encaissés contrairement à celui de Barcelonnette.
- Un net gradient Ouest/Est est présent sur l'ensemble de ces postes. Les postes situés les plus à l'ouest – comme Beaujeu et Les Orres le Melezet – et donc sur des zones à reliefs plus modérés, possèdent une pluviométrie plus faible que ceux de l'est – comme Uvernet et Entraunes.

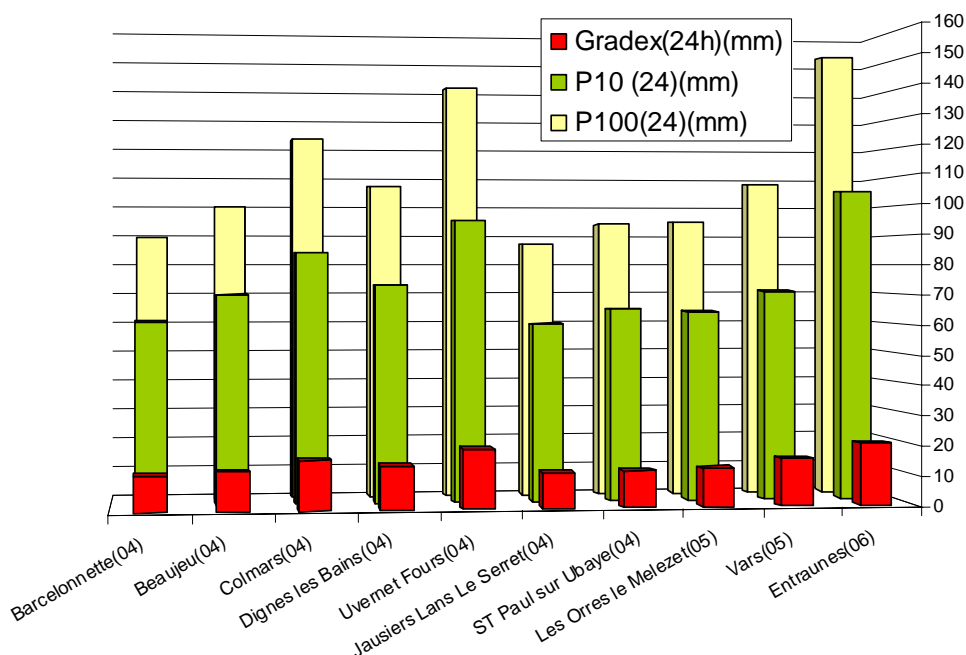


Figure 7 : Répartition des précipitations à proximité du torrent de l'Abéous

Extrapolation sur le secteur d'étude :

Le bassin versant de l'Abéous est positionné en basse vallée de l'Ubaye, c'est-à-dire profondément ancré à l'ouest. Les précipitations centennales y sont donc moins redoutables qu'en Haute Vallée de l'Ubaye (influencée plutôt par les phénomènes de Lombarde selon un axe Nord/Sud) avec moins de fluctuations (se traduisant par un gradex faible). La position moyennement encaissée, l'altitude du bassin très élevée (massif allant jusqu'à 2800 mètres) et la pluie décennale conséquente, sur le poste du Lauzet, comparée à d'autres postes à altitudes plus importantes, sont autant de facteurs qui suggèrent des précipitations assez fortes.

Les estimations finalement retenues pour le bassin versant de l'Abéous sont les suivantes :

Pluie décennale : 85mm Pluie centennale : 120 mm Gradex : 14,9 mm

b) Pluviométrie de durée inférieure à 24 heures

Le bassin versant est relativement peu étendu. Ainsi, les pluies qui génèrent les crues de plus fortes intensités, et provenant elles mêmes de phénomènes orageux, ont une durée critique de l'ordre de l'heure. Il est donc nécessaire de connaître les précipitations de faible durée.

Quatre postes pluviographiques sont situés non loin du bassin versant de l'Abéous. Les villages hôtes sont les suivants : Arvieux, Embrun, La Condamine et St Véran.

Cependant, le poste pluviographique le plus proche est celui d'Embrun (05). Il est géré par Météo France depuis 1971 et présente une chronique de 30 années de mesure.

Les données, acquises auprès de Météo France, ont fait l'objet d'ajustements statistiques afin de déterminer les quantiles théoriques, c'est-à-dire les hauteurs de précipitations associées aux durées de 1 heure à 12 heures et ce pour les périodes de retour 10 et 100 ans. Les valeurs issues de la méthode du renouvellement (SIEE, 2001) sont les suivantes :

Précipitations à pas de temps faible à Embrun (mm)		
Durée des précipitations (h)	Fréquence décennale	Fréquence centennale
1	25.2	38.4
2	27.7	39
3	31.2	42.7
6	38.3	50.5
12	50.2	66.1

Tableau 5 : Caractéristiques des précipitations à faible pas de temps à Embrun
Extrapolation sur le secteur d'étude :

Afin de tenir compte du contexte pluviométrique propre au secteur d'étude, un calage des données observées à Embrun est nécessaire.

Ainsi, les hauteurs précipitées sur la zone d'étude sont extrapolées à partir des observations d'Embrun en faisant l'hypothèse, classiquement admise, que les hauteurs précipitées sur les deux sites se déduisent par une affinité dont le rapport est indépendant de la durée de l'épisode. Autrement dit, pour une période de retour donnée, le rapport K calculé entre la pluviométrie sur 24 heures sur le secteur d'étude (valeurs pondérées associées au bassin versant) et la pluviométrie observée sur 24 heures à Embrun reste valable pour les durées de pluies inférieures. Les valeurs de K, calculées pour les périodes de retour 10 ans et 100 ans sont les suivantes:

$$K = \frac{P_{(T).Abeous}}{P_{(T).Embrun}}$$

K fréquence décennale	1.43
K fréquence centennale	1.49

Les hauteurs de pluie précipitées sur le bassin versant étudié pour les différentes durées (de 1 heure à 24 heures) et périodes de retour peuvent ainsi être estimées. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau suivant :

Précipitations à pas de temps faible sur l'Abéous (mm)		
Durée des Précipitations (h)	Fréquence décennale	Fréquence centennale
1	36.0	57.2
2	39.6	58.1
3	44.6	63.6
6	54.8	75.2
12	71.8	98.5
24	85	120

Tableau 6 : Caractéristiques des précipitations à faible pas de temps sur l'Abéous

En règle générale, l'évolution des précipitations en fonction de la durée est fournie par la loi de Montana. Les paramètres de Montana sont définis tels que :

$$P = a d^{1-b} \text{ et } g = a' d^{1-b} \quad \text{Avec} \quad \left\{ \begin{array}{l} P : \text{Hauteur de pluie pendant l'épisode (mm)} \\ d : \text{Durée de la pluie (h)} \\ g : \text{Gradex de la pluie (mm)} \\ a, a' \text{ et } b : \text{coefficients de Montana} \end{array} \right.$$

A partir des valeurs précédentes il est alors possible de construire un graphique afin d'évaluer les coefficients de Montana sur le bassin versant de l'Abéous pour la fréquence

décennale par exemple. L'ajout d'une courbe de tendance de type « puissance » permet alors d'évaluer un ordre de grandeur de ces coefficients. La relation obtenue, entre hauteur et durée de la courbe de tendance, est la suivante : $P(mm) = 33,98 t^{0,28} (h)$ avec $R^2=0,96$

Ainsi les coefficients de Montana « calculés » sont résumés dans le tableau suivant :

a	33,98
b	0,718

Tableau 7 : Paramètres de Montana calculés

La valeur du coefficient b peut être comparée avec celles des pluviographes situées à proximité du bassin versant :

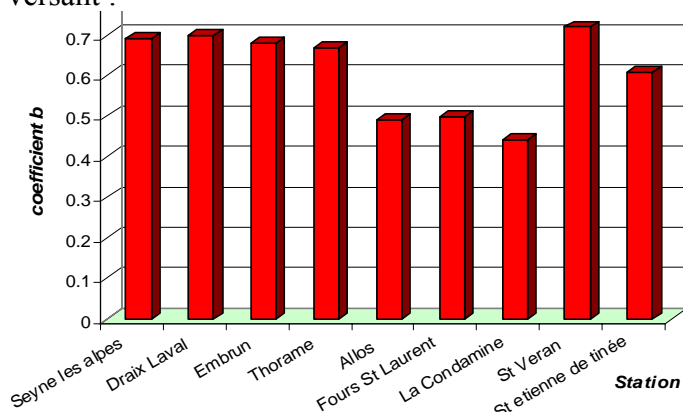


Figure 8 : Coefficient b de stations voisines

Critique et choix des paramètres représentatifs :

Ce tableau nous suggère de considérer avec prudence les résultats obtenus pour le bassin versant de l'Abéous. En effet, la différence est très nette entre les sites de vallées larges et les sites de « montagne ». Dans le premier cas, le coefficient b est de l'ordre de 0,7, signe de précipitations qui perdent assez rapidement en intensité. Dans le second cas, le coefficient b est de l'ordre de 0,5 traduisant des intensités de pluie qui diminuent faiblement en fonction de la période de leur durée. Le bassin versant de l'Abéous se rapproche plus du type de vallée d'Embrun (plutôt large) que de La Condamine. D'autre part, bien que faible, la différence est tout de même présente et les approximations de calcul conduisent donc vraisemblablement à une surestimation de ce coefficient.

Dans la suite de l'étude nous retiendrons de ce fait un coefficient b de 0,65. Les valeurs suivantes sont alors obtenues :

b	0.65
a (T=10ans)	27.9 mm
a'(T=10ans)	4.9 mm

3. Relations entre pluie et débit

a) Présentation des formules utilisées

En l'absence d'observations hydrométriques directes sur le bassin versant, nous devons utiliser des formules permettant l'évaluation des débits caractéristiques de crue. Pour cela, de nombreuses méthodes existent. Celles retenues dans la suite de cette étude (développées en *annexe 3c*), pour l'estimation du débit décennal, appartiennent à deux grandes familles :

- Les méthodes statistiques comme le transfert de bassin versant voisin et les méthodes statistiques sommaires comme CRUPEDIX nationale, CRUPEDIX régionalisée et SOCOSE.
- Les méthodes pseudo déterministes, avec les méthodes SCS (très employée à l'étranger) et Rationnelle, qui utilisent l'intensité de la pluie de projet pour la période de retour T souhaitée et pour une durée de l'épisode pluvieux égal au temps de concentration de la pluie (Cf. paragraphe suivant).

Application aux fréquences rares :

Pour la période de retour centennale, les méthodes SCS et Rationnelle sont toujours utilisées. Cependant leur utilisation est nettement moins évidente que dans le cas précédent et elles sont utilisées plus pour obtenir un ordre de grandeur. En revanche la méthode du GRADEX et plus spécifiquement la méthode du GRADEX « progressif », plus récente, apporte davantage de précisions pour l'estimation d'un tel débit. Les différences entre les méthodes peuvent parfois être assez forte et dans ce cas c'est l'origine, les limites et le domaine de validité de la méthode qui dicte la validation d'un débit par rapport à un autre.

b) Durée caractéristique de la réponse du bassin versant aux pluies

L'application des approches pluie-débit (du type SCS et méthode Rationnelle) et hydrométéorologique (gradex) nécessite au préalable de déterminer la durée caractéristique de la réponse du bassin versant aux pluies. D'une manière un peu théorique, on retiendra que ce paramètre correspond à la durée de l'averse la plus préjudiciable pour le bassin versant, c'est-à-dire celle qui provoquera le débit de pointe le plus élevé dans le cours d'eau.

A défaut d'observations, cette durée peut être estimée à partir de formulations empiriques ou statistiques diverses, dont certaines ont été calées en France et d'autres dont les domaines de validité sont parfois moins bien connus. Le tableau, inséré en *annexe 13*, présente quelques résultats issus de l'application de différentes méthodes d'estimation : les résultats s'échelonnent entre 0,42 et 1,57 heures.

On constate sans surprise que les estimations varient beaucoup d'une méthode à l'autre. Le témoignage de certains habitants de Méolans, comme le maire, M. Tron, mais aussi la morphologie du bassin versant (pente très soutenue et superficie peu étendue : Cf. *annexe 11*), suggèrent que le temps de réaction prévisible du bassin est assez court. Ceci nous incite à retenir une valeur de l'ordre de 1 heure.

Il faut garder néanmoins à l'esprit que les intervalles d'incertitudes sont ici très étendus et probablement, au minimum, de l'ordre de +/-50%.

D ≈ 1 heure

c) Estimation du débit décennal à partir des méthodes transformant la pluie en débit

Les valeurs des débits décennaux, pour le bassin versant de l'Abéous, sont détaillées en *annexe 13*. Ils sont obtenus via l'utilisation de l'outil « Calcul Hydrologique ».

L'intervalle de variation est très large selon les méthodes utilisées. Les débits varient, en effet, de 9,4 m³/s, pour la méthode CRUPEDIX nationale, à 28 m³/s, pour la méthode SCS. Effectuer une moyenne des valeurs trouvées, ou encore, prendre la valeur maximale dans un souci de sécurité, ne sont pas des démarches à adopter. En effet, chaque formule est calée pour des conditions bien particulières s'adaptant plus ou moins bien à la spécificité du bassin versant d'étude.

Dans notre cas, il vaut mieux privilégier les méthodes sommaires - comme CRUPEDIX SUD EST - aux modèles pseudo déterministes - de type SCS et Rationnelle - et

globales - CRUPEDIX nationale. En effet, le bassin de l'Abéous possède une structure complexe avec trois affluents majeurs (Cf. ci après « Etude du profil en long ») et des taux de transferts vraiment très élevés pour un bassin d'une superficie relativement moyenne. Ce sont autant de facteurs que les méthodes SCS et RATIONNELLE, plus complexes, ont du mal à prendre en compte. La méthode CRUPEDIX nationale est peu adaptée aux petits bassins versants de montagne car elle a été calée sur 630 bassins versants répertoriés dans toute la France, avec très peu de torrents à forte pente (Cf. *annexe 3c*).

En tenant compte de ces différences d'utilisation, le débit décennal finalement retenu est alors de 16 m³/s.

$$Q_{10} = 16 \text{ m}^3/\text{s}$$

d) Estimation du débit décennal par la méthode de transfert de bassins versants

La méthode de transfert de bassins versants permet d'évaluer approximativement des débits instantanés à partir de bassins versants pour lesquels nous possédons des valeurs de débit exploitables.

Cette méthode nécessite, une géomorphologie, un comportement et des surfaces réactives entre bassins versants comparés, proches, pour que les résultats soient valables. Cependant très peu de bassins ont fait l'objet d'études approfondies dans la vallée et, comme nous l'avons vu, il existe une seule et unique station hydrométrique significativement exploitable positionnée à Barcelonnette sur le torrent de l'Ubaye. Afin que les débits calculés précédemment soient comparés à plusieurs valeurs, nous en avons utilisées certaines tirées d'études hydrauliques sérieuses (Koulinski, 2003 & 2005).

La formule utilisée (Cf. *annexe 3c*) permet d'étendre les débits de ces bassins de référence à celui de l'Abéous. Les valeurs obtenues sont mentionnées dans le tableau suivant :

TRANSFERT DE BASSIN	S_B(km²)	P_{10/24/B}(mm)	Q_{10/B}(m³/s)	Q₁₀(m³/s)	source
L'Ubaye à Barcelonnette	536	66	120	9.6	DIREN
Faucon	7.4	80	8	14.8	ETRM
L'Ubaye à St Paul	155	77	75	12.9	ETRM

Tableau 8 : Caractéristiques des bassins versants de référence et débits décennaux obtenus, méthode de transfert de bassin

Ce tableau nous montre que l'ordre de grandeur est un peu près équivalent pour les deux derniers bassins versants considérés. Ils se rapprochent des résultats obtenus par les méthodes statistiques et pseudo déterministes précédentes. Le bassin de l'Ubaye, à Barcelonnette, donne une sous estimation vraisemblablement due à ses divergences morphologiques et géographiques comparées à celles de l'Abéous.

Plus qu'indicatrice de valeurs précises, l'utilisation de cette méthode permet de confirmer le débit décennal retenu précédemment.

e) Estimation du débit centennal

Le tableau fournit en *annexe 13* récapitule les différentes estimations obtenues, à partir des approches pluie-débit du type SCS et Rationnelle et de la méthode du gradex. L'intervalle des valeurs obtenues oscille entre 45 m³/s et 92 m³/s, ce qui est encore considérable

Dans le cas de l'estimation du débit centennal, l'utilisation de formules pluie-débit est nettement moins évidente que dans le cas précédent. Du fait de la difficulté d'évaluation de certains de leur paramètres (la capacité d'infiltration et le coefficient de ruissellement : Cf. *annexe 3d*), elles sont utilisées dans le but d'obtenir un ordre de grandeur. En revanche, la méthode du gradex et, plus spécifiquement, la méthode du gradex « progressif », plus récente, apporte d'avantage de précisions pour l'estimation d'un tel débit.

De ce fait, le débit centennal retenu correspond approximativement à la valeur obtenue par la méthode gradex progressif, c'est-à-dire : **Q₁₀₀ = 46 m³/s**

Remarque : l'imprécision concernant l'estimation du débit centennal présente peu de conséquences dans le cas d'un torrent comme l'Abéous. En effet, il est très peu probable, sur ce torrent, qu'une crue centennale puisse se produire sans formation de lave torrentielle. Les débits sont alors beaucoup plus élevés.

Mémento Hydrologique	
Méthodologie	Correspondance sur l'Abéous
<ul style="list-style-type: none"> • La pluviométrie du bassin versant doit être comparée à des postes proches présentant le même type de perturbation. • L'extrapolation de la pluviométrie locale doit tenir compte des spécificités de terrain du bassin d'étude (exposition, altitude, morphologie...). • L'étude de la pluviométrie inférieure à 24 heures permet le calage des paramètres hydrologiques correspondant aux perturbations engendrant les crues. • L'estimation des débits de crue doit s'effectuer en pleine connaissance des limites de chaque formule sur le bassin d'étude. 	<ul style="list-style-type: none"> • Perturbations extrêmes venant d'ouest principalement. • Altitude élevée, vallée peu encaissée Pluie décennale = 85 mm Pluie centennale = 120 mm • Phénomènes orageux, de pluies intenses ou de grêle de courte durée, bassin assez large: D = 1 heure b = 0,65 ; a= 27,9 mm; a'=4,9 mm • Limite des méthodes complexes transformant la pluie en débit. Utilisation de formules plus simples comme Crupedix et transfert de bassin Q10 = 16 m³/s Q100 = 46 m³/s

Tableau 9 : Mémento « Hydrologique »

D. Transport Solide

1. *Profil en long général*

L'étude du profil en long général du torrent aide à l'analyse de son fonctionnement. Le graphique suivant nous indique que l'Abéous fait parti des torrents scindés en trois zones :

- Une zone d'accumulation et de mise en vitesse des écoulements sur une pente très soutenue atteignant en moyenne 65 % et correspondant aux éboulements et barres rocheuses des Courréous (Cf. plan annexe II).
- Une zone intermédiaire, à 22 % en moyenne, engendrant des écoulements à fort pouvoir érosif. La tendance étant alors vraiment au transit. L'affouillement des berges y est très marqué.
- Une zone de moindre pente, correspondant plutôt à une zone de dépôt de matériaux. A la différence de la plupart des torrents de la vallée possédant de véritables cônes de déjection, c'est-à-dire de pente faible (de 4 à 5%) et de superficie suffisamment importante pour permettre un étalement des volumes solides, l'Abéous présente une pente très constante et soutenue (autour de 9 à 10%) sur tout son long, ce qui facilite la propagation des laves vers l'aval.

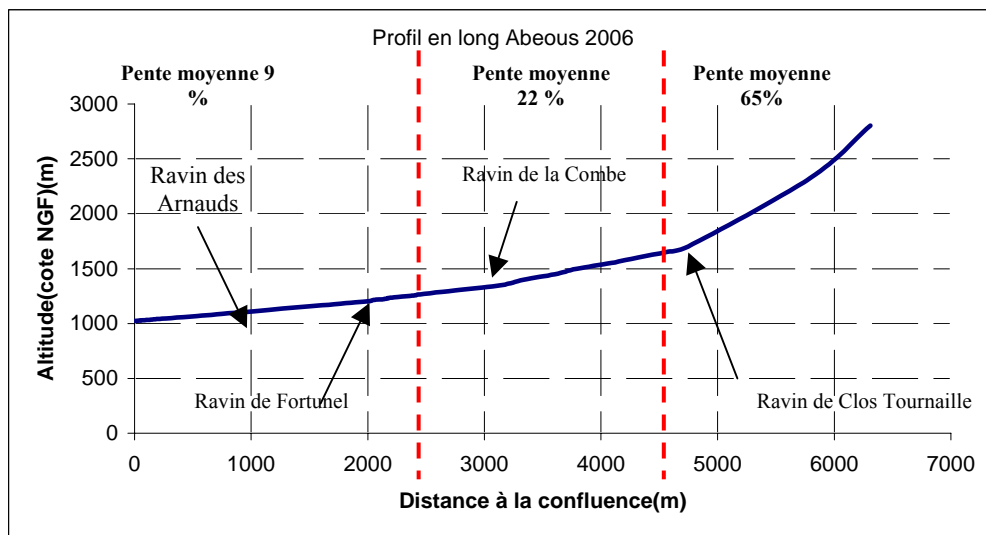


Figure 9 : Profil en long général du torrent de l'Abéous

D'autre part, la confluence avec le ravin de Clos Tournaille, seul véritable affluent grand fournisseur en matériaux, s'effectue dans la zone où le transit reste très élevé. La reprise de ses matériaux est assez directe du fait de la pente très soutenue (22% environ) de l'écoulement principal. De manière générale, à l'amont du cône de déjection, il n'existe pas de replat permettant de « soulager » l'aval en provoquant un dépôt. Les laves torrentielles, qui naissent dans la partie supérieure du bassin, sont donc transitées sans atténuation (bien au contraire) jusqu'à l'amont du cône.

2. *Profil en long de la partie aval du chenal d'écoulement*

La figure suivante dresse le profil en long de la partie aval du chenal d'écoulement réalisé, par nos soins, en Avril 2006. Il permet de visualiser la pente et le profil en long du lit en fonction de la distance à la confluence avec l'Ubaye :

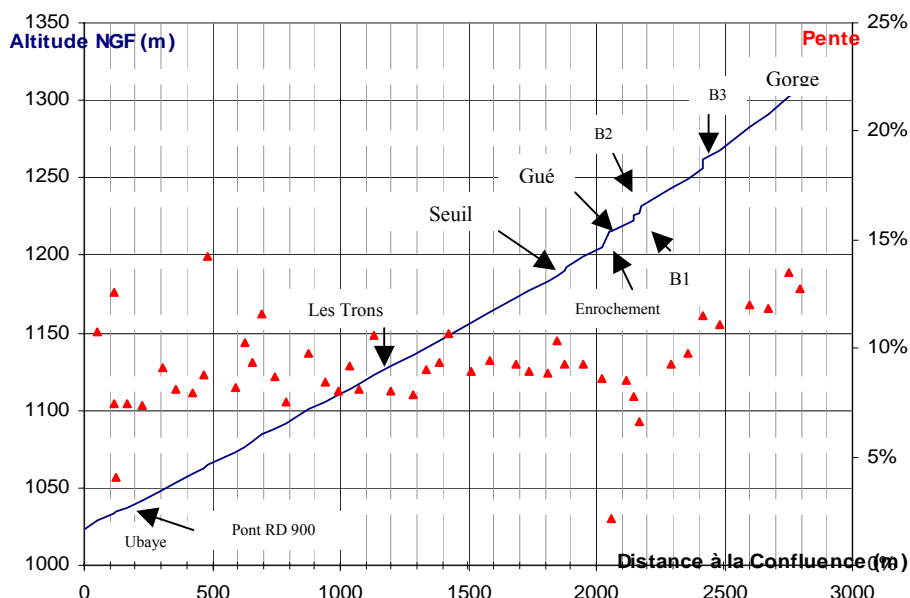


Figure 10 : Profil en long de la partie aval du chenal d'écoulement

Ce graphique permet d'effectuer les remarques suivantes :

- Trois barrages (B1, B2, B3) prennent place dans le chenal d'écoulement de l'Abéous. Ils permettent à la fois de stabiliser la pente du profil en long mais aussi de réduire localement l'énergie des crues. Le B1 (reconstruit en 2005) joue le rôle de contre barrage stabilisateur au B2. La localisation des ouvrages est détaillée en *annexe 16*.
- Un seuil naturel d'une hauteur de l'ordre de 2,5m, constitué de marnes noires friables, prend place dans une gorge très incisée à l'aval des enrochements bétonnés. Cet affleurement du substratum est assez récent (en effet ce seuil n'était pas visible quinze ans plus tôt) et l'érosion, facilitée par la présence de terrains sensibles comme les marnes noires et l'argile, provoque un enfouissement rapide du lit à cet endroit.
- La pente du profil en long est très régulière, de l'ordre de 9%, tout en diminuant très légèrement de l'amont vers l'aval jusqu'au pont de la RD 900. Cette régularité est une caractéristique d'un torrent très actif, qui a pu, au cours du temps, lisser la pente de son cône de déjection. La tendance est donc plutôt au transport de matériaux qu'au dépôt. Elle devient paradoxalement plus importante à l'aval du pont et ce, jusqu'à la confluence avec l'Ubaye. Son augmentation semble être le fruit de l'abaissement général du lit de l'Ubaye (Flez, 2000). Le transfert de matériaux vers cette rivière torrentielle n'en est que plus facilité et, une fois le pont franchi, la lave se dirige alors sans trop d'efforts dans l'Ubaye.

Explication de la situation actuelle du profil à la confluence :

Après une forte crue, les matériaux apportés par le torrent ne peuvent être repris intégralement par la rivière. Ils se déposent générant alors une pente particulièrement faible. Ultérieurement, et de manière générale, les crues - mêmes modestes - de la rivière reprennent peu à peu les matériaux apportés par le torrent et restaure une pente plus forte dans le lit de ce dernier. Le levé topographique correspond à cette situation. Cependant l'Abéous apportent des blocs de très grosses dimensions et l'Ubaye a parfois du mal à récupérer cet excès de matériaux.

3. Etude du profil en long de l'Ubaye

L'Abéous, après 6.350 mètres de cheminement, se jette dans l'Ubaye. Afin d'analyser l'influence de ce torrent sur l'Ubaye, et par la même occasion, de mieux appréhender sa réaction face aux crues de l'Abéous, il est nécessaire d'analyser son profil en long. Depuis le relevé topographique de 1908, aucun profil en long de l'Ubaye n'a été réalisé. En outre, vu la masse de travail que ce profil demande, il n'était pas question d'en réaliser un nouveau.

Du profil en long de l'Ubaye présenté ci après, nous pouvons soulever les remarques suivantes :

Au niveau de l'Abéous, l'Ubaye subi une nette modification de sa pente. Quelle en est la cause ? En fait, le lit de l'Ubaye, au niveau de la confluence, est étroit avec impossibilité de creuser la berge de rive gauche car la roche est affleurante. Les blocs amenés par les laves de l'Abéous sont très importants et l'Ubaye est confrontée à un surplus considérable de volume solide. La seule solution que possède l'Ubaye, à l'aval immédiat de cette confluence, est d'augmenter sa capacité de transport en faisant varier le seul paramètre modifiable, c'est-à-dire sa pente.

D'autre part, l'augmentation de la pente de l'Ubaye ne semble pas suffisante en cas de très forte crue de l'Abéous. Le volume des blocs transportés par la lave torrentielle de 2003 a obstrué le lit de l'Ubaye, à l'aval immédiat du pont de la RD 27, formant un « lac artificiel » à l'amont sur une longueur qui fait 150 mètres aujourd'hui. Juste après la crue, cette distance était alors beaucoup plus conséquente et l'exhaussement de l'Ubaye pouvait atteindre 5 mètres. Les blocs n'ont toujours pas été emportés par les crues de l'Ubaye et plus le temps passe, plus les matériaux seront difficilement repris en raison de la constitution progressive d'un pavage. Un schéma et une photographie de la situation à la confluence après la crue de 2003 sont présentés en *annexe 14*.

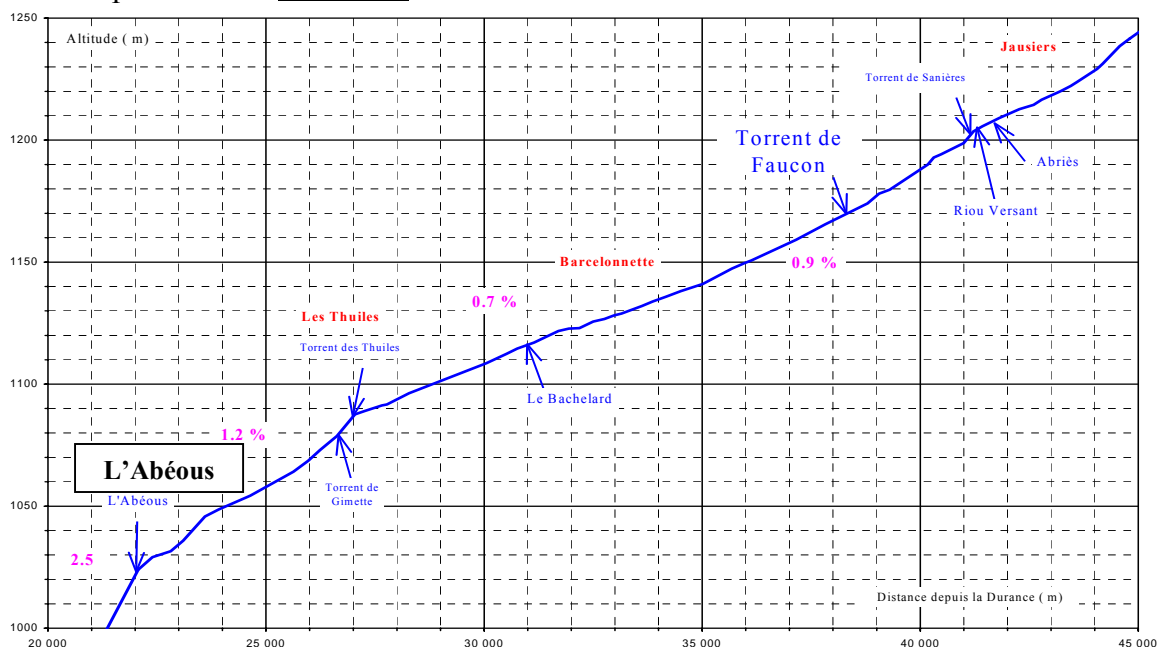


Figure 11 : Profil en long de l'Ubaye (Koulinski, 2005)

4. Description général du lit et analyse de l'érosion du bassin versant

Cette étape est destinée à dresser un état des lieux de la situation érosive de l'ensemble du bassin versant. Elle permettra, entre autre, d'obtenir une cartographie du système érosif et

nous éclairera sur la nécessité d'éventuelles interventions destinées à réduire les apports solides.

a) **Partie amont**

(Altitude comprise entre 1800 et 2800 mètres)

La partie supérieure du bassin versant est presque entièrement dénudée. Cette zone correspond en grande partie aux terrains domaniaux en cours de reboisement. Les plantations, déjà effectuées, n'ont pour l'instant qu'un rôle limité de protection du sol. Le ruissellement y est donc considérable ce qui contribue à provoquer des crues très subites.

D'autre part, à partir de 2000 mètres d'altitude, la partie supérieure du bassin versant se redresse brutalement pour atteindre 2811 m au sommet de la Montagnette par le biais de multiples ravins et de barres rocheuses qui font offices d'entonnoir lors d'un épisode pluvieux. A cette capacité d'accélération et de concentration des eaux s'ajoute un apport de matériaux considérable. L'effet des alternances gel/dégel, extrêmement importantes en Ubaye, est la formation d'énormes éboulements parsemés de débris et de blocs de calcaire gris de taille impressionnante. Ces derniers, issus, pour un certain nombre, des placages glaciaires, se retrouvent dans le chenal d'écoulement de l'Abéous.

Dans cette partie, une correction active n'est pas envisageable étant donné la pente très élevée des berges et du lit.

b) **Le chenal d'écoulement principal supérieur et ses versants.**

(Comprise entre 1300 et 1800 mètres d'altitude)

Cette partie du torrent est, sans aucun doute, celle qui est la plus inquiétante. Dans la partie supérieure (au dessus de 1500 mètres), le torrent est profondément encaissé dans du flysch dissocié. Le torrent s'écoule sur le substrat sain et bien que les chutes de blocs soient abondantes, l'incision est très limitée. Toute correction est ici inutile.

Cependant, en sortant de cette zone géologique de flysch, l'état des versants se détériore considérablement. Le versant de rive gauche est touché par un important ravinement dû à la reprise d'incision au sortir de la pseudo gorge. Un ancien glissement de terrain boisé est réactivé et les risques de chutes d'arbres sont élevés. En rive droite la situation est encore pire. Le lit de l'Abéous est dominé de plus de 100 mètres par un immense replat de glissement ancien, avec présence de niches d'arrachement qui évoluent en glissement en gradins pouvant libérer des blocs énormes (Cf. situation de la photo suivante).



Photo 1 : Situation de l'érosion dans les gorges à l'amont du barrage 3

Cette dynamique, de réactivation de glissement de terrain ancien en coulée active par le sapement continue des pieds de berges, est présente de manière plus modérée le long de la plage d'atterrissement du B3.

Des travaux de drainage pourraient être envisagés, avec profit, sur le versant rive gauche. Pour la rive droite, la situation est plus alarmante et l'entreprise de travaux pharaoniques, destinés à rehausser d'une trentaine de mètres le lit du torrent, ne semble pas appropriée.

c) **Partie inférieure du chenal d'écoulement.**

(Altitude comprise entre 1020 et 1300 mètres ; carte de localisation : *Cf. annexe 16*)

A l'amont du barrage B3 jusqu'au passage à gué, s'étale deux larges plages d'atterrissement. Sur la rive droite, le sapement du torrent provoque l'altération des berges avec une fourniture en matériaux plutôt moyenne à faible. De même, la rive gauche, bien que le siège de nombreux glissement de terrains susceptibles d'entraîner des arbres dans le torrent dans la partie amont, apporte très peu de matériaux.

C'est à l'aval du passage à gué que la situation se complique dans cette zone, et ce jusqu'à l'élargissement du lit au niveau du ravin des Arnauds (Cf. profil en long général). En effet, à partir du passage à gué, le torrent incise depuis peu sur une profondeur de 4 à 5 mètres. Cette dernière est très visible au niveau d'un point dur, récemment révélé, constitué d'une roche noire et faisant office de seuil naturel (positionné à 1190m d'altitude). Cette incision est liée au regain d'énergie disponible de l'eau après le dépôt des alluvions en arrière des barrages. L'encaissement est tel que la largeur du lit est réduite à moins de 10 mètres.

Photo 2 : Plages d'atterrissement et Photo 3 : incision du torrent à l'aval du passage à gué



L'écoulement permanent divague de berge en berge et l'effet de sapement suffit à maintenir une forte pente dans les berges composées de blocs d'une cinquantaine de centimètres environ. Le sapement conduit à de fréquents éboulements en provenance des deux berges qui rechargent le lit en éléments de dimensions variés (pouvant atteindre 5m³). A terme ce processus constitue une menace sérieuse pour les terrains des fermes Combe et Maison Blanche situés sur les hauteurs de la rive gauche. La limitation de l'érosion doit être envisagée dans ce secteur par stabilisation des berges.

A la sortie de cette incision, le lit de l'Abéous devient beaucoup plus large et la pente plus modérée. Rectiligne sur 250 mètres environ, le cours de l'Abéous divague ensuite érodant plus ou moins alternativement des berges hautes (de 3 à 6 m) sur 600 mètres. Les apports en matériaux sont modérés mais à ne pas sous-estimer en cas de forte crue.

Ensuite, sur 350 mètres, jusqu'au pont de la route départementale 900, le lit de l'Abéous est en ligne droite. La rive droite est constituée d'une berge, de 2 mètres de haut en moyenne, non érodée et donc en pente douce et largement conquise par la végétation. Cette dernière fixe les matériaux grâce à ses racines. La rive gauche est un peu plus basse et aussi végétalisée, entre 1,5 et 2 mètres, et un grand nombre de troncs tombent dans le lit. Etant donné le risque d'embâcle sous le pont et la proximité de celui-ci une solution doit être trouvée dans cette zone à risque.

Le pont possède une section relativement importante (5m de haut et 12 mètres de large) et permet aux laves de rejoindre l'Ubaye sans trop d'heurts. Cependant des placages ont été visualisés lors de la crue de 2005 au niveau du tablier et pour des crues de plus fortes ampleurs, il est possible qu'il y ait un débordement sur la route départementale 900. A l'aval du pont et jusqu'à l'Ubaye, le torrent est bien encaissé dans son cône de déjection et est bordé de terrasses laissées par les récentes crues. Les apports en matériaux sont quasi inexistant.

5. Cartographie des phénomènes d'érosion

Une cartographie des processus érosifs affectant le bassin versant de l'Abéous est proposée en *annexe 15*. Ce document, probablement non exhaustif, reprend et complète les remarques du paragraphe précédent.

Dans l'état actuel, le nombre des phénomènes d'érosion active est très important en haut du bassin versant, au niveau des nombreuses cheminées des Courréous. Pour le torrent, cela se traduit assez logiquement par un transport solide particulièrement élevé à ce niveau là avec formation probable de laves torrentielles. Cette érosion active se produit ainsi sous la forme de ravinements linéaires ou d'affouillements de berges au niveau du thalweg principal mais aussi sur les thalwegs secondaires mais d'ampleur moins importante.

Des glissements de terrain très actifs sont présents en partie haute du bassin tant en rive droite qu'en rive gauche. La superficie de ces deux glissements est de l'ordre de 100 000m².

D'autre part, la présence d'anciens glissements de terrain, plus ou moins actifs, est recensée sur cette carte. Il conviendra de rester vigilant vis-à-vis de leurs possibles évolutions futures.

6. Prédétermination des volumes solides susceptibles d'être mobilisés

L'estimation des volumes susceptibles d'être mobilisés par le torrent est menée selon une approche géomorphologique. Elle utilise en particulier les résultats des analyses précédentes relatives à la cartographie des zones d'érosion active et des secteurs à fort potentiel d'instabilité. Le tableau ci-dessous présente les différentes valeurs caractéristiques quantifiées à l'aide d'un SIG :

Processus érosif	Ravinement de faible intensité	Ravinement de moyenne intensité	Affouillement important	Glissement de terrain
Métré	3000 ml	2000 ml	6000 ml	100 000 à 300 000 m ²

L'application des travaux de Hungr (1984) consiste à définir un taux de production linéaire pour chaque bief de productivité homogène. En première approche, et suite aux visites sur le terrain, les fourchettes de valeurs forfaitaires suivantes sont considérées :

Processus érosif	Ravinement de faible intensité	Ravinement de moyenne intensité	Affouillement important
Productivité	1 à 3 m ³ /ml	5 à 10 m ³ /ml	15 à 30 m ³ /ml

Dans ces conditions, les volumes mobilisables en temps de crue, uniquement par érosion des lits de l'Abéous et de ses affluents secondaires seraient selon les scénarii retenus :

Processus érosif	Ravinement de faible intensité	Ravinement de moyenne intensité	Affouillement important	Total
------------------	--------------------------------	---------------------------------	-------------------------	--------------

Volume (m ³)	3000 à 9000	10 000 à 20 000	90 000 à 180 000	100 000 à 200 000
--------------------------	-------------	-----------------	------------------	--------------------------

L'estimation de la production de matériaux par des glissements de terrain laisse, quant à elle, une très grande part à l'expertise. L'étude géomorphologique de C.Flez, réalisée en 2000, prévoyait des hauteurs de glissement, au niveau des Courréous, entre 2 et 4 mètres. Nous pouvons donc utiliser ces valeurs à l'ensemble du bassin versant de l'Abéous afin d'obtenir un ordre de grandeur acceptable des volumes correspondants aux glissements de terrain présents. Il est, cependant, peu probable qu'un tel volume puisse être le fait d'une seule crue. Il vaut mieux apprécier ce volume comme un stock potentiellement mobilisable.

Processus érosif	Ravinement (tous phénomènes confondus)	Glissement de terrain
Volume (m ³)	100 000 à 200 000	200 000 à 400 000

Tableau 10 : Récapitulation des volumes susceptibles d'être érodés

Ces estimations sont évidemment soumises à de très fortes incertitudes. Les valeurs proposées correspondent néanmoins à des hypothèses que l'on peut considérer comme plausibles dans l'état actuel du bassin versant et sont particulièrement utiles pour valider les calculs de volume de lave par exemple.

Mémento « Analyse du profil en long »	
<i>Méthodologie</i>	<i>Correspondance sur l'Abéous</i>
<ul style="list-style-type: none"> • L'examen du profil en long du torrent, permet de révéler les zones de transit et de dépôt mais aussi des singularités pouvant jouer un rôle sur les conditions d'écoulement. • L'examen du profil en long de la rivière principale permet d'estimer l'influence du torrent d'étude sur cette dernière. Une modification de pente révèle souvent une difficulté de reprise des matériaux en provenance du torrent. C'est un point essentiel pour comprendre l'intensité de ses apports solides. • Une analyse fine de l'ensemble du bassin versant permet de localiser les parties les plus dégradées tout en repérant les zones potentiellement aménageables. Elle permet aussi d'expertiser les volumes solides susceptibles d'être mobilisés, volumes que l'on comparera, par la suite, aux formules théoriques. 	<ul style="list-style-type: none"> • Pente très élevée du bassin versant, pas de zones de replat, incision récente: capacité marquée au transit. Efficacité des barrages mais insuffisante. • Pente du cône de déjection constante et soutenue : révèle activité intense du torrent et provoque le transit des laves torrentielles jusqu'à la confluence. • Bassin versant très dégradé, apports massifs en matériaux dans le lit, nombreux glissements de terrains, intervention en partie haute peu imaginable. Protection de berges nécessaire au droit de la ferme Maison Blanche qui réactive l'écoulement des laves. • Cartographie des phénomènes : l'apport massif en matériaux s'effectue principalement dans le haut du bassin versant avec formation de laves torrentielles <u>Volumes susceptibles d'être érodés :</u> 100 000 à 200 000 m³ Glissements de terrains : 200 à 400 000 m³

Tableau 11 : Mémento « Analyse du profil en long »

7. Quantification du transport solide

a) Phénomènes observés

Deux types de phénomènes peuvent se produire dans le torrent de l'Abéous :

- Le charriage torrentiel (matériaux poussés sur le fond par un écoulement d'eau) qui correspond aux phénomènes ordinaires de l'ensemble des torrents mais qui peut engendrer des conséquences très importantes (affouillements, obstruction du lit et déviation provoquant des inondations...) lors de crues exceptionnelles.
- La lave torrentielle qui se produit généralement pour les très fortes crues. Elle ne se retrouve que dans quelques torrents qui présentent des caractéristiques (géomorphologique, météorologique...) favorables à leur formation.

Les deux phénomènes doivent être abordés séparément car les outils d'études correspondants sont fondamentalement différents.

b) Description d'une lave torrentielle

Les laves torrentielles se forment sur des lits à forte pente, lorsque l'alimentation en matériaux permet un mélange homogène de ces derniers avec l'eau. Les matériaux rencontrés dans de nombreux bassins versants de la vallée de l'Ubaye (schistes, moraines, terres noires..) sont très favorables à la formation de laves torrentielles boueuses, c'est à dire à matrice assez fine avec une teneur importante en argile et dont la pente d'arrêt est supérieure à 5% (Ancy, 1999). Cependant, il faut noter qu'il existe d'autres types de laves :

- Les laves granulaires : leur matrice est plutôt grossière et leur pente d'arrêt est supérieure à 15 %. La formation d'une telle lave est peu probable au niveau de l'Abéous du fait de la géologie en présence. D'autre part, tant bien même ça serait le cas, la pente du cône de déjection arrêterait net un tel écoulement.
- Les laves fluides (ou lahars) : elles possèdent une matrice fine importante avec beaucoup d'argiles et peu de silts. Elles se rencontrent principalement en terrain volcanique.

Une lave torrentielle boueuse est usuellement formée de trois parties :

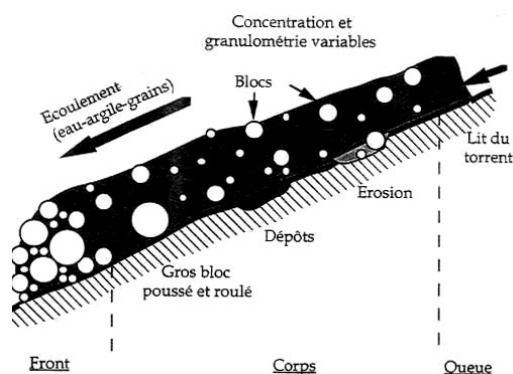


Figure 12 : Structure d'une lave torrentielle, Internet [7]

Le bourrelet frontal constitué des plus gros blocs et de troncs, venant des berges, arrachés par son passage, mais sans matrice boueuse. Ce bourrelet frontal présente une section qui peut être très importante. Il est poussé par le corps de la coulée. C'est la partie de la lave

torrentielle qui déterminera la section maximale de l'écoulement et qui surtout lui donnera son pouvoir destructeur.

Le corps de la coulée est constitué d'un mélange boueux homogène. Il joue un rôle moteur dans le déplacement de la coulée. Généralement, des blocs de toutes dimensions sont noyés dans ce mélange et la granulométrie d'ensemble des matériaux est souvent assez étendue. Le corps est la fraction la plus importante de la lave. C'est lui qui détermine majoritairement le volume de l'évènement (Meunier, 1991).

La queue de coulée dans laquelle on peut observer un charriage hyper concentré. La section d'écoulement est alors nettement plus réduite.

Une des propriétés fondamentales des laves torrentielles est de pouvoir s'arrêter selon une pente non nulle. Cette dernière dépend néanmoins de la nature de la lave. Pour les laves boueuses, la pente limite est proche de 3° environ. D'une manière générale, l'arrêt des laves torrentielles peut être commandé par l'un ou l'autre des trois mécanismes suivants (C.Péteuil, 2003) : une diminution locale de la pente du thalweg, un élargissement du chenal permettant un étalement de la coulée et, dans une moindre mesure, un changement brutal de l'axe d'écoulement du chenal.

D'autre part, la modélisation, physique ou empirique, des écoulements de laves torrentielles, nécessite de disposer des conditions aux limites amont (ruissellement, apport en matériaux des versants) sous forme d'un hydrogramme d'entrée. En l'absence de modèle physique d'érosion adapté à la complexité des multiples processus intervenant sur un versant montagneux, cet hydrogramme est élaboré à partir du volume entrant à l'amont immédiat de la zone d'étude. Sa connaissance devient alors indispensable.

c) Calcul des volumes de laves

◆ Méthode basée sur les précipitations

Cette méthode, destinée à estimer les volumes de crues mobilisés par les laves à genèse hydrologique, n'est valable que dans le cas où le volume de lave transporté durant une crue est en relation avec le volume d'eau mobilisé, c'est-à-dire que le phénomène prépondérant est la reprise des matériaux dans – ou à proximité – du lit et non la mise en mouvement de terrains instables. Dans ce cas, il est envisagée de considérer un rapport constant entre volume d'eau et volume de lave.

Les laves torrentielles se forment pour des épisodes météorologiques particulièrement violents et brefs (orages de grêle ou précipitations intenses). On retiendra donc un évènement pluvieux intense, de durée 1 heure, pour modéliser un scénario de genèse de crue.

Le principe de la méthode est le suivant :

Etape 1 : calcul du volume ruisselé (m³) $V_{ruisselé} = P(1h) \times C_{ruissellement} \times Superficie$

Etape 2 : calcul du volume d'eau formant les laves (V_{FL}) : V_{FL} ≈ V_{ruisselé}/4

*Etape 3 : Approximation du volume probable de lave (V_{pl}) : V_{pl} ≈ 2 à 4 * V_{FL}*

Les paramètres retenus et les intermédiaires de calcul sont explicités dans le tableau suivant :

Période de retour	T=10ans	T=100ans
Précipitations pendant 1 h(mm)	27.95	39.46
Coefficient de ruissellement	0.25	0.5
Volume d'eau ruisselé(m ³)	99214	280134
Volume d'eau formant les laves(m ³)	24804	70033
Fourchette de volume de laves(m ³)	49607	140067
	99214	280134

Tableau 12 : Volumes obtenus par la méthode basée sur les précipitations

Il n'est malheureusement pas possible de caler cette estimation à des relevés historiques précis car aucune quantification n'a été réalisée sur les volumes transitant dans le torrent durant les crues. Seuls des ordres de grandeur sont accessibles après les crues de 2003 et 2005 (Cf. ci après). Une forte incertitude existe dans la méthode de part les rapports arbitrairement choisis.

Formules sommaires

Elles sont nommées ainsi par analogie avec les méthodes équivalentes développées en hydrologie et présentées dans cette étude. Elles relient le volume de la lave à des paramètres rendant compte des facteurs permanents de la genèse des laves torrentielles tels les caractéristiques morphologiques, du bassin versant et du cône de déjection, la nature des substrats, la couverture végétale. Elles ont été obtenues à partir de données empiriques événementielles collectées dans des zones géographiques d'étendue variable soit par calage et validation d'un modèle conceptuel, c'est-à-dire semi empirique (D'Agostino, Kronfellner-Kraus et Bianco) ou d'autres strictement empiriques (Rickenmann et Zeller).

La description précise des formules utilisées s'effectue en annexe 6.

Les paramètres retenus (choisis à partir de l'annexe 6) pour ce calcul sont les suivants :

Altitude maximale du BV (km)	2.81	Indice géologique D'Agostino	3
Altitude à l'exutoire (km)	1.023	Indice torrencialité D'Agostino	1
Dénivelé spécifique (%)	47	Indice Robert Marie	8
Distance Formation de lave/exutoire (km)	4	Indice Kronfellner-Krauss	700
Pente moyenne (%)	28.2		
Pente du cône (%)	10		
Surface non végétalisée (%)	35		
Surface du Bassin Versant (km ²)	14.2		

Tableau 13 : Paramètres retenus pour l'estimation des volumes par les méthodes sommaires

Les résultats des **volumes de crues** obtenus sont répertoriés dans l'histogramme suivant :

Formule	volume de lave(m ³)
D'Agostino	248799
D'Agostino simplifiée	172158
Zeller min	36078
Zeller max	120261
Rickenmann	164000
Bianco	55053
Kronfellner-Krauss	280308

Tableau 14: Volumes obtenus par l'ensemble des méthodes sommaires

Analyse des résultats :

- Une large dispersion des valeurs confirme la difficulté d'estimation de ces volumes de lave et la sensibilité au terrain d'étude des formules employées.
- Les formules de Zeller et Bianco, bien que cette dernière soit la seule à être calée sur des torrents français, conduisent vraisemblablement à une sous estimation (en cas de simulation d'événements exceptionnels) des volumes dans le cas du torrent de l'Abéous.
- Les valeurs obtenues avec les formules de Kronfellner et d'Agostino sont très voisines et relativement fortes. Ces dernières ont été élaborées respectivement : en

Autriche, et en Italie du nord et ont tendance à sur estimer les volumes de laves sur les torrents français (constaté par S.Brochot, 1996).

- Les formules de d'Agostino simplifiée et de Rickenmann donnent des valeurs assez regroupées et donnent en général de très bon ordre de grandeur des volumes transportés (Koulinski, 2003).

L'origine, très différente, de ces méthodes nous permet d'avoir quelques doutes sur leur validité au niveau de notre bassin d'étude, aux spécificités propres. Les résultats doivent être confrontés à une analyse de type « terrain » afin de conforter les ordres de grandeur obtenus.

♦ Comparaison avec les volumes estimés des laves de 2003 et 2005 :

- Crue de 2003 :

Cette crue a particulièrement déposé des matériaux, à partir de la plage d'atterrissement du B3, dans le chenal d'écoulement. Les estimations des curages, réalisées par M.Guiter du service RTM, évaluent approximativement un volume de 17 500 m³ sur 400 mètres depuis la confluence avec l'Ubaye. L'évaluation du dépôt engendré sur la partie amont (jusqu'à l'amont des Trons) indiquait alors un volume de 13 000 m³ environ (au minimum selon G.Guiter). D'autre part, la respiration engendrée à l'amont de certains points remarquables, comme la sortie des premières gorges (photographie suivante) ou l'amont immédiat des barrages, permet d'approcher les volumes stockés à ces niveaux.

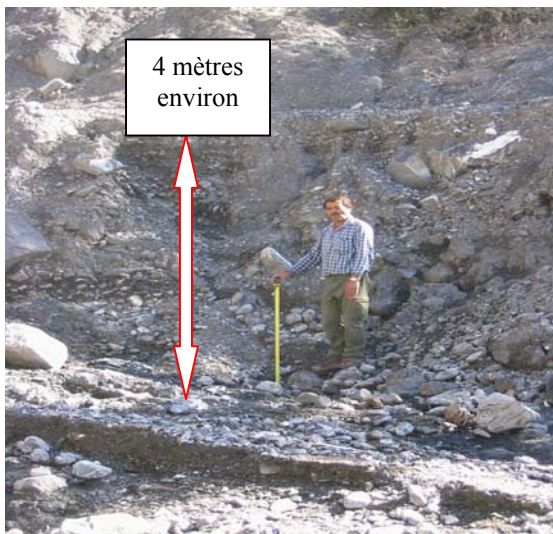
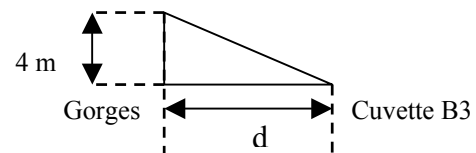


Photo 4 : Aperçu de la hauteur de respiration

Au niveau des gorges, la respiration peut atteindre environ 4 mètres. Le calcul de la surface stockable à l'amont du barrage B3 s'effectue par analogie avec celle d'un triangle :



Connaissant la valeur moyenne de la largeur du lit entre ces deux points remarquables, nous pouvons alors calculer le volume probablement stocké par l'ouvrage.

Cette méthode est réutilisée au niveau des barrages B1 et B2 avec des respirations respectives de 3 et 1 mètres. Le volume total, correspondant au dépôt d'une telle lave le long des plages d'atterrissement des trois barrages, serait alors compris entre 25 000 et 30 000 m³. En additionnant l'ensemble du dépôt engendré durant cette crue dans le chenal, le volume correspondant reviendrait à 60 000 m³. A cela, il faut ajouter les nombreux matériaux qui se sont déposés à la confluence remplissant l'Ubaye jusqu'à l'arche du pont de la RD 27, soit, sur une hauteur de 4 à 5 mètres. A partir de la largeur de l'Abéous et de l'Ubaye à ce niveau critique, on arrive à un volume complémentaire de 5000 m³ et à un volume général avoisinant les **65 000 m³**.

Remarques : Ce résultat conduit, bien évidemment, à une sous estimation du volume de lave total du fait de la reprise, par l'Ubaye, d'une partie de ce dernier. On peut vraisemblablement et raisonnablement évaluer le volume de cette lave aux alentours de **100 000 m³**. Cependant il

permet de voir que les volumes calculés précédemment donnent des ordres de grandeurs tout à fait corrects.

- Crue de 2005 :

Cette crue a été particulièrement affouillante et le mode de propagation visiblement au transit. Toujours selon G.Guiter, la lave n'a pratiquement pas déposé sur le chenal d'écoulement et la plupart des matériaux ont été repris directement dans l'Ubaye. Le dépôt s'est par contre produit de manière considérable sur environ 1 km depuis la confluence rehaussant les berges sur une hauteur de 3 mètres minimum à la confluence et dégressive ensuite sur toute cette distance. Connaissant la largeur moyenne de l'Ubaye dans cette zone (45 mètres), il est aussi possible d'estimer le volume de cette lave de manière grossière. Le volume correspondant est alors de 60 000 m³.

Remarques : De même qu'en 2003, ce volume est sûrement sous estimé du fait tout d'abord de la constitution d'un léger dépôt dans le chenal, puis de la reprise de matériaux sur une longueur bien plus importante et enfin d'une supposition de la hauteur de dépôt un peu faible. Ce volume appuie donc, dans l'ensemble, les chiffres retenus précédemment.

Remarques sur les deux crues : L'analyse des volumes des crues de 2003 et 2005, constituant les évènements les plus violents connus jusque là, nous pousse à conclure que les plus forts volumes calculés par les méthodes sommaires correspondent à des évènements dont la période de retour est supérieure, c'est-à-dire d'occurrence exceptionnelle.

◆ Volumes choisis :

D'après les calculs et remarques explicités ci dessus, mais aussi de l'approche géomorphologique étudiée en III/D/6, nous retiendrons alors un volume de **150 000 à 200 000 m³ pour un épisode majeur d'occurrence exceptionnelle** (période de retour supérieure à 100 ans), de l'ordre de **80 000 à 150 000 m³ pour des épisodes rares** (période de retour entre 50 et 100 ans) et de **30 000 à 50 000 m³ pour des épisodes plus fréquent** (période de retour inférieure à 50 ans).

8. Transport solide par charriage

Afin de mieux connaître l'évolution du lit du torrent en cas de fortes crues par charriage, une estimation des volumes transportés lors de ces évènements exceptionnels est nécessaire.

Pour cela, différentes formules existent mais c'est la formule de Lefort (1990) que nous retenons. En effet, elle se distingue des autres formulations en faisant intervenir le débit liquide global (elle est donc indépendante de la largeur de la section et des conditions hydrauliques très mal connues lors des crues dans les cours d'eau à forte pente) et a l'avantage d'exprimer le débit solide en terme de « volume apparent » (c'est-à-dire en prenant en compte le volume des vides qui serait inclus dans le volume que représenterait la quantité de matériaux transportés si elle venait à se déposer sur un site précis = « volume foisonné » ou « volume réel »).

Elle s'écrit :

$$\frac{Q_s}{Q} = 4,45 \times \left(\frac{d_{90}}{d_{30}} \right)^{0,2} \times \frac{\rho}{\rho_s - \rho} \times I^{1,5} \times \left(1 - \left(\frac{Q_{lc}}{Q} \right)^{0,375} \right)$$

}

d_x : diamètre pour lequel
x% des grains sont plus petits
d_m : diamètre moyen des grains de l'échantillon
Q_s : débit solide
Q : débit liquide
Q_{lc} : débit liquide de début d'entraînement
des matériaux
ρ : densité de l'eau

$$\text{Avec : } \frac{Q_{lc}}{\sqrt{g \times d_m^5}} = 0,295 \times I^{-13/6} \times (1 - 1,2 \times I)^{8/3}$$

L'utilisation de cette formulation, correspondant aux fortes pentes, est légitime ici car la morphologie et la granulométrie du lit du torrent montrent qu'il n'y a pas de pavage constitué pour les fortes crues et ainsi que le débit de seuil de transport de matériaux est alors largement dépassé. Une analyse granulométrique est alors nécessaire pour déterminer les paramètres précédents (Cf. *annexe 4*).

Les paramètres granulométriques de l'Abéous sont résumés dans le tableau suivant :

Torrent	d_m (cm)	d_{50} (cm)	d_{90} (cm)	d_{30} (cm)	d_{90}/d_{30}
Abéous	6,5	4	16	1,5	10,7

Tableau 15 : Paramètres granulométriques de l'Abéous

De ce tableau surgissent les remarques suivantes :

L'examen des courbes granulométriques et le rapport d_{90}/d_{30} très élevé, du torrent de l'Abéous révèlent une gamme granulométrique très variée mais étendue de manière non uniforme dans les classes de diamètre. D'une manière générale, ceci provient de la composition d'une lave torrentielle dans laquelle de très gros blocs sont associés à des éléments beaucoup plus fins. Cette diversité est telle que le rapport est presque deux fois plus important que pour des torrents dont le seul mode de transport est le charriage. Les torrents à laves et à charriage se différencient nettement par ce rapport. En effet, au contraire des laves torrentielles, les matériaux transportés lors des crues de charriage appartiennent à un fuseau granulométrique peu étendu ce qui leur confère un rapport d_{90}/d_{30} peu élevé.

Hydrogrammes de crues :

Afin d'évaluer les volumes solides transportés en temps de crue, il est nécessaire d'injecter, en tête du cône de déjection, un hydrogramme de crue. Sa construction s'élabore autour des deux paramètres les plus caractéristiques des crues pour des bassins versants de torrents de montagne, à savoir : **le temps de concentration** et **le débit de pointe**.

On part, tout d'abord, de l'hypothèse simple d'une forme triangulaire de cet hydrogramme. Dans le cas des torrents, principalement sensibles aux manifestations estivales (de type orageuse), la courbe de montée ou courbe de concentration (entre le débit de base - supposé nul pour les torrents - et le débit de pointe de la crue) est linéaire avec pour temps de montée le temps de concentration. La courbe de décrue, linéaire elle aussi, peut être plus étendue sur une durée intermédiaire entre t_c et $2t_c$ ($3/2t_c$ semble être un bon compromis en terme de lame d'eau écoulée (Koulinski, 2003)). Afin de donner à l'hydrogramme définitif une forme plus « naturelle », on « arrondit » alors les droites composant les hydrogrammes triangulaires précédents pour aboutir à l'hydrogramme de crue retenu dont la courbe de décrue s'étale finalement sur $3t_c$.

Pour une crue **décennale** au sommet de la plage d'atterrissement du B3, les hydrogrammes solides et liquides sont schématisés ci après. Le volume correspondant pour une crue décennale est alors de **11 000 m³**.

Pour un torrent comme l'Abéous, qui forme des laves torrentielles pour des crues de période de retour assez faible, un tel calcul pour une crue centennale est peu approprié. Cependant, comme nous le montre la crue de 1993, le charriage peut parfois être de grande importance. Ainsi, pour une période de retour centennale le volume est environ de 30 000 m³.

Nous verrons par la suite que les volumes transportés par les laves torrentielles sont d'une toute autre grandeur.

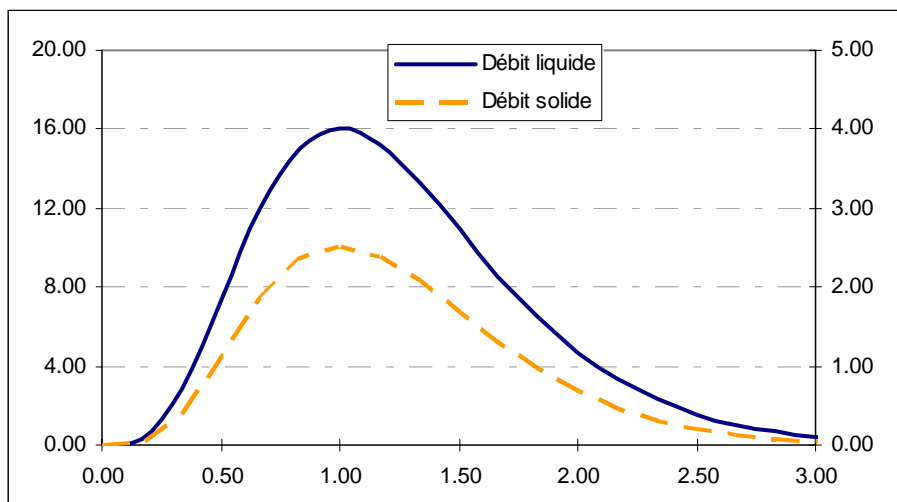


Figure 13 : Hydrogrammes solides et liquides d'une crue décennale sur l'Abéous

Légende : axe des ordonnées gauche : débit liquide (m^3/s) ; axe des ordonnées droit : débit solide (m^3/s) ; abscisse : temps (en heure).

Mémento « Volumes Solides »	
<p style="text-align: center;">Méthodologie</p> <ul style="list-style-type: none"> • Les méthodes de prédétermination des volumes solides sont très différentes selon le mode de transport. • Les volumes solides de laves torrentielles sont déterminés à partir d'utilisation de diverses méthodes sommaires aux conditions d'utilisation très différentes. Une confrontation des formules usuelles à des faits réels, qui tiennent compte des particularités du bassin versant, est conseillée. • L'intégration de l'hydrogramme de crue solide permet d'obtenir le volume solide correspondant au charriage. La construction de cet hydrogramme s'effectue à partir d'un levé granulométrique et des valeurs de débit de crue obtenues dans la partie hydrologique. 	<p style="text-align: center;">Correspondance sur l'Abéous</p> <ul style="list-style-type: none"> • Les volumes solides correspondant à l'application des formules usuelles pour les laves torrentielles donnent des ordres de grandeur très différents de 50 à 250 000 m^3. • Utilisation de crues historiques (2003 et 2005) et de l'approche géomorphologique afin de caler l'ensemble des valeurs obtenues par les méthodes sommaires. On obtient alors un intervalle selon la période de retour des phénomènes : <ul style="list-style-type: none"> <li style="text-align: center;">$V(\text{laves}) = 80\ 000 \text{ à } 200\ 000\ m^3$ • Hydrogramme de crue construit sur les bases de 1tc en montée et 3tc en descente, correspondant à une crue d'orage <ul style="list-style-type: none"> <li style="text-align: center;">$V(\text{charriage}) = 11 \text{ à } 30\ 000\ m^3$

Tableau 16 : Mémento « Volumes Solides »

E. Conditions découlement

1. Le charriage torrentiel

a) Problématique

Comme nous l'avons mentionné précédemment dans l'étude, les crues les plus importantes sur le torrent de l'Abéous prennent place sous forme de laves torrentielles. Le phénomène de charriage torrentiel, bien qu'à grande tendance érosive, engendre des volumes de matériaux bien moindres et la pente très régulière et relativement conséquente du cône de déjection provoque un penchant au transit plutôt qu'au dépôt. De plus, les hauteurs d'écoulement sont souvent bien moins considérables par charriage que par lave torrentielle, ce qui diminue les risques de débordement.

Le lit de l'Abéous est, dans l'ensemble, bien canalisé par des berges relativement hautes dans la majeure partie de son cône de déjection. Cependant, dans la partie aval, la faible réduction de pente favorise le dépôt et donc l'exhaussement du lit. Le volume engendré par de telles crues pourrait être de l'ordre, d'après les calculs précédents, de 11 000 m³ pour une période de retour décennale et de 30 000 m³ (se retrouvant à la confluence principalement) en cas d'épisode centennal sans formation de lave, ce qui est tout de même considérable. La présence de la future maison du bois en rive gauche et à proximité de la confluence avec l'Ubaye, c'est à dire dans une zone où le dépôt est considérable, nous pousse à étudier plus précisément ce type de phénomène.

b) Outils et Hypothèses de simulation

Afin de vérifier, au final, si les crues à charriage de l'Abéous peuvent engendrer de quelconques débordements, il faut calculer le niveau d'exhaussement du lit en cas de tels épisodes. Le logiciel de simulation « EFL vs 4 », élaboré par P.Coussot, permet d'effectuer une telle simulation. De manière générale, à partir de la rentrée d'un hydrogramme de crue, des paramètres granulométriques, du profil en long et en travers de la zone d'étude et de la pente amont d'alimentation en matériaux, ce logiciel calcule, pour chaque pas de temps de l'hydrogramme de crue, la hauteur de dépôt correspondante.

Les profils, en long et en travers, utilisés correspondent à ceux réalisés par nos soins en avril 2006. La zone qui nous intéresse, c'est-à-dire du pont de la CD 900 à la confluence avec l'Ubaye, est complétée par les profils de l'Ubaye sur une distance de 500 mètres environ à l'aval de la confluence afin d'obtenir des conditions aux limites satisfaisantes à l'utilisation du logiciel. Cette prolongation de 500 mètres est tout aussi nécessaire en partie amont du pont. La pente de ce dernier tronçon est choisie de telle sorte qu'elle soit l'équivalente de la pente d'équilibre, c'est-à-dire la pente de fourniture en matériaux utilisée dans les équations de transport solide. Cette dernière est évaluée par consultation de la pente moyenne du profil en long à l'amont de la zone d'étude.

D'autre part, la construction des hydrogrammes de crues, tout comme le choix des paramètres granulométriques, ont déjà fait l'objet d'explications dans cette étude.

Finalement, les paramètres utilisés, pour mener à bien la simulation, sont résumés dans le tableau suivant :

dm =diamètre moyen	0.065
d90/d30	10.7
densité solide du matériau	2.65
dx = pas de calcul	10 m
pequi =pente d'équilibre	8.5 %

Tableau 17 : Paramètres retenus dans le logiciel EFL vs 4

c) Résultats obtenus

Les simulations effectuées dans le cas d'une crue décennale et centennale de charriage torrentiel indique les exhaussements suivants sur le tronçon considéré:

Exhaussement : crue décennale (m)	de 0,25 à 0,85
Exhaussement : crue centennale (m)	de 1,00 à 1,75

Tableau 18 : Valeurs des Exhaussements obtenus avec le logiciel EFL vs 4

Remarques :

L'emprise de la maison du bois sur le profil en long du torrent s'étale sur plusieurs profils en travers, extrapolés par le logiciel, aux exhaussements tout à fait différents. C'est la raison pour laquelle les résultats précédents sont présentés sous forme d'intervalle.

Après avoir effectué les calculs de hauteur d'eau (critique et normale) et dans le pire des cas (dans le cas d'une crue centennale en charriage et pour le profil possédant la rive gauche la plus basse), la situation est schématisée ci après :

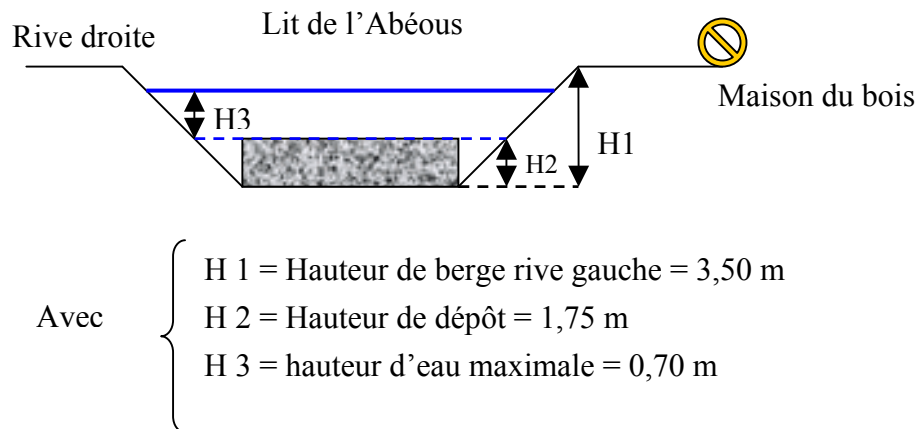


Figure 14 : Situation dans le cas d'une crue à charriage au niveau de la maison du bois

De ce schéma précédent, il apparaît bien que toute possibilité de débordement semble écartée en rive gauche, c'est-à-dire en direction de la maison du bois, dans le cas d'un fort charriage torrentiel. La rive droite, cependant, de hauteur moyenne de l'ordre de 2,50 mètres est susceptible d'être le lieu de débordements. L'ampleur peu importante de ces derniers, mais aussi l'absence d'enjeux de ce côté, sont autant de raisons qui ne justifient pas la conception d'un aménagement spécifique au charriage sur cette rive.

2. Les laves torrentielles

a) Loi de comportement

Les laves torrentielles sont des écoulements fortement transitoires : elles s'écoulent en « bouffées » successives (la hauteur du front est supérieure à celle du reste de la coulée) qui ont une capacité destructrice importante, par érosion et par chocs et s'arrêtent brutalement sur un obstacle ou une diminution de pente, ce qui entraîne fréquemment un changement de lit pour les bouffées suivantes. L'état actuel des connaissances permet de calculer les caractéristiques de leur écoulement en régime uniforme pour le corps de la lave boueuse mais ces possibilités sont limitées par l'abondance des singularités dans le lit des torrents et par le caractère fortement granulaire de leurs fronts.

De nouvelles approches ont vu le jour ces dernières années se basant sur la loi de comportement des matériaux. COUSSOT (1992) a montré que la loi de comportement des mélanges boueux pouvait être représentée par un modèle de HERSHEY & BULKLEY :

$$\tau = \tau_c + K \frac{\partial v}{\partial y}^{1/3} \quad \text{pour } \frac{\partial v}{\partial y} \neq 0 \quad \text{Avec :}$$

τ : Contrainte de cisaillement τ_c : Seuil de contrainte dépendant du matériau K : Coefficient caractéristique du matériau v : Vitesse de lave à la cote y y : Distance depuis le fond
--

Il s'agit d'un comportement totalement différent de celui des fluides newtoniens (comme l'eau par exemple) pour lesquels la contrainte de cisaillement est directement proportionnelle au gradient de vitesse. Dans ce cas, le seuil de contrainte correspond à la contrainte nécessaire pour que le mouvement débute : on peut donc avoir une épaisseur importante de lave sur une pente significative sans qu'il y ait de mouvement des matériaux.

Cette équation n'est valable que pour un mélange boueux avec une faible proportion de matériaux grossiers. On peut donc l'employer pour le corps de la lave. Par contre, elle est sans signification pour le bourrelet frontal, composé de matériaux beaucoup plus granulaires où la matrice d'éléments fins a un rôle nettement plus réduit.

Cependant, comme nous l'avons vu l'Abéous charrie des blocs de taille considérable et les résultats sont donc à considérer avec une grande prudence. Cette situation peut, de plus, s'aggraver lorsque des arbres tombent dans le torrent.

Cette loi a été utilisée par Bossan (Koulinski, 2005) lors de divers essais en laboratoire. Le résultat de ces essais est l'édification d'équations permettant le calcul des conditions d'écoulement en canal rectangulaire ou trapézoïdal exprimant la contrainte de cisaillement à la paroi τ_p . Elles permettent de calculer la hauteur normale de la lave, c'est-à-dire en régime permanent uniforme, à partir de paramètres caractéristiques de la lave (densité et paramètres rhéologiques) et de la géométrie du canal.

L'évaluation de ces paramètres est particulièrement délicate en l'absence de valeurs relevées directement après un épisode de lave torrentielle. En effet, parfois les laves laissent des traces bien visibles dans un virage ce qui permet d'avoir un bon ordre de grandeur de la vitesse d'écoulement par application de formules géométriques simples (Koulinski, 2003). L'évaluation, dans un premier temps, de la vitesse et donc du débit ne peut pas s'effectuer de manière aussi directe sur le torrent de l'Abéous. L'utilisation d'autres témoignages, de source fiable, est donc recommandée.

b) Estimation des paramètres caractéristiques des laves de l'Abéous

On peut essayer d'approcher la valeur des paramètres caractéristiques par l'analyse des crues de 2003 et 2005.

◆ Hauteurs des laves :

Le témoignage de G.Guiter, du service RTM des Alpes de Haute Provence, mais aussi les photos prises durant ces crues, nous permettent, en effet, d'évaluer des hauteurs de laves (en essayant de distinguer, les traces réelles, des nombreuses éclaboussures) à divers endroits du cône de déjection. Ces hauteurs maximales correspondent nécessairement au front de lave

et, pour évaluer la hauteur du corps de lave, on peut diviser, en première approximation, la première par la valeur, communément admise, de 1,5 (Meunier, 1991).

- Au niveau de la passerelle à l'amont immédiat du pont de la CD 900 : crue 2005

La passerelle se situe à environ 5 mètres au dessus du lit en période d'écoulement permanent. Sur une photographie (Cf. *annexe 17*), prise en fin de crue, la présence d'un placage du côté gauche de la passerelle nous conduit à penser que le front de lave ait pu s'approcher d'une valeur voisine. **Ainsi, pour le corps de lave, nous pouvons opter pour une valeur de 3,30 mètres à ce niveau.**

- Au niveau du barrage n°2 : crue 2005

Des dépôts de matériaux sont visibles sur une ancienne photographie (confère *annexe 17*) au niveau de l'aile gauche du barrage B2. D'après G.Guiter, le front de lave est passé approximativement à 50 cm au dessus de l'aile. Sachant que 4 mètres séparent la cuvette du sommet de l'aile, nous pouvons estimer à cet endroit **une hauteur maximale de 4,50 mètres pour le front de lave et de 3,0 mètres pour le corps.**

Remarques : D'après l'étude historique, les laves rencontrées en 2003 et 2005 constituent les laves les plus fortes rencontrées de mémoire d'Homme. Une fois les paramètres rhéologiques fixés grâce à ces crues, une augmentation du débit semble indispensable afin de simuler des phénomènes exceptionnels (de période de retour supérieure à 100 ans).

◆ Débits probables de lave

Des formules d'estimations des débits de laves ont été développées par de nombreux scientifiques à partir des volumes de la coulée et/ou des débits de crue liquide. Dans cette étude nous utiliserons les ordres de grandeurs donnés par Meunier (1991) et Rickenmann (1999). Les valeurs retenues pour le bassin versant de l'Abéous sont alors les suivantes :

Probabilité d'occurrence	Débit de pointe (Q : m ³ /s)
Forte à moyenne	90 à 150
Faible	150 à 300
Exceptionnel	300 à 450

Tableau 19 : Débits des laves torrentielles de l'Abéous

Compte tenu, par ailleurs, des nombreuses incertitudes relatives aux méthodologies d'études des écoulements de laves torrentielles, il est d'usage de conduire des études paramétriques concernant une large gamme de débits.

◆ Paramètres rhéologiques : estimation du rapport τ_c/ρ

A partir des éléments précédents, et surtout d'une tentative de reconstitution de la crue de 2005 avec le logiciel de calcul de laves torrentielles mis au point par P.Frey, il est possible de déterminer les paramètres rhéologiques correspondants aux laves rencontrées dans l'Abéous. Dans le cadre du logiciel utilisé, cela revient à tenter d'explicitier le rapport τ_c/ρ (ρ : masse volumique). On considérera un coefficient K/τ_c égal à 0.3 et ρ égale à 2200 kg/m³, ce qui est classiquement admis dans les Alpes (Koulinski, 2005).

Pour cela :

- Nous pouvons, tout d'abord, tenter de définir le type de lave (visqueuse, liquide..) rencontrée en 2005. Les hauteurs sont fixées (à 3 mètres) au niveau des deux points explicités précédemment et on effectue une variation grossière du rapport

τ_c/ρ , balayant ainsi les classes de laves. Les résultats obtenus sont explicités dans le tableau suivant :

τ_c/ρ (m^2/s^2)	< 1	1,5	2
Nature de lave	Fluide	Moyenne	Visqueuse
Q obtenu (m^3/s)	>1500	56	0.08
Vitesse obtenue (m/s)	>16	0,6	0

Tableau 20 : Estimation des paramètres rhéologiques des laves de l'Abéous

Ce tableau nous donne la preuve qu'on peut, en tout état de cause, écarter l'hypothèse de laves fluides et visqueuses pour la crue de 2005. Une analyse plus fine reste à entreprendre pour obtenir un bon ordre de grandeur.

- Une gamme beaucoup plus importante de valeurs est ensuite testée sur un intervalle, du rapport τ_c/ρ , beaucoup plus affiné [$1,2 - 1,5 m^2/s^2$], et pour des débits variant entre 150 et 350 m^3/s . Les valeurs qui donnent le plus de crédit aux observations de terrain (hauteur principalement) mais aussi littéraire - vitesse minimum de l'ordre de 2 m/s par exemple (Meunier, 1991) – pour la crue de 2005, sont les suivantes :

$$\tau_c/\rho \approx [1,3 - 1,4 m^2/s^2] \text{ et } Q \approx [200 - 250 m^3/s]$$

3. Conditions d'écoulement sur la partie aval du chenal d'écoulement (aval des gorges)

a) Analyse générales du profil en long

Les crues de 2003 et 2005, bien que violentes, n'ont engendré que des dégâts limités avec peu de débordement. Les éléments précédents nous permettent maintenant d'envisager la simulation d'évènements exceptionnels correspondant à des débits encore supérieurs mais en faisant l'hypothèse du maintien des paramètres rhéologiques calculés précédemment. Dans ces conditions, il est possible d'établir un schéma permettant une bonne visualisation des zones débordement

Le graphique suivant permet une bonne visualisation des zones de débordement. En effet, ce n'est pas l'altitude qui est représentée en ordonnée, mais la différence d'altitude de l'écoulement et des berges (RG : rive gauche et RD : rive droite) par rapport au fond.

Les zones de débordements sont repérées par le schéma suivant :

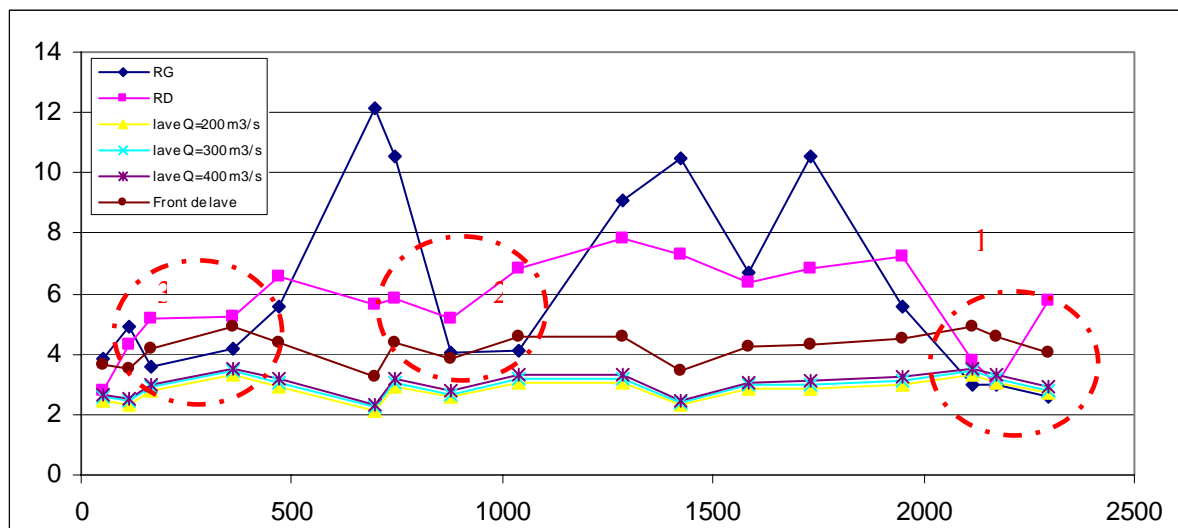


Figure 15 : Différence des hauteurs des laves par rapport au sol

Interprétation des résultats :

D'une manière générale, les berges, sur l'ensemble du cône de déjection de l'Abéous, sont très hautes ce qui canalise les écoulements sur une très longue distance. D'autre part, le corps de lave semble s'écouler sans trop de problème et c'est surtout le front de lave qui est susceptible de causer des problèmes majeurs.

Trois zones sensibles ont été mises en évidence. Elles sont explicitées dans le paragraphe suivant.

Ces résultats donnent des ordres de grandeurs satisfaisant avec les observations des hauteurs d'écoulement lors de la crue de 2005. Il ne faut tout de même pas oublier qu'il ne s'agit pas d'un résultat exhaustif mais bien d'un ordre de grandeur pouvant aider à la réflexion

D'autre part, ces résultats ne prennent pas en compte l'effet des singularités mais ils permettent, quand même, d'obtenir une approximation raisonnable de la hauteur du corps de la coulée. Les principales difficultés semblent se positionner tout à fait à l'amont, et tout à fait à l'aval, du cône de déjection.

Remarque : La formation de laves plus visqueuses est une hypothèse qui ne doit pas être écartée. Les hauteurs d'écoulement seraient alors encore plus importantes et les vitesses beaucoup plus faibles

b) Enjeux et aléas au niveau des zones de débordement

- ◆ Zone 1 : (Cette zone se localise au niveau du profil en travers 160)

A l'aval du barrage B3, le profil en travers du torrent offre une opportunité aux écoulements de déborder en rive gauche. Comme nous le montre le graphique suivant, une fois la hauteur de berge franchie, la présence de points bas canalise l'écoulement dans un sous bois de débordement pour revenir ensuite vers le torrent. Pour une crue exceptionnelle, nous pouvons évaluer une hauteur de l'ordre du mètre cinquante sur ce terrain de débordement, ce qui est bien suffisant pour arracher certains arbres fragiles. Une reconnaissance de terrain nous permet de confirmer cette hypothèse de calcul par l'observation de blocs disséminés dans la végétation et révélant le passage du torrent de manière répétitive. Cependant les arbres ne sont pas bien gros et les risques d'embâcles pour l'aval sont tout de même très limités.

De plus, la digue positionnée à l'amont immédiat du barrage B2 possède une côte suffisamment haute pour contrer de tels écoulements.

Enfin, les hauteurs de laves au niveau du passage à gué sont conséquentes du fait du rétrécissement du chenal d'écoulement. Ceci entraîne un débordement rive droite sur le chemin mais sans conséquence.

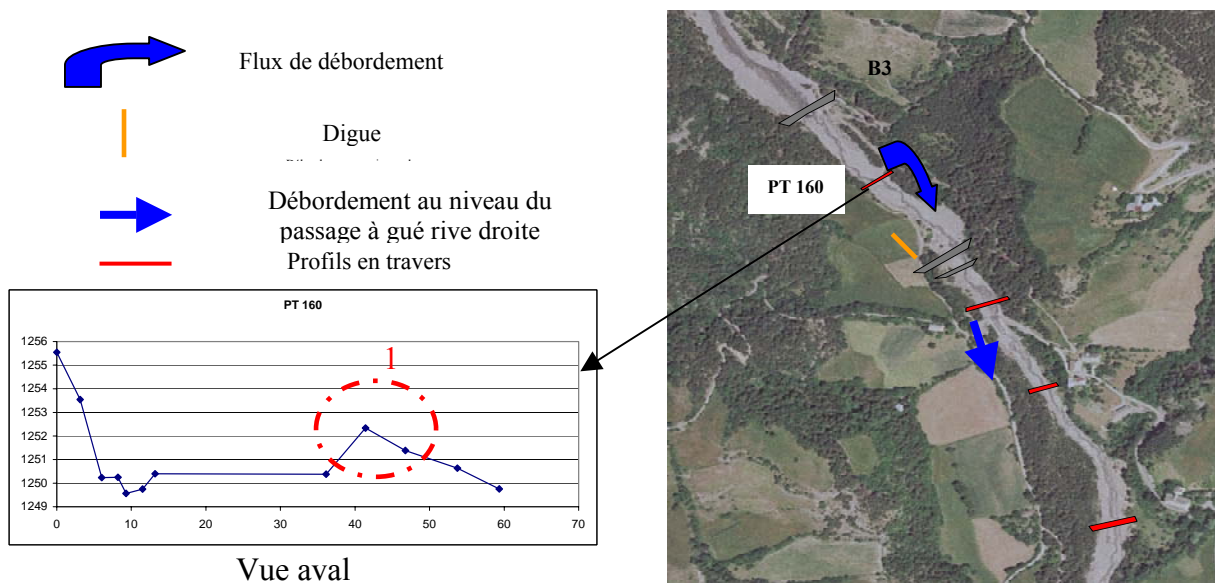


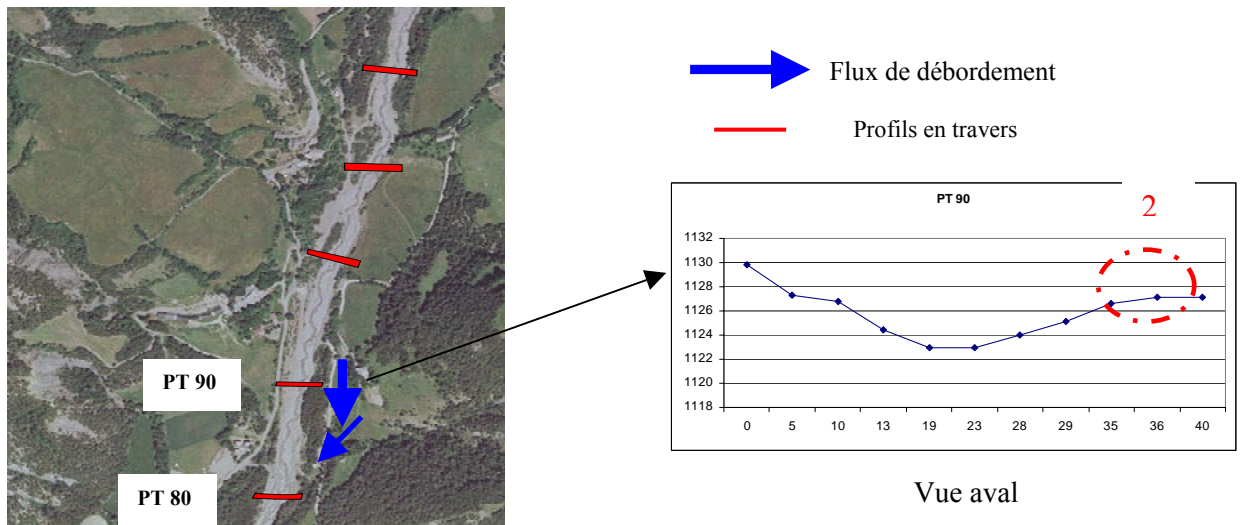
Figure 16 : Localisation des débordement en tête du cône de déjection

◆ Zone 2 :

Elle se positionne entre les profils en travers 80 et 90

Les débordements, rive gauche, n'ont que très peu de conséquences car aucune habitation n'est présente. Il faut toutefois noter qu'à cet endroit, l'été, une buse est entreposée en travers du torrent ce qui crée un ralentissement des laves et aggrave donc la hauteur d'écoulement. Un dépôt conséquent d'anciennes crues y est bien visible sur les deux rives. Un débordement, en rive droite, en direction de la route ne semble donc pas tout à fait exclu si, d'aventure, cet exhaussement se poursuit.

Figure 17 : Localisation des débordements au niveau des Trons



◆ Zone 3 :

Cette zone prend place au niveau des profils en travers 30 et 40 (PT 30 et PT 40).

Le débordement s'effectue de manière significative en rive gauche. Sur cette dernière, des blocs épars sont disséminés entre des pins de faible envergure. Il s'agit visiblement d'une ancienne bande active ou de débordements répétitifs du torrent. Ce débordement est soutenu par le témoignage des riverains qui affirment que la maison la plus proche du torrent, située sur cette même rive, avait déjà été balayée de gravas. D'autre part, il est fort probable que cet écoulement ne s'arrête pas gentiment au bord de la route car cette dernière n'est presque pas surélevée par rapport au sol de la zone de débordement. Le flux de matériaux pourrait prendre alors, dans un scénario catastrophe, la direction de la future maison du bois de Méolans.

D'autre part, à l'amont immédiat du pont de la départementale 900, le corps de lave peut atteindre environ trois mètres, si ce n'est plus en comptant les singularités non prises en compte par le logiciel (ce qui rend les résultats plutôt optimistes). Ainsi, le front de lave peut atteindre 4,50 à 5 mètres, c'est-à-dire la hauteur maximale du pont. Cette dernière valeur est obtenue sur une section plutôt large (17 mètres environ) et le rétrécissement est notoire au passage sous le pont. Il fait, en effet, 11 mètres de large et la section diminuant, pour un même débit, ceci conduit, pour un phénomène vraiment exceptionnel, à une submersion du pont. Pour des épisodes moins violents, comme pour la crue de 2005 par exemple, bien qu'un placage soit à dénoter au niveau du tablier, l'écoulement réussi tout de même à passer de manière vraiment limite. Vu l'importance que constitue cet axe routier pour la vallée de l'Ubaye, il est important d'abaisser de manière significative l'écoulement de la lave à ce niveau du profil en long.

Enfin, tout à fait à l'aval et à l'amont immédiat de la confluence avec l'Ubaye, un léger débordement est à relever sur une ancienne bande active du torrent sans conséquence notable.

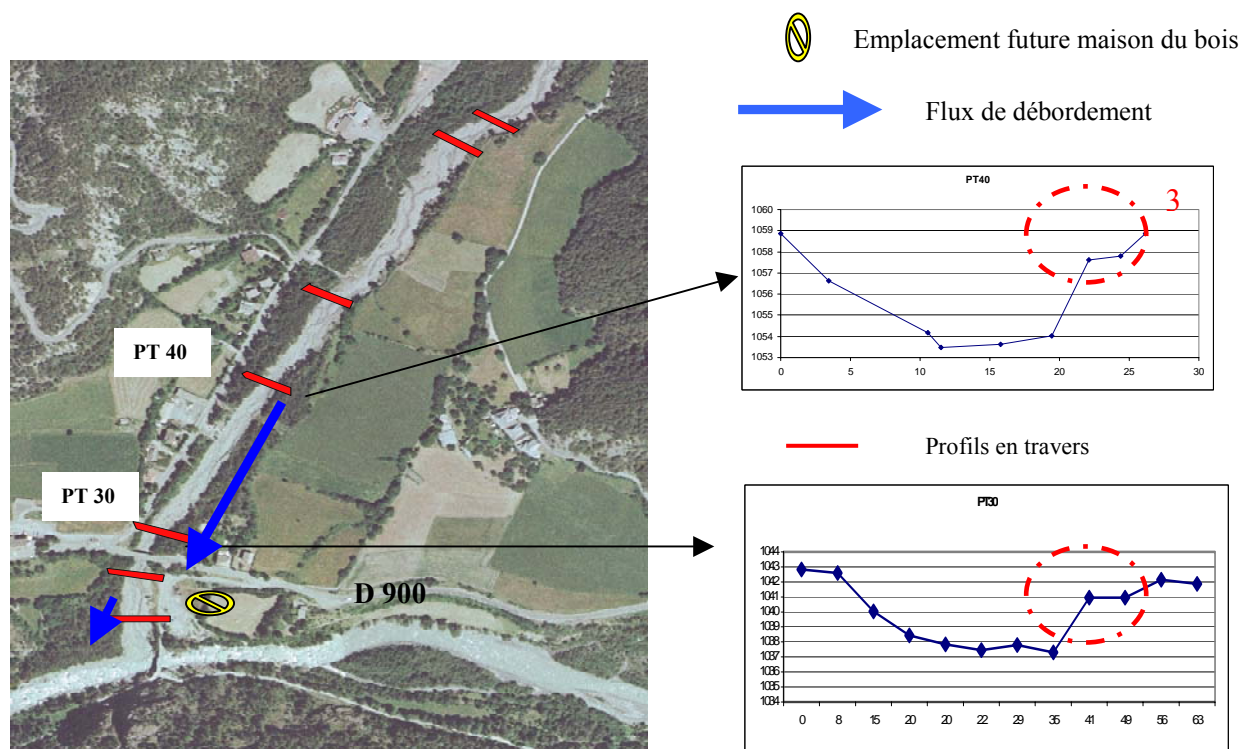


Figure 18 : Localisation des débordements dans la partie aval du cône de déjection

4. Bilan

Comme nous l'avons vu, le phénomène de lave torrentielle est l'aléa posant le plus de problèmes dans le torrent de l'Abéous. D'une manière plus fine, les points mis en exergue sont les suivants :

a) Volume solide et érosion :

Les apports en matériaux, que ce soit des berges ou des versants, sont considérables et il est nécessaire de les limiter. Cette limitation peut se faire à l'amont en utilisant alors une correction que l'on qualifie d'active (son efficacité ne pourra pas être complète dans ce torrent vue l'ampleur du phénomène), soit à l'aval avec une correction passive (plus adaptée ici). La situation est particulièrement préoccupante à l'amont de la plage d'atterrissement du barrage B3. Il est prévu d'y construire, à l'amont, un quatrième barrage afin de rehausser le lit et de consolider la pente d'écoulement, ce qui limiterait les déstabilisations de berges.

D'autre part, l'incision du lit de l'Abéous, au bas de la ferme « La Maison Blanche », provoque un sapement important en pieds de berges et un effondrement important de celle-ci. Une limitation de cette érosion est incontournable afin de stopper une éventuelle aggravation des futures laves.

Enfin, l'Abéous cause de sérieux dysfonctionnements dans la dynamique torrentielle de l'Ubaye. Une aggravation des débordements, en rive droite de l'Abéous, est une conséquence d'une telle situation. Cette dernière ne pourra pas significativement s'améliorer sans une modification notable de la zone de confluence.

b) Les débordements

En partie amont du cône de déjection, ils sont très limités et les conséquences quasi inexistantes. Ces derniers permettent, en outre, un stockage relatif du volume solide dans une zone de débordement naturel. Une protection à ce niveau ne semble donc pas judicieuse. Des

risques de formation d'embâcles sont possibles du fait d'un débordement probable dans des parties boisées mais ils restent, tout de même, faibles de part la taille réduite des arbres. Au contraire, dans la partie aval, les risques sont très présents et particulièrement en rive gauche, à l'amont immédiat du pont de la CD 900. La future maison du bois et une habitation se trouvent sur le chemin de cet écoulement et un confinement de la lave est essentiel. Enfin, en cas d'épisode exceptionnel, le pont et la route départementale 900 sont menacés de sérieux endommagements.

Mémento « Conditions d'écoulement »	
<p style="text-align: center;">Méthodologie</p> <ul style="list-style-type: none"> • <u>Charriage</u> : <p style="text-align: center;"><i>Outil de modélisation</i> : EFL vs 4 <i>Démarche suivie</i> : Calculer, en des points critiques, la hauteur d'exhaussement du lit par le logiciel EFL vs 4. Puis évaluer la hauteur d'eau en ce même point et la comparer à la hauteur de berges.</p> <ul style="list-style-type: none"> • <u>Laves torrentielles</u> : <p style="text-align: center;"><i>Outil de modélisation</i> : Lavfoprtn <i>Démarche suivie</i> :</p> <p>Détermination des conditions rhéologiques propres au bassin d'étude à partir d'observation de crues précédentes. Estimation des débits par la méthode de Meunier. Simulation, aux conditions rhéologiques fixées précédemment, d'évènement exceptionnels et comparaison des hauteurs d'écoulement par rapport aux berges.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Localisation des zones de débordement et analyser si des enjeux sont présents. 	<p style="text-align: center;">Correspondance sur l'Abéous</p> <ul style="list-style-type: none"> • <u>Charriage</u> : <p>Aucun problème majeur de débordement n'est à dénoter. La maison du bois ne devrait pas être touchée par ce type de phénomène.</p> <ul style="list-style-type: none"> • <u>Laves torrentielles</u> : <p>À partir des hauteurs des crues de 2003 et 2005 nous évaluons les paramètres rhéologiques des laves de l'Abéous :</p> <p style="text-align: center;">$\tau_c/\rho \approx [1,3 - 1,4 \text{ m}^2/\text{s}^2]$ Débits probables : [100 à 400 m³/s]</p> <ul style="list-style-type: none"> • <u>Débordements</u> : <p>Simulés pour des crues exceptionnelles, ils sont localisés sur trois zones, et concernent principalement le front de lave. Enjeux présents uniquement à l'aval du cône d'éjection, en rive gauche, nécessité de protection car présence d'une maison, du pont et de la future maison du bois. Maintien des zones de débordements naturelles</p>

Tableau 21 : Mémento « Conditions d'écoulement »

F. Proposition d'aménagements

1. Possibilités

Au niveau pratique, le bassin versant de l'Abeous ne se situe ni dans des ZNIEFF (Zones Naturelles d'Intérêt Ecologique, Faunistique et Floristique) ni dans des sites NATURA 2000 du type ZSC (Zone Spéciale de Conservation) ou encore SIC (Site d'Importance Communautaire).

Plusieurs actions, plus ou moins complémentaires, peuvent être envisagées afin de limiter les problèmes rencontrés sur le torrent de l'Abéous :

a) Limitation des apports solides

La solution de protection active, de la partie amont du bassin versant, est envisageable mais est rendu très délicate du fait des travaux pharaoniques que demande une telle lutte contre l'érosion. Les trois barrages édifiés semblent très efficaces au vu des dépôts engendrés sur les plages d'atterrissement. Cependant ce nombre très limité ne permet pas de stopper la progression générale de la lave. Afin que l'action soit plus efficace dans le futur, une augmentation du nombre de ces ouvrages semble inévitable. Des reboisements sont en cours dans la partie haute du bassin, afin de limiter le ruissellement, et cette action, vraiment très efficace à terme, doit être poursuivie.

La constitution d'une plage de dépôt à l'aval des trois barrages permettrait de ralentir sensiblement l'écoulement des laves et ainsi favoriserait les dépôts de matériaux. L'entretien est assez contraignant mais le coût des curages peut être restreint par la valorisation des matériaux (expertise en cours). La pente constante et soutenue du torrent sur le cône de déjection favorise un transit actif et une telle solution semble être particulièrement adaptée sur ce torrent.

Un élargissement du lit en partie médiane du cône, où les phénomènes d'incision et de réduction du lit sont les plus marqués, peut aussi être envisagé afin de lutter contre la propagation des laves. En effet, une augmentation soudaine de la largeur du lit permet de limiter les hauteurs et vitesses d'écoulement et, par la même occasion, d'augmenter la capacité au dépôt (Péteuil, 2005). D'autre part, une telle solution apparaît tout à fait naturelle si l'on n'oublie pas le fait que le lit du torrent était beaucoup plus étendu dans le passé (Cf. annexe 12).

De même, le cône de déjection, à l'aval du pont, doit être considérablement élargi afin que le dépôt s'effectue prioritairement dans l'Abéous et que les flux de matériaux soient limités pour l'Ubaye. Une modification de l'angle d'arrivée de ce flux semble être le corollaire d'un tel élargissement pour éviter un engravement important sous le pont de la RD 27.

b) Limitation des débordements

En partie amont du cône de déjection : aucun aménagement n'est à prévoir. La digue, située à l'amont du barrage B2 en rive droite, joue un rôle très efficace contre les débordements et semble particulièrement bien adaptée à des crues exceptionnelles.

Les débordements, bien que très rares sur l'Abéous, peuvent être lourds de conséquences et se situent sur une distance bien limitée. De l'amont immédiat du pont de la route départementale 900 jusqu'à l'Ubaye, ces débordements seraient dus à des berges de hauteurs insuffisamment élevées. Une modification de leur caractéristique doit être envisagée.

Un entretien du lit est aussi inévitable. Il consiste à curer, en partie aval, le fond du lit après chaque épisode de fort dépôt, mais aussi à entretenir la végétation bordant immédiatement le torrent afin de limiter les risques d'embâcle.

2. Aménagements proposés

a) Plage de dépôt

(Carte de localisation de l'aménagement en *annexe 19* et schéma de principe en *annexe 18*)

Positionné à l'aval immédiat du passage à gué, cet aménagement est destiné à provoquer, par élargissement brutal du lit, un dépôt de matériaux avant que ces derniers ne se retrouvent à l'aval, c'est à dire dans la zone à enjeux.

Le lit de l'Abéous serait considérablement agrandi, passant dans certaines zones d'une largeur de 10 mètres à 75 mètres après aménagement et ce, sur une longueur de 700 mètres environ. Cette différence de largeur est vraiment très marquée ce qui minimisera la hauteur d'écoulement et engendrera, à coup sûr, le dépôt de blocs de tailles conséquentes. La création d'élargissements brutaux, sur toute la longueur modifiée, afin de perturber au mieux la trajectoire des laves, est conseillée.

Afin de garantir un écoulement permanent loin de zones d'érosion en rive gauche, et dans le but de ne pas modifier les conditions hydrauliques au niveau de l'Ubaye hors période de crues, le lit mineur de l'Ubaye sera maintenu à 15 mètres de large, valeur moyenne relevée sur les profils en travers dans cette zone.

D'autre part, afin de limiter les risques de changement de lit pour les crues fréquentes du torrent, une revanche doit être créée pour limiter leurs débordements. Cette dernière doit donc être suffisamment haute pour canaliser les écoulements permanents mais aussi afin de s'assurer de sa solidité. Cependant, elle ne doit pas être trop haute car, sinon, le débordement des laves torrentielles ne serait plus efficace. Vu les hauteurs des laves de 2003 et 2005, qui atteignaient en moyenne 3 mètres (pour le corps de lave), et de la hauteur d'une crue décennale qui ne dépasse pas 1,5 mètres (exhaussement du lit compris), une hauteur de 1 mètre semble être un bon compromis.

Des enrochements bétonnés doivent être disposés, au niveau des rétrécissements et des zones où l'érosion est déjà bien entamée, comme c'est le cas au droit de la « Maison Blanche. En effet, bien que cette dernière soit alors située dans la zone de débordement, l'écoulement de la lave pourrait créer une déstabilisation des berges et un effondrement susceptibles de réactiver le phénomène.

Enfin, dans l'optique de s'assurer d'une zone de dépôt dès que le débordement en lit majeur est effectif, une atténuation de la pente du profil en long est envisagée. De manière générale, la pente moyenne serait sensiblement équivalente l'actuelle, c'est-à-dire entre 8 et 9%. Une pente aménagée sur la plage de dépôt, d'environ 5 à 6%, serait un bon moyen pour que la lave s'essouffle naturellement.

Avantages et inconvénients d'un tel aménagement :

Aspects positifs de l'aménagement	Aspects négatifs d'un tel aménagement
<ul style="list-style-type: none">• Limitation des apports solides vers l'aval.• Ouvrage réalisé exclusivement en terrassement : faible coût, possibilité de modifier sa structure en cas de disfonctionnement.• Largeur retrouvée des photos aériennes de 1954 et 1972 : retour à un état naturel du torrent avant la présence des barrages.• Perturbe peu le milieu naturel et l'Ubaye du fait de la conservation de la largeur du lit mineur.• Valorisation probable des matériaux.	<ul style="list-style-type: none">• Efficacité vraisemblablement moins importante qu'une véritable plage de dépôt réalisée en maçonnerie beaucoup plus coûteuse.• Changement de lit du torrent en rive droite.• Entretien de la plage de dépôt et du merlon central permettant à l'écoulement de rester en rive droite.

Tableau 22 : Récapitulatif des avantages et inconvénients de la plage de dépôt

Capacité de stockage :

Considérant une hauteur moyenne de 1,50 m d'enfoncement, au niveau de la zone de débordement, on peut tenter de calculer les volumes potentiellement stockables sur ce tronçon avec les hypothèses suivantes :

- Hauteur de dépôt comblant la revanche, de 1,50 m de haut en moyenne.
- Largeur de la plage d'atterrissement de 40 mètres en moyenne.
- Longueur total de la section modifiée : 700 m.

De ces hypothèses, nous pouvons aisément calculer le volume stockable jusqu'à atterrissement de la zone jusqu'à la revanche. Le volume obtenu est de 42 000 m³, soit un peu près la moitié du volume d'une lave de période de retour centennale. Cette valeur reste un ordre de grandeur, mais elle nous informe sur la capacité de stockage apparente d'un tel aménagement. Dans la situation réelle, le débordement de la lave peut être beaucoup plus conséquent, avec accumulation de matériaux sur une hauteur encore supérieure, mais il peut aussi être moindre dans le cas d'une lave particulièrement fluide s'arrêtant difficilement, ce qui n'est pas à exclure.

b) Rehaussement de berge

Comme nous l'avons vu précédemment, le point critique des débordements se situe à l'amont immédiat du pont de la route départementale 900, en rive gauche. Depuis le placage de la crue de 2005 sur la passerelle, protégée correctement à son pied par un enrochement, le maire l'a surélevé d'une quatre vingtaine de centimètres ce qui est suffisant pour faire transiter les crues futures. La situation actuelle de la rive gauche est schématisée ci après :

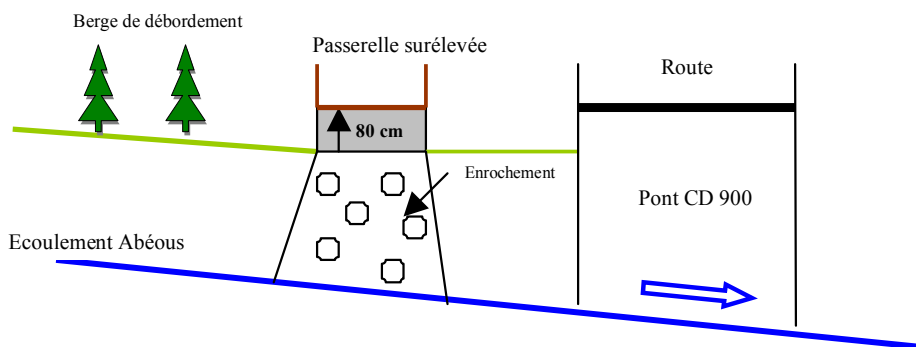


Figure 19 : Représentation de la situation actuelle au niveau du pont de la CD 900

Des débordements ont déjà été recensés au niveau de la rive gauche et la route a déjà été légèrement engravée par le passé. Bien que le lit de l'Abéous se soit profondément incisé à ce niveau du fait, entre autre, des curages répétitifs (débutés en 1976), après chaque crue, le plâtrage relevé sur le pont révèle des hauteurs considérables de laves torrentielles sur ce torrent. Bien que les phénomènes de 2003 et 2005 soient très importants au niveau de leur amplitude, nous ne pouvons écarter l'hypothèse de crues encore plus importantes, ou la succession de crues similaires dans un intervalle très court, qui causeraient alors un débordement certain. Ainsi, spécifiquement dans cette zone à risque, la berge doit être rehaussée. De manière logique, nous utiliserons la hauteur actuelle de la passerelle comme mise à niveau du terrain naturel. Cette mise à niveau sera conduite sur une distance de 10 mètres (minimum) à l'amont de la passerelle afin de rejoindre une zone de berges hautes. De plus, une protection en enrochement doit être ajoutée afin de stabiliser un tel aménagement.

Le schéma de l'aménagement est le suivant : les modifications sont dessinées en rouge.

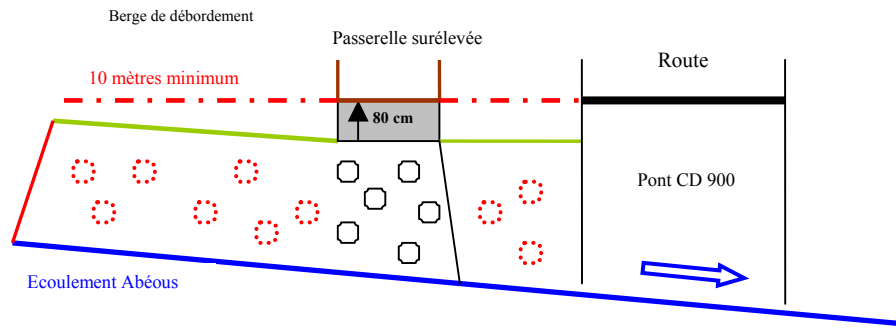


Figure 20 : Visualisation de l'aménagement au niveau du pont de la CD 900, vue de profil

Cet aménagement n'a pas de sens si, à venir, le niveau du fond du lit de l'Abéous augmente. C'est pourquoi les curages après chaque crue doivent être maintenus.

Les risques de débordement du torrent en rive gauche, à l'amont de cette zone, sont très peu probables et semblent possibles qu'en cas d'évènement extrêmement violent. Cependant, la présence d'une habitation, de la route et de la future maison du bois, dans le flux hypothétique de débordement, nous poussent à envisager la construction d'un merlon en terre qui dévierait ces écoulements dans l'Abéous. Celui-ci prendrait place à droite du chemin d'accès au champ surplombant la maison. Le schéma suivant explique de manière visuelle un tel aménagement : vue de dessus

La rive droite semble moins exposée au débordement. En effet, bien qu'elle ne soit pas vraiment plus haute que la gauche, la présence d'une faible courbure expulse préférentiellement les écoulements sur le côté gauche. Cependant, la destruction de la canalisation, en rive droite du pont, illustre un danger très présent. De plus, l'édification de l'aménagement précédent peut provoquer, en cas de crue extrême, un flux conséquent vers la rive droite. C'est pourquoi il est recommandé de rehausser légèrement la rive droite à ce niveau (environ 50 cm).

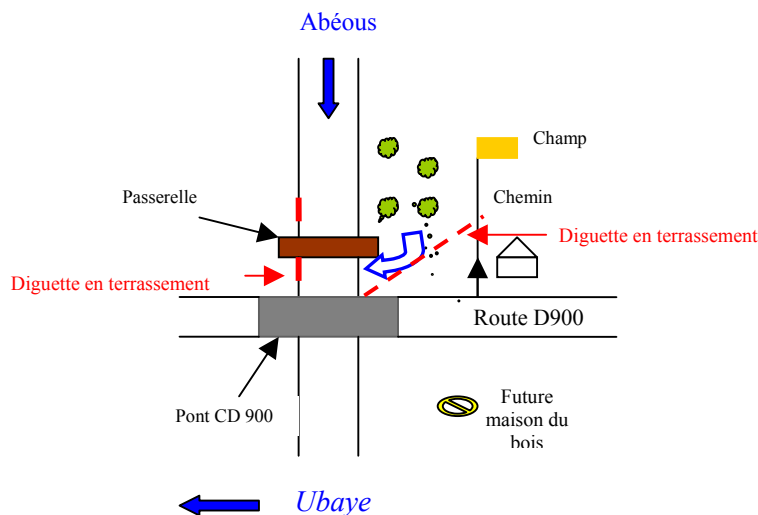


Figure 21 : Visualisation de l'aménagement au niveau du pont de la CD 900, vue de dessus

Il faut dénoter que l'élaboration de la plage de dépôt constitue l'élément déterminant permettant une diminution significative de l'ampleur de la lave torrentielle arrivant au niveau du pont de la départementale 900. Un abaissement de la hauteur d'écoulement et donc, du risque de débordement, est donc à prévoir dans cette zone ci.

Aspects positifs de l'aménagement	Aspects négatifs de l'aménagement
<ul style="list-style-type: none"> • Limitation des débordements sur les deux rives : protection habitation et route départementale 900. • Légèreté du dispositif : des merlons en terre sont suffisants. • Action ponctuelle : ne perturbe pas l'ensemble du cours d'eau. 	<ul style="list-style-type: none"> • Enrochements supplémentaires nécessaires. • Protection envisagée pour des crues exceptionnelles dont les effets ne seront peut être pas connus par la génération active.

Tableau 23 : Récapitulatif des avantages et inconvénients de l'aménagement au niveau du pont de la CD 900

c) Aménagement de la confluence

Afin de favoriser le dépôt avant que les matériaux ne se retrouvent directement propulsés dans l'Ubaye, et en complément de la construction de la plage de dépôt, un élargissement soudain du lit de l'Abéous est conseillé à l'aval immédiat du pont de la route départementale 900 et ce, sans modification de pente. Cet aménagement est techniquement réalisable en rive droite car une ancienne plage de débordement - ou d'écoulement permanent - se situe sur une largeur de 25 mètres en moyenne après la berge. Il est, de plus, possible d'incurver légèrement le lit modifié afin que les laves de l'Abéous ne confluent plus sous un angle de 90° avec l'Ubaye. Ainsi éloigné du pont de la route de Méolans, l'Abéous aura moins tendance à obstruer le cours de l'Ubaye. De même, du côté de la maison, la réduction de la hauteur du phénomène limitera les débordements. Les schémas révélant un tel dispositif sont dessinés en annexe 18 (les aménagements sont en rouge).

Avec l'augmentation de la section du lit, une diminution de la hauteur d'écoulement est à prévoir. La hauteur de berge en rive gauche, qui varie aux alentours des 4 mètres, est suffisamment élevée afin de faire transiter les laves d'occurrence exceptionnelle. En rive droite, cependant, la constitution d'une berge, en tout venant, de hauteur similaire est à prévoir (largeur au sommet : 3m & fruit :3/2). En effet, l'élargissement de ce tronçon provoque un rapprochement de l'écoulement de la maison et une protection maîtrisée et efficace de cette dernière est attendue. D'autre part, la pente du chenal ne doit pas être modifiée. En effet, sa valeur oscille autour des 10 %, ce qui favorise la propagation de l'écoulement vers l'Ubaye et limite, de ce fait, les risques de dépôts et, par la même occasion, les débordements.

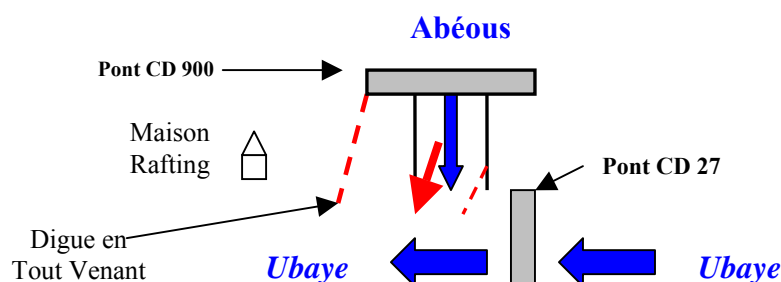


Figure 22 : Vue de dessus de l'aménagement de la confluence

En cas de dépôt massif, la capacité de stockage en matériaux se trouve alors considérablement augmentée à l'aval du pont, ce qui limite les risques de débordement à l'amont de ce dernier. En supposant une hauteur de remplissage de cette portion égale à 3 mètres (ce qui était le cas en 2003) la capacité de stockage de matériaux passe de 9000 m³ à 15 000 m³ environ.

Aspects positifs de l'aménagement	Aspects négatifs de l'aménagement
<ul style="list-style-type: none"> • Modification de l'angle de la confluence : diminution de l'effet « barrage » de l'Abéous. • Augmentation de la capacité de stockage en matériaux limitant les débordements amont. • Diminution de la hauteur d'écoulement et des risques de débordement en cas d'épisodes exceptionnels. • Légèreté des travaux : terrassements, coût faible. 	<ul style="list-style-type: none"> • Rapprochement du torrent vers la maison, rive droite : nécessité de former une berge suffisamment haute et solide.

Tableau 24 : Récapitulatif des avantages et inconvénients de l'aménagement au niveau de la confluence

Là encore, un tel dispositif est réellement efficace qu'en complément des aménagements précédents. Dans le cas de la formation d'une lave très fluide, par exemple, cette dernière aura plutôt tendance à transiter dans le chenal d'écoulement et le dépôt, engendré au niveau des Trons, ne serait alors pas vraiment conséquent. La conception de cet aménagement permettra alors à l'Ubaye une meilleure reprise des matériaux à la confluence. A l'inverse, un tel dispositif ne peut être suffisant, en cas de formation de lave visqueuse, du fait d'une capacité de stockage qui reste limité à cet endroit.

D'une manière générale, c'est le cumul de ces trois aménagements qui résoudre la majeure partie des problèmes rencontrés dans le torrent de l'Abéous

d) Dispositif d'alerte

◆ Objectifs

Les personnes susceptibles d'être touchées par les crues de l'Abéous sont :

- Les automobilistes de la RD 900.
- Les usagers de l'Ubaye et particulièrement les personnes pratiquant les sports d'eaux vives.

Afin de protéger ces personnes susceptibles d'être perturbées par la formation de laves torrentielles, il semble nécessaire de disposer d'un dispositif d'alerte qui aura deux vocations :

- Couper la route, dans les deux sens de circulation, avant que les automobilistes ne passent sur le pont, ce qui les protégerait d'un éventuel débordement.
- Arrêter les embarcations à l'amont du pont de Revel.

◆ Choix du dispositif d'alerte

Les qualités requises pour l'élaboration d'un tel dispositif d'alerte sont la simplicité et l'efficacité. De nombreux systèmes existent et peuvent parfois être très complexes, comme les sondes à ultrasons par exemple. Leur but général est d'évaluer, en un point donné du torrent (généralement le plus éloigné possible de la zone d'enjeux), une perturbation anormale des conditions d'écoulements, c'est-à-dire la hauteur ou encore les débits.

Un système simple et efficace, ayant déjà fait ses preuves sur le glissement de terrain de la Valette, consiste en une détection par fils tendus en travers du chenal d'écoulement de

l'Abéous. L'arrachement d'un des fils, au passage d'une lave, déclencherait alors le signal d'alarme. On préférera le mode de transmission de l'alerte via un système téléphonique classique à un système GSM, plus délicat à utiliser et plus sensible aux parasites. L'alimentation électrique peut s'effectuer via l'installation de panneaux solaires mais il semble préférable, pour la pérennité du système, d'utiliser une ligne EDF classique. Ce raccordement est d'autant plus faisable qu'une maison se situe non loin du barrage B3 (Cf. ci après).

◆ Choix du site

Le positionnement du dispositif est une étape décisive. Il faut, en effet, qu'il ne soit pas trop situé à l'aval, au risque de n'avoir pas suffisamment de temps pour avertir, mais aussi pas trop éloigné, afin de ne pas déclencher l'alerte pour des laves modestes pouvant s'essouffler rapidement sur le cône de déjection. La présence d'une cascade naturelle au niveau des gorges, à l'amont du barrage B3, est un lieu idéal, car elle fournit un point dur permettant de s'assurer du tarage du dispositif permettant de détecter une certaine hauteur de lave. Comme nous l'avons vu dans cette étude, la formation des laves se situe à l'amont immédiat de ces gorges dans lesquelles elles se renforcent en matériaux. La position médiane du dispositif lui permet donc de détecter des laves qui sont déjà d'une ampleur considérable et dont le devenir sera de transiter sur le cône de déjection. Cette cascade prend place à 3300 mètres de la confluence ce qui laisse supposer un temps confortable pour alerter les usagers.

◆ Localisation de la signalisation

Les vitesses des laves peuvent varier de manière significative selon leurs rhéologies. Il est bien évident que des laves très fluides se propageront bien plus rapidement que des laves très visqueuses. Les calculs réalisés précédemment nous permettent d'affirmer que la majorité des laves de l'Abéous possède des vitesses comprises entre 2,5 et 5,5 m/s. Bien qu'à caractère assez fluide dans l'ensemble, on ne peut écarter l'hypothèse de formation de laves encore plus fluides. C'est pourquoi nous nous placerons dans le pire des cas, c'est-à-dire à une vitesse correspondant à une lave fluide de 6 m/s. Nous supposons, de plus, que cette vitesse est constante sur tout le cône de déjection, ce qui va encore dans le sens de la sécurité du fait de la diminution, même modeste, de la pente du chenal jusqu'à la confluence. Ainsi, pour parcourir les 3300 mètres, la lave mettrait 9 minutes.

Système d'alerte pour les usagers du pont :

Une distance de 30 mètres, avant d'arriver sur le pont, semble nettement suffisante afin d'anticiper de probables débordements à ce niveau là. La signalisation prendrait la forme de quatre panneaux avertisseurs sur les deux voies de circulation. Les premiers seront situés à 150 mètres environ afin d'alerter du possible danger et de la présence des deuxièmes panneaux avec feux clignotant. Ces derniers seront accompagnés de barrières intégrales qui se déclencheront immédiatement après le passage de lave au niveau du dispositif.

Système d'alerte pour les usagers de l'Ubaye :

La difficulté principale relève de l'estimation de la vitesse moyenne des embarcations

Des stations hydrométriques de la vallée de l'Ubaye, on peut évaluer une fourchette de débits de l'Ubaye probablement rencontrée au niveau de la confluence avec l'Abéous au moment des crues. Les maximums prennent place aux mois de Mai et de Juin, c'est-à-dire lorsque la fonte des neiges est la plus importante. Au contraire les minimums se rencontrent au mois d'août pour lequel la fonte est achevée et les précipitations sont rares. De plus, il n'y a bien évidemment pas concomitance des crues et nous supposons donc que, lors de formation de laves torrentielles, le débit de l'Ubaye est égal à son débit moyen journalier.

L'intervalle obtenu est le suivant : $Q \text{ (m}^3\text{/s)} = [10 - 45]$ (Internet [6]). La largeur moyenne de l'Ubaye étant connue, tout comme la profondeur moyenne du cours d'eau correspondant à ces débits, l'évaluation des vitesses peut s'effectuer : $v \text{ (m/s)} = [0,5 - 1,2]$. La vitesse minimale sera utilisée pour évaluer la distance à laquelle on doit placer l'ultime panneau signalétique tandis que la valeur maximale sera utilisée pour évaluer la distance à laquelle on doit placer le premier panneau. Un rafting peut évoluer à une vitesse supérieure de celle du cours d'eau et il faut majorer la valeur maximale. On prendra alors 2 m/s.

Un rafting, évoluant à 0,5 m/s, parcourt, pendant 9 min, une distance de 270 mètres. Pour une vitesse de 2 m/s il effectue 1080 mètres.

Ainsi, il faudrait placer un signal et aménager une plage de débarquement à 200 mètres à l'amont de la confluence et un premier à 900 mètres à l'amont.

Mémento « Propositions d'Aménagement »	
<p style="text-align: center;"><i>Methodologie</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • <u>Buts poursuivis</u> : protéger les enjeux (humains et/ou matériels), limiter au mieux de perturber les conditions naturelles du torrent et de son confluent. Limitation des coûts pour un maximum d'efficacité. • <u>Moyens</u> : <p style="text-align: center;"><i>Protection active :</i></p> <p>Elle associe des travaux de génie civil (barrages dans le lit des torrents, banquettes sur les versants pour casser la pente) et des reboisements pour limiter au maximum les crues et retenir le sol.</p> <p style="text-align: center;"><i>Protection passive</i></p> <p>Des ouvrages comme les pièges à sédiments ou les digues, sont réalisés pour protéger les zones les plus sensibles, sans qu'on tente d'enrayer le phénomène à la source.</p>	<p style="text-align: center;"><i>Correspondance sur l'Abéous</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • <u>Enjeux à protéger</u> : Maison Blanche Pont CD 900 Maison rive gauche amont du pont Ubaye • <u>Méthodes de protection</u> <i>Protection active</i> inutilisée mais devant être poursuivie : reboisement (en cours), construction de nouveaux barrages. <i>Protection passive :</i> Construction d'une plage de dépôt limitant les apports solides vers l'aval. Augmentation des niveaux des berges rive gauche en amont du pont. Elargissement de la confluence et modification de l'angle de confluence. Protection des berges contre l'érosion. Curage du lit après chaque crue et entretien de la végétation

Tableau 25 : Mémento « Proposition d'Aménagements »

CONCLUSION GENERALE

L'objectif de cette étude était de parvenir d'une part, à élaborer une synthèse et une optimisation d'outils et de données utilisables en hydraulique torrentielle, et d'autre part, de présenter une étude hydraulique de « référence » qui servira de modèle au service RTM.

Après l'évaluation des outils et des données disponibles par le service RTM, et utilisables en hydraulique torrentielle, nous nous sommes attachés à élaborer une synthèse des données exploitables dans une étude hydraulique. Certains outils, déjà présents, ont du être optimisés et remis à jour par la création de logiciels pratiques, comme « Calcul Hydrologique », aisément utilisables par des non initiés. Le choix, des formules et des méthodes adaptées au contexte torrentiel, s'est réalisé au travers des dernières évolutions dans ce domaine et des démarches suivies par des hydrauliciens renommés (V. Koulinski, C.Péteuil...). Cette étape fut décisive car elle sert de base et fournit les armes nécessaires à la construction d'une étude hydraulique sur l'ensemble des torrents de montagne.

Nous avons effectué, ici, la construction et la présentation d'une étude hydraulique type, via le torrent de l'Abéous. Ce dernier présente, dans l'ensemble, toutes les caractéristiques et problématiques que l'on peut rencontrer dans un bassin versant de montagne.

D'une manière générale, la principale menace causée par les torrents est le risque de débordement sur les cônes de déjection urbanisés des massifs européens. L'Abéous ne déroge pas à la règle et de ce fait, l'élaboration d'une étude hydraulique vise à quantifier et à qualifier les désordres potentiels que peut causer le torrent sur son cône de déjection et à définir les moyens de s'en protéger. Comme nous l'avons vu, la logique d'une étude torrentielle suit celle pratiquée pour de l'hydraulique d'eau claire, à ceci près que plusieurs formes d'écoulements sont possibles compte tenu du transport solide. La première étape à franchir dans l'étude du fonctionnement du torrent est donc de déterminer le ou les types de transport solide rencontrés, les plus fréquents et les plus dommageables. Cela se traduit concrètement par la recherche des événements passés ainsi que par une analyse géomorphologique et hydrologique du site.

Outre la détermination des débits de projets, l'objectif final de cette dernière est de déterminer les hydrogrammes de crue pour différentes périodes de retour, utilisables afin d'évaluer le volume de matériaux apporté par le phénomène de charriage torrentiel, phénomène commun rencontré dans tous les torrents et toutes les rivières. Elle s'accompagne, dans le cas d'un torrent à laves, par une évaluation de leurs volumes susceptibles d'être transportés dans la zone à enjeux. La modélisation des phénomènes de transport solide rencontrés dans le torrent d'étude permet, alors, de déceler les zones devant être aménagées. Les aménagements proposés doivent tenir compte des conséquences sur le milieu naturel mais aussi de l'impact économique sur le budget de la commune.

D'un point de vue critique, l'ensemble des valeurs obtenues, via l'application de diverses méthodes, doit se rattacher aux spécificités du bassin versant par une approche que nous qualifierons de « terrain ». C'est particulièrement le cas pour l'estimation des volumes de laves et de ses paramètres rhéologiques. En effet, le phénomène de lave torrentielle n'est, encore de nos jours, pas bien connu et l'application de formules sommaires doit être comparée à des constatations réelles. L'utilisation, de photos, de témoignages ou encore l'approche géomorphologique (pour l'estimation des volumes érodables), permet souvent d'obtenir des ordres de grandeurs rattachables aux valeurs obtenues par simple application de formules.

Enfin les outils, les données et le plan édifiés dans cette étude ne sont pas exhaustifs. Le plus souvent, la méthodologie reste un peu près similaire sur l'ensembles des bassins versants de montagne. Cependant elle doit être modelée et adaptée aux spécificités de la zone d'étude.

Bibliographie

ANCEY C., **Note de synthèse sur la rhéologie des laves torrentielles**, Cemagref, 1999, 40 pages.

BOIRET P. et SCHWARTZ J. **Analyse de fortes pluies de 1 à 10 jours sur 3000 postes du Sud- Est de la France (rive gauche du Rhône et extrême SUD-EST)**. Programmation des travaux de RTM, CEMAGREF, Division Hydrologie-Hydraulique, Division Protection Contre les Erosions et Etudes d'Impact, décembre 1982. 200 pages.

BROCHOT S. **La prédiction des volumes de laves torrentielles : vers un modèle global sommaire pour les Alpes occidentales françaises ?** Mémoire soumis au Zeitschrift für Géomorphologie, février 2003. 16 pages.

BROCHOT S. **Les études de bassin versant torrentiel**. Version de travail, CEMAGREF, Division Protection Contre les Erosions, octobre 1996. 15 pages.

BROCHOT S., MARCHI L., LANG M. **L'estimation des volumes des laves torrentielles : méthodes disponibles et application au torrent du Poucet (Savoie)**. Article de revue interne « Bull Eng Geol Env », 2002. Pages 389 à 402.

COUSSOT P., **Rhéologie des boues et laves torrentielles. Etude de dispersions et suspensions concentrées**, Thèse de l'INPGrenoble. Etudes du Cemagref, série Montagne n°5. 1992, 416 pages.

DEYMIER Ch. et MATHYS N. **Etude hydrologique du bassin de l'Abéous (Alpes de Haute-Provence)**. Rapport d'étude, CEMAGREF, Groupement de Grenoble, Division Protection Contre les Erosions, août 1986. 13 pages.

DJERBOUA A. **Prédétermination des pluies et crues extrêmes dans les Alpes Franco-Italiennes-Prévision quantitative des pluies journalières par la méthode des Analogues**. Annexes à la thèse de doctorat, Institut National polytechnique de Grenoble, Spécialité « Mécanique des Milieux Géophysiques et Environnement », Laboratoire d'Etude des Transferts en hydrologie et Environnement, mai 2001, 200 pages.

GRUFFAZ F., **Guide d'utilisation de l'outil « Débits.xls »**, aide au travail pour le service RTM, 70 pages.

FAURE Dominique, GALEA Gilles, MATHYS Nicole, OBERLIN Guy, EDOUARD Jean-Louis, VIVIAN Huguette, **Synthèse cartographique des connaissances en crues observables dans le Sud-Est de la France**, Cemagref Lyon et Grenoble, CNRS, La Houille Blanche, N°5-91, p.349-364, 1991.

FLEZ C. **Le torrent de l'Abéous : Facteurs climatiques et anthropiques de la torrentialité holocène**. Mémoire de DEA, « Dynamique des milieux naturels et anthropisés passés et actuels », Université des Sciences et Technologies de Lille- UFR de Géographie et d'Aménagement- Laboratoire de Géomorphologie et Gestion des Milieux Naturels, septembre 2000. 110 pages.

GALEA G., **Hydrologie des crues de montagne – L'obtention des volumes de crue**. Cemagref Lyon – Division « Hydrologie et Hydraulique », Session de formation continue, Service RTM, Octobre 1993. 50 pages.

GROUPE SIEE, **Schéma d'aménagement global de la Blanche, Phase I : Etat des lieux-diagnostic- Volume 1**. Mémoire. Etude réalisée pour le compte du SIVOM du Canton de Seyne les Alpes, Décembre 2001. 94 pages.

HUNGR O., MORGAN G.C, VAN DINE D.F., **Quantitative analysis of debris torrent hazards for design of remedial measures**. Canadian Geotechnical Journal 21, 1984, pages 663-677.

KOULINSKI V. –Bureau d'Etudes ETRM- **Etude hydraulique du pont des Graves sur le Riou Bourdoux-R.D.9**. Rapport d'étude, Etude menée pour le compte du Conseil Général des Bouches du Rhône, décembre 2005. 33 pages.

KOULINSKI V. –Bureau d'Etudes ETRM- **Etude hydraulique du Torrent de la Maure sur son cône de déjection**. Rapport d'étude. Etude réalisée pour le compte de la commune d'Uvernet-Fours, Service RTM des Alpes de Hautes Provence, janvier 2003. 35 pages.

KOULINSKI V. –Bureau d'Etudes ETRM- **Etude de la protection du camping de Bel Iscle contre les crues**. Rapport d'étude. Etude réalisée pour le compte de la commune St Paul sur Ubaye, Service RTM des Alpes de Hautes Provence, décembre 2005. 87 pages.

LACARPENTIER C. **La crue de juin 1957 en Ubaye et ses conséquences morphodynamiques**. Thèse de doctorat de 3^{ème} cycle, Université de Strasbourg- Faculté des Lettres et des Sciences Humaines- Centre de Géographie Appliquée, Strasbourg, décembre 1963. 312 pages.

MEUNIER M., **Elements d'hydraulique torrentielle**. CEMAGREF, collection « Etudes et Montagnes » n°1, 1991. 278 pages.

MUSY A. & HIGY C., **Hydrologie : une science de la nature**, Presses polytechniques, Lausanne, 2004, 302 pages.

ONF- Service départemental RTM des Alpes de Hautes Provence. **Travaux de protection du camping « Les Marmottes » au lieu-dit « malboisset » à LARCHE (04)**. Dossier d'enquête publique, mai 1998. 10 pièces, 60 pages.

ONF- Service départemental RTM des Alpes de Hautes Provence. **Précipitation des débits de crue dans le département : récapitulatif des données disponibles et utiles pour les besoins du service**. Document à usage interne au service RTM, version de juin 1993. 300 pages.

PETEUIL Ch. **Torrent du RIOULONG- Vallée de la Neste du Louron- Hautes Pyrénées- Analyse du fonctionnement torrentiel et propositions en vue d'améliorer le dispositif de protection actuel**. Rapport d'étude, Délégation Nationale RTM, janvier 2005, 85 pages.

PIEGAY H., SALVADOR PG., « **Contemporary floodplain forest evolution along the middle Ubaye River, Southern Alps, France** ». Global Ecology and Biogeography Letters, 1997, pages 397 à 406

REMAITRE A. **Détermination des zones d'initiation et de contribution des laves torrentielles dans les bassins marneux : application au bassin versant de Barcelonnette**. Mémoire de DEA, Systèmes Spatiaux et Environnement, option « dynamique des milieux naturels et risques associés », Université Louis Pasteur- Faculté de Géographie- CEREG/UMR 7007 du CNRS, Strasbourg, septembre 2000. 150 pages.

RICKENMANN D. **Evaluation du risque de laves torrentielles**. RTH/SIA, Birmensdorf, Suisse. Tiré de « Beurteilung von Murgängen » Schweizer Ingenieur und Architekt 48 (1995), traduction de ANCEY C., CEMAGREF, 1996. 15 pages.

Sites Internet consultés

Internet [1], <http://lhe.epfl.ch/cours/cours-sem-ENAC.pdf> (visité du 2 janvier au 10 février 2006)

Internet [2], <http://wn7.enseiht.fr-hmf-travaux> (visité le 13 février 2006)

Internet [3], <http://www.beyond.fr/villages/04> villages -html (visité en janvier 2006)

Internet [4], <http://www.enpc.fr/cereve/HomePages/gaume/courshydro/> (visité en février 2006)

Internet [5], <http://www.grenoble.cemagref.fr/THESE/Biblio/Lachamps.pdf> (visité en mai 2006)

Internet [6], <http://www.hydro.eaufrance.fr/traitement> (visité en janvier et mai 2006)

Internet [7], <http://www.univ-savoie.fr/mse/ressource/rapports/rapports00/Borgey/> (visité en avril 2006)

ANNEXES

<i>Annexe 1 : Liste des postes pluviométriques et pluviographiques du département des Alpes de Haute Provence</i>	65
<i>Annexe 2: Postes utilisables en vallée de l'Ubaye</i>	68
<i>Annexe 3 : Utilisation de l'outil « Calcul Hydrologique »</i>	69
<i>a) Généralités</i>	69
<i>b) Descriptif des principaux paramètres physiques des feuilles de l'outil « Calcul Hydrologique »</i>	69
<i>c) Calcul du temps de concentration et du débit décennal</i>	75
<i>d) Estimation des débits de crues extrêmes :</i>	80
<i>Annexe 4: Granulométrie</i>	82
<i>Annexe 5: Page de calcul (élaborée par Christophe Péteuil) hydrogramme de crue et détermination du volume solide de l'Abéous:</i>	85
<i>Annexe 6 : Méthodes globales pour l'estimation du volume des laves torrentielles</i>	86
<i>Annexe 7 : Démarche d'utilisation du logiciel « EFLvs4 »</i>	88
<i>Annexe 8 : Utilisation du logiciel de calcul des hauteurs et débits de laves torrentielles « Lavfoprmt.doc »</i>	89
<i>Annexe 9 : Feuille de calcul Excel du logiciel « Lavfoprmt.doc » appliquée au torrent de l'Abéous pour différents débits</i>	91
<i>Annexe 10 : Localisation du torrent de l'Abéous dans la vallée de l'Ubaye</i>	93
<i>Annexe 11: Délimitation du bassin versant de l'Abéous sous SIG (Arcview)</i>	94
<i>Annexe 12 : Photos aériennes à différentes périodes au niveau de « Maison Blanche » (source : IGN)</i>	95
<i>Annexe 13 : Estimation des débits liquides de crue via l'utilisation de l'outil « CALCUL HYDROLOGIQUE »</i>	96
<i>Annexe 14 : Situation à la confluence</i>	98
<i>Annexe 14 a : Schéma de la situation actuelle:</i>	98
<i>Annexe 14 b : Photographie de la situation après la crue de 2003 :</i>	98
<i>Annexe 15 : Cartographie des phénomènes d'érosion sur le bassin versant de l'Abéous sous SIG (Arcview)</i>	99
<i>Annexe 16: Carte de localisation du cône de déjection et des ouvrages</i>	99
<i>Annexe 17 : Estimation des hauteurs de lave de 2005</i>	100
<i>Annexe 18 : Aménagements</i>	101
<i>Annexe 18 a: Schéma de principe de la plage de dépôt : (profil en travers)</i>	102
<i>Annexe 18 b: Aménagement de la confluence</i>	102
<i>Annexe 19: Localisation de la plage de dépôt sur ortho photographie (Arcview)</i>	102

Annexe 1 : Liste des postes pluviométriques et pluviographiques du département des Alpes de Haute Provence

	Gradex (mm en 24 h)	P10 (24h) (mm)	P100 (24h) (mm)	Période d'exploitation
Banon	19	90	135	1940-2004
Barcelonnette	11.9	61	89	1928-2004
Barreme	12.8	67	97	1966-2004
Beaujeu	13.1	70	100	1934-2004
Castellard Melan	17.1	84	125	1934-1990
Castellet	15.2	74	110	1958-2004
Chateau arnoux st auban	13.5	70	101	1954-2004
Colmars	16.5	84	123	1934-2004
Dignes les Bains	14.5	73	107	1950-2004
Entrages	13.5	69	100	1961-2004
Entrevaux	17.3	86	126	1966-2004
Greoux les Bains	14.5	68	102	1962-1993
Manosque	14.8	72	107	1967-2004
(les)Mees	14.4	73	107	1958-2004
Mison	15.2	76	111	1953-2004
Moustiers ste Marie	14	67	100	1970-1993
Quinson	17	80	120	1971-2004
Reillanne	18	83	126	1928-1979
St Etienne les Orgues	18.6	91	135	1928-2004
SaintJurs	14.3	71	104	1962-2004
St Michel L'Observatoire	17	84	124	1950-2004
ST Paul	12.2	65	94	1971-2004
Uvernet Fours	19.8	95	141	1954-2004
Valensole	17.1	81	122	1958-2004
Vergons	16.9	83	122	1934-1974
Allemagne en Provence	11.8	62	90	1951-1975
Castellane	17.5	87	129	1959-1994
Jausiers Lans Le Serret	11.8	60	87	1961-1994
La Brillanne	16.1	78	116	1948-1994
La Motte du Caire	12.2	64	92	1961-1986
Le Lauzet Champanastais	12.7	69	99	1958-1972
Sisteron	21.5	99	149	1948-1978
ST André Les Alpes	14.2	74	107	1948-1994
ST Paul sur Ubaye	12.2	65	94	1959-1994
ST Pons de barcelonnette	11.9	61	89	1958-1972
Ste Croix	17.1	79	119	1976-1994
Ste Tulle	15.6	74	111	1973-1994
Valbelle	27.2	128	192	1948-1972

intervalle de confiance à 90%

Données extraites de la thèse d'Abdelatif Djerboua, du 11 Mai 2001, *prédétermination des Pluies et Crues Extrêmes dans les Alpes Franco-Italiennes Préviation Quantitative des Pluies Journalières par la méthode des analogues*

Liste des postes pluviographiques dans le département des Alpes de Haute Provence

(Tableau édifié à partir de Djerboua, 2001)

Nom de Station	Gradex (1h)(mm)	P10(1h)(mm)	P100(1h)(mm)	Gradex (24h)(mm)	P10(24h)(mm)	P100(24)(mm)	b.Montana	Tps d'exploitation
Allos	3.3	19	27	15.7	85	122	0.5	1981-1993
Castillon Demandolx	7.3	35	53	16.9	82	153	0.26	1968-1990
Chateauneuf Miravail	7.6	38	56	26.8	126	189	0.39	1982-2005
Clamensane	6.2	32	47	18.1	88	130	0.33	1986-2005
Draix laval	6.3	34	49	18	90	132	0.34	1984-2005
Forcalquier	10.3	46	70	20.9	98	147	0.21	1982-2005
Fours St Laurent	4	23	33	19.7	100	146	0.51	1984-2005
La Condamine	2.7	15	21	11.8	59	86	0.48	1952-2005
Lambruisse	6.9	22	52	14.6	77	112	0.24	1981-2005
Marcoux St Martin	5.6	29	42	13.3	68	99	0.26	1978-1992
Seyne les Alpes	5.8	31	45	16.5	84	123	0.32	1983-2005
St Etienne de Tinée	4.1	20	30	15.8	80	117	0.43	1961-1990
St Etienne les Orgues	6.8	35	51	16.9	83	123	0.28	1963-1990
Thorame	5.8	31	45	17.9	90	131	0.37	1983-2005

Liste des postes hydrométriques du département des Alpes de Haute Provence

(Source : Banque HYDRO, Internet [6])

Station	Rivière/torrent	Code	alti.(m)	Surface BV (km ²)	date début	date Hors Service	Gestion	Données obtenues	Nbre années de mesures	Débits de crues			Qj moyen (m ³ /s)
										QIX2 (m ³ /s)	QIX10 (m ³ /s)	QIX50 (m ³ /s)	
Brusquet	La Trou du Loup	X1217010	850	1.2	1987		DIREN	Non		aucune valeur			
Brillanne	Durance	X130010	344	8130	1995		DIREN	oui	9				
Les Ybourques	La Laye	X1515010	468	125	1967		can.prov	oui	35	16	12	16	0.261
Colmars	Verdon	X2002030	1230	158	1903		DIREN	oui	15				
Allons	L'Ivoire	X2035210	957	37.5	1999		DIREN	oui	5	7,44 le 29 avril 2000			
Demandolx (castillon)	Verdon	X2202010	790	655	1948		EDF	oui	50	100	180	250	
St andrée des Alpes (pt de méouille)	Verdon	X2202020	999	569	1900		inconnu	NON					
Rougou pt D952	Le Baux	X2315010	700	35	2000		DIREN	oui	5	pas assez de valeurs Qimax = 1,66 en 2001			
Ste Croix de Verdon	Verdon	X2602010	400	1590	1978	1984	inconnu	oui	7				
St Martin de Brones	Le colostre	X2714010	270	600			DIREN	NON		non calculé			
Thoranes Haute (Merailles)	La Vaire	Y6035620	999	29	1969	1970	inconnu	oui	2				
Entrevaux	Le Var	Y6042010	465	676	1920		DIREN	oui	80	240	140	180	16

Liste des postes hydrométriques du département des Alpes de Haute Provence (suite)

Num	Station	Rivière/torrent	Code	alti.(m)	Surface BV (km ²)	date début	date Hors Service	Gestion	Données obtenues	Nbre années de mesures	Débits de crues			
											QI 10 (m ³ /s)	Qj10 (m ³ /s)	Qj50 (m ³ /s)	Qj moyen (m ³ /s)
110	Allos	Chadoulin	X2006010	1500	34.6	avr-77	sept-96	DIREN	oui	18				
72	Clamesane	Sasse	X0714010	560	159.4	sept-72	fev-78	DIREN	oui	5				
167	Foux d'Allos	Verdon	X2002020	1800	10.1	78		DIREN	oui	22	7.5	4	?	0.317
20	Villeneuve (la brillanne)	Lauzon	X1335010	341	124	oct-65		DIREN	oui	41	55	27	38	0.939
21	La motte caire	Syriex	X0716210	775	3.2	oct-67	oct-76	DIREN	oui	10				
85	La mouliere	Chasse	X2015210	1700	10.9	aout-74	oct-84	DIREN	oui	11				
131	Le moulin	Riou Versant	X0426220	1350	35.2	sept-78	janv-83	DIREN	oui	5				
141	St Paul (les praz)	Riou Crachet	X0415410	2000	3.5	dec-80		DIREN	oui	25	1.2	1	1.3	0.117
193	Pont Clignon	Clignon	X2000650	99	22	oct-86		DIREN	NON					
23	Restefond	Clapouze	X0426210	2043	10.5	oct-69	juin-97	DIREN	oui	20				
159	Ste Anne	Parpaillon	X0425010	1770	26.2	sept-81	sept-85	DIREN	oui	3				
	Barcelonnette	Ubaye	X0434010	1132	549	1904		DIREN	oui	98	120	98	130	10.8
	St André des Alpes	Issole	X2114010	931	137	1958		DIREN	oui	78	67	37	52	2.74
	Javie(Peroure)	Bes	X1225010	805	165	1963		DIREN	oui	45	140	54	77	2.9
	Chabrières	Asse	X1424010	605	375	1906		EDF	oui	49	230	99	140	4.67
	Lauzet Ubaye	Ubaye	X0454010	790	946	1964		EDF	oui	41	Q imax =380 le 1 nov. 1963			
	Oraison	Durance	X1130010	415	6760	1973		EDF	oui	32	620	1000	1400	
	Lauzet (Pruneyret)	La source	X0456310	850	10	1997		DIREN	oui	8	pas assez de valeurs Qimax = 0,082 en 2001			
	Draix(Francon)	Francon	X1216110		0.76	1983	1987	ETNA,Cemag	Non		pas assez de valeurs Qimax = 2,95 en 1987			
	Draix	Le Laval	X1216310	847	0.8	1984		ETNA,Cemag	Non		non calculée Qimax = 1,8 en 1987			

Annexe 2: Postes utilisables en vallée de l'Ubaye

(Sources : Djerboua, 2001 & Boiret, 1982 & ETRM, 2005)

Postes pluviométriques utilisables en Haute vallée de l'Ubaye

Poste	gradex 24 h (mm)	P10 (24h) (mm)	P100 (24h) (mm)
St Paul	12.21	65	97
Vars	15.9	71	108
Guillestre	10.7	55	80
Abriès	15.7	85	100
Ceillac	10.8	55	81

Postes pluviographiques utilisables en Haute vallée de l'Ubaye

	Embrun	La Condamine	Arvieux	St Véran
P(mm)(1h)	19.5	15.5	21	24
P(mm)(2h)	25	21	26	29
P(mm)(6h)	36	33	41.5	39
P(mm)(12h)	44	43.8	53.5	48.5
coefficient b	0.7	0.54	0.64	0.73

Postes pluviométriques utilisables en Basse vallée de l'Ubaye

nom du poste	Altitude(m)	Début d'exploitation	Durée disponible (années)
Barcelonnette(04)	1135	1928	63
Beaujeu(04)	1050	1934	59
Colmars(04)	1250	1934	42
Dignes les Bains(04)	585	1950	50
Uvernet Fours(04)	1660	1954	42
Jausiers Lans Le Serret(04)	1500	1961	34
ST Paul sur Ubaye(04)	1903	1959	36
Les Orres le Melezet(05)	1445	1948	47
Vars(05)	1810	1936	32
Entraunes(06)	1250	1928	68

	Gradex(24h)(mm)	P10 (24)(mm)	P100(24)(mm)
Barcelonnette(04)	11.9	61	89
Beaujeu(04)	13.1	70	100
Colmars(04)	16.5	84	123
Dignes les Bains(04)	14.5	73	107
Uvernet Fours(04)	19.8	95	141
Jausiers Lans Le Serret(04)	11.8	60	87
ST Paul sur Ubaye(04)	12.2	65	94
Les Orres le Melezet(05)	12.8	64	95
Vars(05)	15.9	71	108
Entraunes(06)	20.7	105	153

*Annexe 3 : Utilisation de l'outil « Calcul Hydrologique »
(Adaptée et complétée de l'Outil « Débits.xls »)*

a) Généralités

Cet outil se présente sous la forme d'un Classeur Excel composé de 4 feuilles de calcul distinctes mais reliées dans un but de rentrer un minimum de valeurs d'informations à renseigner. Cet outil vient en substitue aux feuilles de calcul hydrologiques de l'outil « **Debits.xls** » élaboré en 1998 par le service RTM. Il prend en compte l'évolution des connaissances en hydrologie de montagne de ces dernières années en intégrant de nouvelles formules de calcul et reprends de manière justifiée les formules qui ont fait leurs preuves dans l'univers torrentiel. Certaines formules, présentes dans l'outil « **Debits.xls** », n'ont pas été retenues dans celui-ci car jugées inutiles ou dépassées. Il a pour but, au niveau d'un point de calcul donné, d'évaluer :

- Le **temps de concentration** et le **profil en long**
- Les **débits liquides de pointe** de crue **décennale** et **centennale**

De la même manière que pour l'outil « **Debits.xls** », différentes couleurs sont incorporées dans les feuilles de calcul afin de différencier les valeurs :

- A entrer, représentées en bleu
- Calculées automatiquement, représentées en vert
- Retenues, représentées en orange

*b) Descriptif des principaux paramètres physiques des feuilles de l'outil
« Calcul Hydrologique »*

Feuille « bassin »

BASSIN	Commune : <input style="width: 100%;" type="text"/>	Torrent : <input style="width: 100%;" type="text"/>							
Altitude point de Calcul des Débits		<input style="width: 100%;" type="text"/>							
Profil en long général du plus long thalweg									
Tronçon j	$z_{\min}(j)$ (m)	$z_{\max}(j)$ (m)	$\Delta z(j)$ (m)	$x_{\min}(j)$ (m)	$x_{\max}(j)$ (m)	L_j (m)	i_j (m/m)	$L_j / i_j^{0.5}$ (m)	S (km ²) = <input style="width: 50px; height: 20px;" type="text"/>
1									
2									
3									
4									
5									
6									
7									
8									
9									
10									
11									
12									
Bassin	z_{\min} (m)	z_{\max} (m)	Δz (m)	x_{\min} (m)	x_{\max} (m)	$L=\Delta x$ (m)	i_{moy} (m/m)	$\Sigma[L/i_j^{0.5}]$ (m)	$i_{\text{pondérée}}$ (m/m)

TEMPS DE CONCENTRATION		t_c (h)
Turazza-Passini		
Izzard-Meunier (bassin végétalisé)		
Izzard-Meunier (bassin dégradé)		
SCS	CN	
	65	
Socose Bv rapide = durée caractéristique de crue = Dr		#####
Giandotti		#####
Temps de concentration retenu (h)		<input style="width: 100%;" type="text"/>

Titres (1ere ligne)

Bassin : Titre de la feuille
Commune : Nom de la commune
Torrent : Nom du torrent

Profil en long général du plus long thalweg (en m)

$z_{\min}(j)$: Altitude minimale du tronçon j (Carte IGN agrandie ou profil existant) (en m)
 $z_{\max}(j)$: Altitude maximale du tronçon j ($z_{\max}(j)=z_{\min}(j-1)$ sauf pour $j=1$) (en m)
 $\Delta z(j)$: Dénivelée du tronçon j ($\Delta z(j)=z_{\max}(j)-z_{\min}(j)$) (en m)
 $x_{\min}(j)$: Abscisse minimale du tronçon j (Carte IGN agrandie ou profil existant) (en m)
 $x_{\max}(j)$: Abscisse maximale du tronçon j ($x_{\max}(j)=x_{\max}(j-1)$ sauf pour $j=1$) (en m)
 L_j : Longueur du tronçon j ($L_j=x_{\max}(j)-x_{\min}(j)$) (en m)
 i_j : Pente du tronçon j ($i_j=\Delta z(j)/L_j$) (en m/m)
 $L_j/i_j^{0,5}$: Rapport de la longueur sur la racine carrée de la pente pour le tronçon j (en m)

Bassin

z_{\min} : Altitude minimale du bassin (=altitude du point de calcul) (en m)
 z_{\max} : Altitude maximale du bassin (en m)
 Δz : Dénivelée du bassin (en m)
 x_{\min} : Abscisse minimale du bassin ($=z_{\max}-z_{\min}$) (en m)
 x_{\max} : Abscisse maximale du bassin (correspondant à L) (en m)
 $L=\Delta x$: Longueur du thalweg le plus long jusqu'au point de calcul ($x_{\max}-x_{\min}$) (en m)
 i_{moy} : Pente moyenne du thalweg le plus long ($=\Delta z/L$) (en m/m)
 $\Sigma[L_j/i_j^{0,5}]$: Somme des rapports de longueurs sur racines carrées des pentes (en m)
 $i_{\text{pondérée}}$: Pente pondérée du thalweg le plus long ($=L/\Sigma(L_j/i_j^{0,5})^2$) (en m/m)

Temps de concentration

TEMPS DE CONCENTRATION : Formule utilisée pour la détermination du temps de concentration du bassin au niveau du point de calcul
tc : Temps de concentration du bassin au niveau du point de calcul et ce, pour les différentes formules utilisées (en h)

Résultat

Temps de concentration retenu (h) : temps de concentration retenu pour le bassin au point de calcul (confluence, ouvrage...) (en h)

Pour ce résultat on essaye de retenir une valeur qui soit intermédiaire entre les deux extrêmes obtenus par les formules d'Izzard-Meunier, légèrement supérieure à celle de Turazza-Passini et de Giandotti et SCS et, inférieure à celle de Socose Bv rapide.

Description de la feuille « profil en long » :

Le graphique représenté sur cette feuille de calcul Excel reproduit le profil en long général du plus long thalweg du bassin (qui n'est pas forcément le thalweg principal) donnant ainsi une vision globale du torrent de son point le plus haut jusqu'à son exutoire (évolution de la pente, rupture, seuils, etc.).

Description de la feuille Q10 max

Titres

DEBIT LIQUIDE DECENNAL : Titre de la feuille
Commune : Nom de la commune
Torrent : Nom du torrent

Grandeurs connues

S : Superficie du bassin au niveau du point de calcul (déterminée sur la feuille bassin) (en km²)
L : Longueur du thalweg le plus long jusqu'au point de calcul (déterminée sur la feuille bassin) (en km)

Δz : Dénivelée entre le point le plus haut et le point le plus bas du thalweg (déterminée sur la feuille bassin) (en m)

i_{moy} : Pente moyenne du thalweg le plus long (déterminée sur la feuille bassin) (en m/m)

i_{pond} : Pente du thalweg le plus long (déterminée sur la feuille bassin) (en m/m)

t_c : Temps de concentration du bassin (déterminé sur la feuille bassin) (en h)

DEBIT LIQUIDE DECENNAL **Commune :**

Torrent :

Altitude point de Calcul des Débits (m)

Grandeurs connues	S (km ²)	L (km)	Δz (m)	i_{moy} (m/m)	i_{pond} (m/m)	t_c (h)

Grandeurs à rentrer	$P_{an(mm)}$	r	b	$P_{10/24}$	Gradex p (24)	$P_{100/24}$	Ta(°C)
					0.0		

Coefficient de Montana obtenus **a (mm) = 0.0** **a' (mm) = 0.00**

CRUPEDIX	Nationale		Sud-Est	
	CR	Q_{10} (m ³ /s)	R23d	Q_{10} (m ³ /s)
	1		1.5	

SOGREAH	Q_{10} (m ³ /s)
abaque	

SOCOSE	D_{soc} (h)	J_{soc} (mm)	k	ρ_o	ξ	Q_{10} (m ³ /s)
	#VALEUR!		#VALEUR!		1.00	

RATIONNELLE	C_{10}	$P_{10/tc}$ (mm)	Q_{10} (m ³ /s)
	0.25		

S.C.S.	D_r (h)	$D_{soc}/3$ (h)	D_{scs} (h)	$P_{10/DSCS}$ (mm)	J_{scs} (mm)	Ca
		#VALEUR!	#VALEUR!			

S.C.S.	r.Ca	$Q_{10,moy}$ (m ³ /s)	Q_{10} (m ³ /s)
		#VALEUR!	#####

TRANSFERT DE BASSIN	S/B (km ²)	$P_{10/24/B}$ (mm)	$Q_{10/B}$ (m ³ /s)	Q_{10} (m ³ /s)
L'Ubaye à Barcelonnette	536	66	170	
Faucon	7.4	80	8	
L'Ubaye à St Paul	155	77	75	

débit de pointe décennal retenu (en m³/s)

Grandeurs connues

Pan : Précipitation annuelle moyenne sur le bassin (en mm) (confère « Débit.xls » annexe G)

r : Rapport entre le débit maximal instantané et débit moyen pendant t_c (en l'absence de valeur on prends- dans les études hydrauliques récentes qui utilisent des valeurs comprises entre 1,5 et 2 – 1,70)

b : Coefficient de Montana ($I = at^b$) appliquée aux pluies de durée de l'ordre de la journée

$P_{10/24}$: Pluie décennale maximale journalière (non centrée sur les intensités Confère annexe : Postes pluviométriques du département 04) (en mm)

Gradex p (24) : Gradex des pluies de durée 24 heures (en mm)

$P_{100/24}$: Pluie centennale maximale journalière (non centrées sur les intensités Confère annexe postes pluviométriques du département 04) (en mm)

Ta (°C) : Température moyenne annuelle au niveau du bassin étudié ramené au niveau de la mer (en °C)

Coefficient de Montana obtenus

a : coefficient de Montana de période de retour 10 ans correspondant à la pluie journalière décennale ($P = at^{1-b}$) (en mm)

a^b : coefficient de Montana de période de retour 10 ans correspondant au GRADEX journalier décennal ($g=a \cdot t^b$) (en mm)

CRUPEDIX Nationale & Sud-Est

CR : Coefficient de ruissellement régional pour la formule nationale (CR = 1 pour l'ensemble des Alpes)
R_{23d} : Coefficient régional de correction pour la méthode Sud-Est (R_{23d} ≈ 1,5 dans la vallée de l'Ubaye)
Q₁₀ : Résultats de calculs par les méthodes CRUPEDIX nationale et régionalisée (m³/s)

SOGREAH

Q₁₀ : Résultat tiré des abaques SOGREAH (en m³/s)

SOCOSE

Dsoc : Durée caractéristique de crue selon une formule régionale applicable aux bassins de montagne (en h)
Jsoc : Interception potentielle (issue d'une formule propre à la méthode SOCOSE) (en mm)
k : Indice pluviométrique
p : Nombre intermédiaire
ξ : Coefficient correcteur (proche de 1)
Q₁₀ : Résultat du calcul par la méthode SOCOSE (m³/s)

RATIONNELLE

C₁₀ : Coefficient de ruissellement du bassin pour la fréquence décennale
P_{10,t_c} : Pluie décennale maximale de durée correspondant au temps de concentration t_c du bassin (centrée sur les intensités) (en mm)
Q₁₀ : Résultat du calcul par la méthode RATIONNELLE (en m³/s)

SCS

Dr : Durée caractéristique de crue du bassin déduite d'une formule adaptée aux petits bassins rapides ($S < 15 \text{ km}^2$; $4 < D_r(\text{min}) < 300$) (en h)
Dsoc/3 : Tiers (resp. cinquième) de durée caractéristique de crue déduite de la méthode SOCOSE considérée comme durée caractéristique de crue pour les petits bassins versants ($1 < S(\text{km}^2) < 15$) (resp. $S < 1 \text{ km}^2$) (en h)
Dscs : Durée caractéristique de crue du bassin pour la méthode SCS (prise égale à la moyenne de Dr et Dsoc/3 pour les petits bassins versants ($1 < S(\text{km}^2) < 15$) (en h)
P_{10/DSCS} : Pluie décennale maximale de durée Dscs (centrée sur les intensités) (en mm)
Jscs : Infiltration potentielle (capacité maximale d'infiltration) déduite soit des tables, soit d'une formule adaptée aux petits bassins versants rapides ($S < 15 \text{ km}^2$) (en mm)
Ca : Coefficient d'apport (rapport de la lame nette écoulée sur la hauteur de pluie tombée pendant la durée caractéristique de crue Dscs)
r.Ca : Produit de Ca par le rapport entre le débit maximal instantané et débit moyen pendant Dscs (qu'on assimilera à r pendant t_c) - Ce produit peut être rapproché du coefficient de ruissellement C de la méthode rationnelle
Q_{10moy} : Débit moyen (écoulement net) décennal sur la durée Dscs (en m³/s)
Q₁₀ : Résultat du calcul par la méthode SCS (en m³/s)

TRANSFERT DE BASSIN

TRANSFERT DE BASSIN : Nom du cours d'eau jaugé B comparé par transfert de bassin
S_B : Superficie du bassin versant jaugé B comparé (en km²)
Q_{10/B} : Débit maximal instantané décennal mesuré sur le cours d'eau jaugé B comparé
P_{10/24/B} : Pluie décennale maximale journalière caractéristique du bassin jaugé B comparé
Q₁₀ : Débit maximal instantané décennal déduit pour le bassin étudié au point de calcul du bassin d'étude par transfert de bassin

RESULTAT

Débit de pointe décennal retenu (en m³/s) : Débit maximal instantané décennal retenu pour le bassin au point de calcul (confluence, ouvrage...)

Choix du débit décennal : Pour ce résultat, il faut essayer de retenir une valeur obtenue par une méthode applicable au bassin versant étudié plutôt que de systématiquement retenir la valeur la plus forte (cela va certes

dans le sens de la sécurité mais cette valeur peut avoir été obtenue par une méthode non adaptée à la taille ou à la structure du bassin). Par exemple :

- Pour un très petit bassin ($S=1\text{km}^2$), il faut plutôt s'attacher aux méthodes pseudo déterministes (RATIONNELLE, SCS) plutôt qu'aux méthodes sommaires (comme CRUPEDIX) souvent ajusté pour des bassins plus grands (de 2 à 100km^2).
- Pour un grand bassin versant ($S>30\text{km}^2$) de pente assez faible et composé de plusieurs branches affluentes, il faut rester circonspect vis à vis des ces mêmes méthodes pseudo déterministes qui représentent l'appareil torrentiel de la façon la plus simple qui soit et ne sont donc plus adaptées du tout pour des appareils plus complexes (problème de concomitance de crues entre les différentes branches, et.). On leur préférera à défaut les méthodes sommaires ou mieux dans le cas où l'on dispose de bassins jaugés voisins et assez semblables, la méthode de transfert de bassin. A noter toutefois que cet outil est destiné à faciliter l'étude d'un bassin d'une telle taille (et de pente faible : « qui est généralement supérieure à 6% » pour un torrent d'après M.Meunier et « de l'ordre de 1 à 6 % pour une rivière torrentielle »).
- Pour un bassin de taille intermédiaire, il faut comparer les résultats obtenus par les différentes méthodes, et essayer d'ajuster au mieux certains paramètres (coefficient de ruissellement, capacité d'infiltration) en fonction du bassin. Si le choix est trop difficile à faire suite à ce travail, il faut alors retenir la valeur la plus forte, par sécurité.

Description de la feuille Q100 max

DEBIT LIQUIDE CENTENNAL				Commune : <input style="width: 100%;" type="text"/>			
Torrent : <input style="width: 100%;" type="text"/>							
Altitude point de Calcul des Débits (m) <input style="width: 100%;" type="text"/>							
Grandeurs	S	t_c	b	G_{q(tc(T>10))}	r		
	(km ²)	(h)		(m ³ /s)			
Grandeurs à entrer							
	Bassin de référence				Bassin d'étude		
	S (km ²)	Q (10) (m ³ /s)	Q(2) (m ³ /s)	Gq(T<10)m ³ /s	P10/24(mm)	Q ₂ m ³ /s	Gq(T<10)m ³ /s
ubaye Barcelo	549.00	162.00	75	46.18	66.00		
GRADEX brutal	Q ₁₀ (m ³ /s)	Q ₁₀₀ (m ³ /s)	k _{100/10}	GRADEX Progressif	Q ₁₀ (m ³ /s)	Q ₁₀₀ (m ³ /s)	k _{100/10}
RATIONNELLE	C ₁₀₀	P _{100tc} (mm)	Q ₁₀₀ (m ³ /s)	k _{100/10}	Méthode Sommaire		
	0.55				Q ₁₀₀ (m ³ /s)	0	
S.C.S.							
	D _r (h)	D _{soe/3} (h)	D _{scs} (h)	P _{100/dscs} (mm)	J _{scs} (mm)	Ca	r.Ca
		#VALEUR!	#VALEUR!	#VALEUR!		#VALEUR!	#VALEUR!
S.C.S.							
	Q _{100 moy} (m ³ /s)	Q ₁₀₀ (m ³ /s)	k _{100/10}				
	#VALEUR!	#VALEUR!	#VALEUR!				
débit de pointe centennal retenu (en m³/s)						<input style="width: 100%;" type="text"/>	

DEBIT LIQUIDE CENTENNAL : Titre de la feuille

Commune : Nom de la commune

Torrent : Nom du torrent

Grandeurs

S : Superficie du bassin au niveau du point de calcul (déterminé sur la feuille de calcul « Bassin ») (en km²)

t_c : Temps de concentration du bassin au point de calcul (déterminé sur la feuille de calcul « Bassin ») (en h)

b : Coefficient de Montana (déterminé sur la feuille de calcul « Q10max »)

G_{q(tc(T>10ans))} : GRADEX des débits correspondant au GRADEX des pluies de durée équivalente au temps de concentration du bassin. Cette valeur est utilisée dans la méthode du GRADEX BRUTAL ($G_{q(tc(T>10ans))} = G_{p(tc)} * r * S / (3,6 * tc)$) (en m³/s)

r : Rapport entre débit maximal instantané et débit moyen pendant t_c (déterminé sur la feuille de calcul « Q10max »)

Grandeurs à entrer (pour la méthode du GRADEX progressif)

Bassin de référence : utilisation de la méthode de transfert de bassin

S : Superficie du bassin de référence (en km²)

Q(10) : Débit de pointe décennal du bassin de référence (en m³/s)

Q(2) : Débit de pointe biennale du bassin de référence (en m³/s)

Gq (T<10) : GRADEX des débits de période de retour inférieure à 10 ans calculé pour ce bassin de référence (en m³/s)

P_{10/24} : Pluie décennale journalière utilisée pour le bassin de référence (en m³/s)

Bassin d'étude :

Q₂ : Débit biennal du bassin d'étude calculé par la méthode de transfert de bassin (en m³/s)

Gq (T<10ans) : GRADEX des débits du bassin d'étude (en m³/s)

GRADEX « brutal »

Q₁₀ : Débit maximal instantané décennal retenu (déterminé sur la feuille de calcul « Q10max ») (en m³/s)

Q₁₀₀ : Débit maximal instantané centennal calculé par la méthode du GRADEX brutal (en m³/s)

K_{100/10} : Rapport Q₁₀₀/Q₁₀

GRADEX « Progressif »

Q₁₀ : Débit maximal instantané décennal retenu (déterminé sur la feuille de calcul « Q10max ») (en m³/s)

Q₁₀₀ : Débit maximal instantané centennal calculé par la méthode du GRADEX progressif (en m³/s)

K_{100/10} : Rapport Q₁₀₀/Q₁₀

RATIONNELLE

C₁₀₀ : Coefficient de ruissellement du bassin pour la fréquence centennale

P_{100/tc} : Pluie centennale maximale de durée t_c (centrée sur les intensités) (en mm)

Q₁₀₀ : Résultat du calcul par la méthode RATIONNELLE (en m³/s)

K_{100/10} : Rapport Q₁₀₀/Q₁₀

SOMMAIRE

Q₁₀₀ : Résultat du calcul par la méthode SOMMAIRE (en m³/s)

SCS

Dr : Durée caractéristique de crue du bassin déduite d'une formule adapté aux petits bassins rapides (S<15 km² ; 4<Dr(min)<300) (déterminé sur la feuille de calcul « Q10max ») (en h)

Dsoc/3 : Tiers (resp. cinquième) de durée caractéristique de crue déduite de la méthode SOCOSE considérée comme durée caractéristique de crue pour les petits bassins versants (1<S(km²)<15) (resp.S<1 km²) (déterminé sur la feuille de calcul « Q10max ») (en h)

Dscs : Durée caractéristique de crue du bassin pour la méthode SCS (prise égale à la moyenne de Dr et Dsoc/3 pour les petits bassins versants (1<S (km²)<15) (déterminé sur la feuille de calcul « Q10max ») (en h)

P_{100/Dscs} : Pluie centennale maximale de durée Dscs (centrée sur les intensités) (déterminé sur la feuille de calcul « Q10max ») (en mm)

Jscs : Infiltration potentielle (capacité maximale d'infiltration) déduite soit des tables, soit d'une formule adaptée aux petits bassins versants rapides (S<15km²) (en mm)

Ca : Coefficient d'apport (rapport de la lame nette écoulée sur la hauteur de pluie tombée pendant la durée caractéristique de crue Dscs)

r.Ca : Produit de Ca par le rapport entre le débit maximal instantané et débit moyen pendant Dscs (qu'on assimilera à r pendant t_c)- Ce produit peut être rapproché du coefficient de ruissellement C de la méthode rationnelle

Q_{100 moy} : Débit moyen (écoulement net) centennal sur la durée DSCS (en m³/s)

Q₁₀₀ : Résultat du calcul par la méthode SCS (en m³/s)

K_{100/10} : Rapport Q₁₀₀/Q₁₀

RESULTAT

Débit de pointe centennal retenu (en m³/s) : Débit maximal instantané centennal retenu pour le bassin au point de calcul (confluence, ouvrage...)

Mêmes remarques que pour le calcul du débit décennal

c) Calcul du temps de concentration et du débit décennal

La première feuille de calcul « Bassin » permet de déterminer les caractéristiques principales du bassin à étudier. Parmi celles-ci, une des plus significatives, **le temps de concentration (t_c)**, est définie comme le temps que met une goutte d'eau tombée à l'extrémité du bassin par rapport à l'exutoire pour atteindre ce dernier. Pour des torrents de montagne de petits bassins versants et de forte pente, c'est un paramètre déterminant dans le traitement des crues et l'on part souvent de l'hypothèse **qu'une crue de période de retour de T années est provoquée par une averse de durée t_c et de période de retour T**.

Plusieurs formules ont été proposées pour calculer cette durée caractéristique du bassin qu'il ne faut pas confondre avec la durée caractéristique de crue définie par certaines formules de prédétermination de débit de crue (SOCOSE ou SCS par exemple) et qui s'apparente généralement à la durée au cours de la crue pendant laquelle le débit est supérieur à la moitié du débit de pointe.

A la différence de l'outil « débit.xls » qui n'utilise que deux formules (Turazza-Passini et Izzard-Meunier), j'ai privilégié la diversité en utilisant, en plus de ces deux dernières, trois autres formules qui ont fait leur preuve ces dernières années en hydraulique torrentielle :

- SCS
- Socose BV rapide
- Giandotti

Formule de Turazza-Passini : $t_c = 0,108 \times (S \times L)^{1/3} \times (i_{pondérée})^{-0,5}$

Etablie à l'origine pour la plaine de Ferrare en Italie, elle fait intervenir les paramètres suivants :

t_c : temps de concentration (en heures)

S : superficie du bassin versant (en km²)

L : longueur du plus long thalweg du bassin (en km)

i pondérée : pente pondérée du thalweg définie par : $\frac{1}{\sqrt{i}} = \frac{1}{L} \times \sum \frac{\Delta L}{\sqrt{i_{\Delta L}}}$ (en m/m)

Formules d'Izzard-Meunier :
$$\begin{cases} t_c = 331 \times S^{0,312} \times i_{moy}^{-0,625} \text{ végétalisé} \\ t_c = 145 \times S^{0,312} \times i_{moy}^{-0,625} \text{ dégradé} \end{cases}$$

Etablie dans un cadre théorique, elle a l'avantage de faire intervenir la couverture végétale du bassin :

t_c : temps de concentration (en heures)

S : superficie du bassin versant (en km²)

i_{moy} : pente moyenne du thalweg définie par : $i_{moy} = \frac{\Delta H}{L}$ (en %)

Cette dernière formulation donne deux valeurs selon que l'on est en présence d'un bassin bien végétalisé ou très dégradé. Le choix d'une valeur intermédiaire pourra être plus judicieux (les bassins sont souvent en partie bien végétalisé et en partie dégradé).

Formule SCS (1975) (Internet[2]) :

$$T_c = 0.023 * L^{0.8} \frac{((1000 / CN) - 9)^{0.7}}{I^{0.5}}$$

CN : numéro de la courbe de ruissellement correspondante. Il varie, entre autre, en fonction de la nature du sol et de son humidité avant la crue. Par exemple, pour la vallée de l'Ubaye, qui possède une géologie bien

particulière, le coefficient varie de 60 à 80. Nous opterons alors pour une valeur de 65 pour l'ensemble des torrents étudiés dans cette vallée.

Plus généralement nous retiendrons une valeur autour de 70. Il faut bien se rendre compte que la précision sur l'évaluation du temps de concentration n'est pas déterminante (au quart d'heure près pour un petit bassin et à la demie heure, voir l'heure, pour les plus gros bassins). Après de nombreux tests, j'ai observé qu'une erreur sur CN de 20 (permettant alors de couvrir la majeure partie des classes de sol) provoque une erreur sur le temps de concentration de l'ordre de la dizaine de minutes et n'est donc pas préjudiciable pour le choix final.

SOCOSE BV RAPIDE :

$$T_c = EXP(0,375 * LN(S) + 3,729) / 60$$

GIANDOTTI : (Internet [2])

$$T_c = \frac{4 \times \sqrt{S} + 1,5 \times L \times 10^{-3}}{0,8 \times \sqrt{\frac{z_{\max} + z_{\min}}{2} - z_{\min}}}$$

Méthode CRUPEDIX

But de la méthode :

Cette méthode permet de fournir une estimation du débit instantané de crue de fréquence décennale sur un bassin versant non jaugé de taille comprise dans un intervalle de l'ordre de 2 à 2000 km².

Principe

Cette méthode s'appuie uniquement sur une analyse statistique. Après avoir explicité les variables explicatives (S et P_{10/24}) à partir d'un échantillon de 187 bassins versants étudiés dans une synthèse nationale réalisée par le Ministère de l'Agriculture (SRAE, CTGREF et Service de l'Hydraulique), les paramètres de la formule définitive ont été ajustés sur un échantillon de 630 bassins versants pour lesquels on disposait des valeurs de crue décennale.

Formule :

$$Q_{10} = CR \times S^{0,8} \times \left(\frac{P_{10/24}}{80} \right)^2$$

Q₁₀ : débit instantané de pointe décennal (en m³/s)

CR : coefficient régional déterminé par une carte nationale (1 sans les Alpes de Haute Provence)

S : superficie du bassin versant (en km²)

P_{10/24} : pluie journalière décennale (non centrée) (en mm)

Régionalisation

Une formule du même e été établie sur la région SUD-EST à partir de 235 bassins versants jaugés :

$$Q_{10} = R_{23d} \times S^{0,8} \times \left(\frac{P_{10/24}}{73} \right)^{1,5}$$

Attention : cette formule est différente de celle employée dans l'outil « Débits.xls ». D'après une étude « synthèse SUD-EST » réalisée par Nicole Mathys en avril 1997, cette formule est plus précise.

R_{23d} : coefficient de correction régional qui varie de 0,5 à 2. (Dans la vallée de l'Ubaye nous prenons R_{23d}=1,7)

Intervalles de confiance :

Formule nationale : - intervalle de confiance à 90 % = [Q₁₀/2 ; 2Q₁₀]
- intervalle de confiance à 70% = [2Q₁₀ ; 3Q₁₀/2]

Méthode SOGREAH

But de la méthode :

Cette méthode permet de fournir une estimation du débit instantané de crue de fréquence décennale sur un bassin versant non jaugé de taille comprise dans un intervalle de l'ordre de 1 à 100 km² et de pente moyenne de thalweg inférieure à : 25% pour un bassin de 1 km² et de 7,5% pour un bassin de 100 km².

Principe :

Cette méthode consiste à utiliser un abaque pour l'évaluation de Q₁₀ à partir de données de :

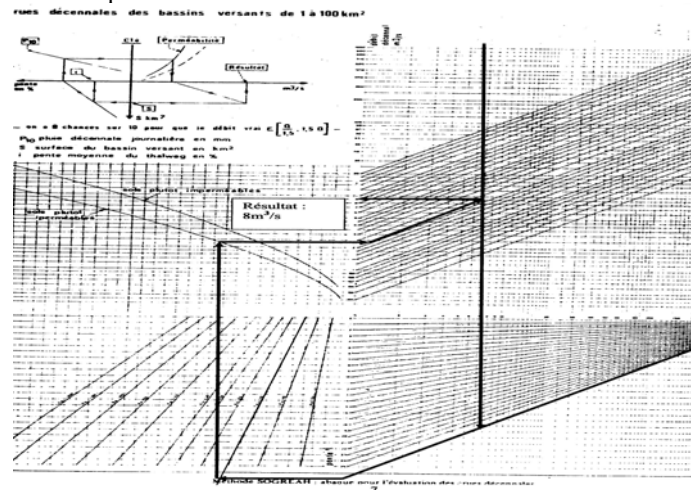
- superficie (S) de bassin versant (en km²)
- pente moyenne (i) du plus long thalweg (en%)
- pluie décennale journalière (P_{10/24}) (en mm)

Et en intégrant une composante liée au caractère « **plutôt** » perméable ou **imperméable** du sol.

Intervalle de confiance :

L'intervalle [2/3Q₁₀ ; 3/2Q₁₀] a une probabilité de 80% de contenir le débit de pointe décennal réel.

Exemple de l'utilisation de l'abaque :



Méthode SOCOSE (1980)

But de la méthode :

L'objectif de cette méthode est de « calculer » une crue décennale sur un bassin versant non jaugé de 2 à 200 km² situé en milieu rural. Elle permet le « dessin » d'une pointe de crue grâce aux deux caractéristiques suivantes : Q_{max}=débit maximal et D=durée pendant laquelle le débit dépasse la moitié du débit maximal.

Principe :

La méthode SOCOSE repose sur l'utilisation d'un modèle simple de transformation de la pluie tombée en débit s'écoulant dans le thalweg. Elle s'appuie ensuite sur une analyse statistique consistant à ajuster les différents paramètres à partir d'un échantillon de 187 bassins versants étudiés dans une synthèse nationale réalisée par le Ministère de l'Agriculture (SRAE, CTGREF et Service de l'Hydraulique).

Formules :

$$\text{LN}(D_{\text{soc}}) = -0,69 + 0,32 \cdot \text{LN}(S) + 2,2 \cdot (\text{Pan} / (P_{10/24} \cdot \text{Ta}))^{0,5}$$

$$J_{\text{soc}} = 260 + 21 \times \text{Ln}\left(\frac{S}{L}\right) - 54 \sqrt{\frac{\text{Pan}}{P_{10/24}}} \quad k = \frac{24^b \times P_{10/24}}{21 \times \left(1 + \frac{\sqrt{S}}{30 \times \sqrt[3]{D_{\text{soc}}}}\right)} \quad \rho = 1 - \frac{0,2 \times J_{\text{soc}}}{k \times (1,25 \times D_{\text{soc}})^{1-b}}$$

$Q_{10} = \xi \times \frac{k \times S}{(1,25 \times D_{50})} \times \frac{\rho^2}{15 - 12 \times \rho}$ ξ se trouve au moyen d'abaques. On le prends généralement égal à 1 ou très voisin.

Intervalle de confiance:

L'intervalle $[Q_{10}/2; 2Q_{10}]$ a une probabilité de 75% de contenir le débit de pointe décennal réel

Méthode Rationnelle

But de la méthode

L'objectif de cette méthode est de « calculer » une crue de période de retour T sur un petit bassin versant non jaugé à partir de la connaissance de celui-ci ainsi que de la pluie de même temps de retour ayant provoqué la crue. Elle permet le « dessin » d'une pointe de crue grâce aux deux caractéristiques suivantes :

- Q_{\max} débit maximal
- t_m , le temps de montée de la crue

Principe :

Issue d'une approche pseudo déterministe qui permet de passer directement de la pluie à la crue par l'intermédiaire d'un coefficient de ruissellement Ct (correspondant au rapport de la pluie « utile » à la crue sur la pluie « totale » l'ayant provoquée) et du temps de concentration t_c du bassin (considéré comme la durée de l'averse ayant provoqué la crue que l'on assimile au temps de montée t_m) selon le schéma simple suivant (en prenant un temps de décrue égal à $5/2 t_c$)

Formule : $Q_i(T) = C I_p(T) S / 3.6$ avec C est le coefficient de ruissellement de pointe, I_p est l'intensité de pluie de période de retour T

Pour le coefficient de ruissellement on essaiera de retenir la fourchette de valeur suivante :

$$C_{10} = 0,20 \text{ à } 0,30 \text{ et } C_{100} = 0,50 \text{ à } 0,60$$

Méthode du SCS (Soil Conservation Service)

Cette méthode, très employée en hydrologie, permet de faire intervenir directement l'état du sol. Elle consiste à faire l'hypothèse suivante : à un instant t donné, le rapport entre l'infiltration cumulée jusqu'à l'instant t et l'infiltration potentielle en début d'épisode est égal au rapport entre le ruissellement cumulé et la pluie cumulée, soit :

$$(P(t) - R(t)) / J = R(t) / P(t) \text{ avec } P(t) \text{ hauteur de pluie tombée entre } 0 \text{ et } t$$

R(t) lame nette écoulée entre 0 et t

J capacité maximale d'infiltration

P(t) - R(t) infiltration cumulée entre 0 et t

Cependant, lorsque la pluie commence à tomber, il n'y a pas ruissellement immédiat. Des études ont montré que l'on pouvait estimer cette rétention initiale à $0.25 * J$. Il faut donc remplacer P(t) par $P(t) - 0.25J$. On a donc :

$$R(t) = (P(t) - 0.25 J)^2 / (P(t) + 0.8J) : \text{ fonction dite de production avec } J = 25.4 (1000/CN - 10)$$

CN (Curve Number) est un coefficient de ruissellement que l'on prend ici égal à 78. Ce coefficient est fonction de la nature du sol et de l'antécédent pluviométrique. (cf Applied Hydrology, Ven Te Chow, New York, McGraw-Hill). En prenant, $t = t_c$ et pour $P(t_c) P_{10}(2h)$, on peut estimer Q_{i10} par :

$$Q_{i10} = K * R_{10}(t_c) * S / 3.6 D$$

Les valeurs, du tableau suivant, se lisent dans les colonnes 8 à 11, pour les configurations du sol, notées d'une croix, dans les colonnes 2 à 7. Pour utiliser ce tableau, il faut donc caractériser le bassin étudié des points de vue :

- nature du couvert végétal : première colonne ;
- mode de culture du sol :
 - * colonne 2 : ordinaire
 - * colonne 3 : en courbe de niveau
 - * colonne 4 : en terrasse

- rotation des cultures influent sur la permanence du couvert :
 - * colonne 5 : laissant le sol toujours couvert
 - * colonne 6 : laissant le sol parfois nu
 - * colonne 7 : laissant le sol souvent nu

Classe de perméabilité de « très bonne » pour la colonne 8 à « très faible » pour la colonne 11

Tableau de la capacité maximale d'infiltration :

Nature	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Jachères							20	7	4	3
Plantes sarclées	*					*	32	14	6	4
	*			*			46	19	9	5
		*				*	38	17	10	6
		*		*			52	25	12	8
			*	*		*	48	27	16	12
Céréales			*	*			60	35	19	14
	*					*	52	23	10	6
	*			*			58	25	11	7
		*				*	58	27	12	9
		*		*			64	30	14	10
Légumineuses ou prairies temporaires			*	*		*	64	32	19	12
			*	*			70	37	19	14
	*					*	49	21	9	5
	*			*			74	32	14	9
		*		*		*	54	25	11	9
Pâtures ou terres de parcours		*				*	86	40	19	11
		*		*		*	58	30	15	11
			*	*			100	46	23	15
	*					*	42	17	8	5
	*			*			115	40	17	10
Prairies permanentes		*				*	175	64	27	15
		*		*			125	45	14	6
			*	*		*	310	70	25	11
			*	*			490	210	37	17
				*			255	74	35	19
Forêts						*	135	49	21	11
					*		200	67	30	17
				*			310	85	37	21
Cours de ferme Routes en terre Routes empierrées							70	27	12	7
							32	12	7	55
							27	10	5	4

Méthode d'estimation dérivée du SCS (Cemagref Lyon)

Cette méthode, dérivée de la fonction de production du SCS, permet d'estimer le débit décennal de pointe de petits bassins versants ($S < 15 \text{ km}^2$).

La différence par rapport à la méthode SCS réside dans le calcul de J :

$$\ln(J) = 0.232 \ln(S) + 0.3.509$$

Le reste du calcul reste valable.

Méthode de transfert de Bassins

Objectif : Cf étude hydraulique de l'Abéous

$$\text{Formule utilisée : } Q_{10} = Q_{10\text{réf}} \times \left(\frac{S}{S_{\text{réf}}}\right)^{0,8} \times \left(\frac{P_{10/24h}}{P_{10/24h.\text{réf}}}\right)^{1,5}$$

Avec :

Q_{10} : débit liquide décennal (m^3/s) $Q_{10\text{réf}}$: débit liquide décennal du bassin de référence (m^3/s) S : superficie du bassin versant (km^2) $P_{10/24}$: Pluie décennale journalière (mm)

d) Estimation des débits de crues extrêmes :

Les méthodes RATIONNELLE et SCS :

L'utilisation de ces deux méthodes est la même que précédemment, cependant des difficultés supplémentaires voient le jour en raison de caractère exceptionnel de la crue.

- **Méthode SCS** : l'évaluation de la capacité d'infiltration J_{scs} est encore moins évidente que pour la période de retour décennale. D'une part, il n'existe plus de formule applicable pour des petits bassins versants rapides et d'autre part, l'événement étant particulièrement violent, la perméabilité du sol se trouve souvent très accrue. Cependant son estimation est vraiment aléatoire et le choix de cette méthode n'est opportun que dans le cas où l'on connaît déjà le débit centennal et que l'on cherche à obtenir un ordre de grandeur de cette capacité d'infiltration.

Pour des superficies très importantes, comme c'est le cas avec l'Ubaye par exemple ou avec le torrent du Bachelard, ces estimations sont complètement erronées et l'utilisation d'une autre méthode est judicieuse.

- **Méthode RATIONNELLE** : à la manière des difficultés rencontrées avec la méthode SCS, c'est ici le coefficient de ruissellement associé à la fréquence centennale (C_{100}) qui est difficile à évaluer. Il dépend, en effet, énormément de la géologie du sol en présence et il peut donc varier énormément d'un bassin à l'autre, d'autant plus que la géologie de l'Ubaye est très complexe. Cependant des études réalisées dans ce domaine donnent un bon ordre de grandeur pour ce coefficient : $C_{100}=[0,5-0,6]$

Les remarques précédentes nous incitent donc à prendre les résultats de ces méthodes avec un certain recul. Elles sont mentionnées dans le « CALCUL HYDROLOGIQUE » que pour fournir un ordre de grandeur très grossier, au contraire de la méthode qui suit et qui provient d'une extrapolation plus fine.

Utilisation de la méthode du GRADEX dans la vallée de l'Ubaye

Le but de cette méthode, développée par EDF depuis 1966 et applicable aux bassins versants de 0 à 5000 km² est de donner une estimation du débit de pointe de crue centennale à partir du débit de pointe de crue décennale.

Cette méthode suppose que, pour les crues extrêmes (comme la crue centennale par exemple), la courbe de répartition des débits en fonction de la période de retour est parallèle à celle de répartition des pluies. Autrement dit, à partir d'un certain seuil, la totalité du surplus de pluie tombée ruisselle et participe donc à la crue.

La valeur du débit centennal s'obtient via l'application de la formule suivante :

$$Q_{100} = Q_{10} + Gd * (-LN(-LN(1 - \frac{1}{100}))) + LN(-LN(1 - \frac{1}{10}))$$

Pour des périodes de retour supérieures à 10 ans, l'expression générale du GRADEX des débits est la suivante :

$$Gd = \frac{Gp(Tc) \cdot S \cdot K}{3,6 \cdot Tc}$$

Avec : Gd = GRADEX des Débits exprimé (en m³/s)

S = Surface du bassin versant en km²

K = Rapport du débits de pointe sur le débit moyen pendant la crue (sans unités)

Tc = Temps de concentration (en heure)

Gp = GRADEX des pluies pour des périodes supérieures à 10 ans et dont la durée de l'épisode pluvieux est égal au temps de concentration : $Gp(tc) = a'(tc)^{(1-b)}$ (en mm/h)

Le coefficient a' de cette méthode dite du GRADEX « brutal » est déterminé aisément à partir de la pluie décennale du poste pluviométrique de référence sur 24 heures, du choix du coefficient b de Montana pour le bassin versant étudié et enfin du GRADEX des pluies moyennes journalières. Ces dernières étant obtenues par un traitement statistique de GUMBEL. Le coefficient a' dépend uniquement de la période de retour et est déterminé à partir du traitement statistique de la pluviométrie locale ou choisie comme représentative du bassin :

$$a'(T = 10ans) = \frac{Gp(24h)_{gumbel}}{24^{(1-b)}}$$

Limites du GRADEX « brutal » et utilisation du GRADEX « progressif »:

La méthode du GRADEX fût initialement créée pour l'estimation des crues extrêmes subies par des grands barrages. Cette particularité fait que cette méthode adaptée aux extrêmes, a parfois tendance à surestimer les débits lorsqu'on l'applique aux crues seulement rares (crues centennales par exemple). Cette méthode permet d'obtenir un ordre de grandeur intéressant, d'autant plus que les méthodes de prédétermination des débits extrêmes se font rares.

La méthode du GRADEX progressif, développée par le CEMAGREF de LYON s'inspire fortement de la méthode initiale. Cependant, elle traduit une évolution sans doute plus proche de la réalité physique des phénomènes dans le domaine des fréquences rares.

Elles suppose qu'il n'y a pas refus total de l'infiltration dès le débit de fréquence décennal, mais plutôt une augmentation progressive du coefficient de ruissellement.

La formulation permettant de traduire cette évolution progressive en fonction de la période de retour est la suivante :

$$Q_{100} = Q_{10} + Gd * LN(1 + \frac{Gd(T < 10ans)}{Gd} * \frac{(T - 10)}{10}) \quad (1)$$

Comme il y est décrit précédemment, nous devons nous intéresser à des périodes de retour plus faibles afin d'estimer le GRADEX des débits correspondant à des périodes de retour inférieures à 10 ans.

L'évaluation du GRADEX des débits pour ces faibles périodes de retour s'effectue à l'aide de la formule suivante :

$$Gq (T < 10ans) = \frac{Q(10) - Q(2)}{u(10) - u(2)} \quad (2) \text{ avec : } Q(T) \text{ débit de période de retour } T, u(T) \text{ cordonnée de GUMBEL}$$

correspondante et $u(T) = -LN(-LN(1 - 1/T))$.

Le problème est justement d'évaluer ce $Q(2)$ pour un bassin versant donné car les études de synthèse, réalisées sur les pluies, fournissent en général des valeurs de précipitations décennale et centennale.

Deux méthodes peuvent théoriquement être utilisées :

A partir de la pluie journalière de fréquence biennale, l'application de la formule de CREPEDIX nous donne alors la valeur immédiate du débit manquant. Cependant cette méthode est difficilement applicable à la vue des données disponibles et je ne l'utilise pas.

A partir de stations de mesure de débit fiable, appliquer la méthode de transfert de bassin pour les débits biennaux. Cette dernière fonctionne particulièrement bien lorsque le bassin de référence se situe à proximité immédiate de la zone d'étude et lorsque leur morphologie est relativement semblable. Cependant la seule station hydrométrique suffisamment fiable de la vallée de l'Ubaye pour des périodes de retour inférieures à 10 ans est celle qui mesure le débit de l'Ubaye à Barcelonnette. Bien que le bassin correspondant soit très important et pas vraiment de dimension standard pour un bassin versant de montagne, c'est le débit biennal de cette dernière qui a été retenu. Le débit biennal du bassin d'étude s'obtient alors par utilisation de la méthode de transfert de bassin à partir du débit biennal de la station de Barcelonnette. On utilise alors la formule (2) pour déterminer le gradex des débits de période de retour inférieure à 10 ans sur la zone d'étude. L'utilisation finale de la formule (1) donnera enfin l'estimation du débit centennal.

Annexe 4: Granulométrie

1) Principe général :

La courbe granulométrique d'un cours d'eau en un endroit précis de celui-ci est une courbe de répartition en taille des éléments qui composent le lit de celui-ci à cet endroit. La méthode de référence permettant de tracer cette courbe est la méthode du tamisage par pesée que nous abandonnerons ici car nécessitant un matériel important (et d'autant plus lourd lorsqu'il s'agit des torrents). La méthode développée ici est la méthode d'échantillonnage linéique in situ. Beaucoup plus simple d'emploi, elle s'avère particulièrement bien adaptée pour les torrents.

Elle consiste sur le terrain à :

- disposer sur le sol un décimètre (ou double décimètre selon la longueur sur laquelle effectuer le prélèvement),
- prélever tous les cailloux qui se trouvent sous les gradations correspondant à un pas de prélèvement prédéfini (attention à la subjectivité d'une telle opération directement liée à l'observateur)
- mesurer sur le terrain le diamètre intermédiaire de chaque caillou (à l'aide d'un mètre) et le compter (autant de fois qu'il apparaît sous une graduation) dans une classe de diamètres parmi toutes celles que l'on aura définies préalablement –« par diamètre intermédiaire », on entend, si l'on considère un caillou par trois dimensions, la deuxième dimension en taille.

Cette première phase terrain est suivie, de retour au bureau, d'une exploitation des mesures effectuées qui consiste simplement à :

- compter le nombre d'éléments échantillonnés dans chaque classe de diamètres

Ceci permet d'associer au diamètre supérieur de chaque classe le pourcentage d'éléments comptés de taille inférieure ; c'est la courbe granulométrique.

Taille de l'échantillon :

Il a été établi à partir de très gros échantillons relativement homogènes obtenus sur plusieurs torrents que l'on optimisait la mesure de granulométrie (entre une courbe granulométrique trop imprécise et une mesure trop fastidieuse) en prélevant un échantillon de 100 éléments.

Pas de prélèvement :

De même, il est nécessaire d'optimiser le pas de prélèvement (entre un pas assez faible pour permettre un échantillonnage sur des zones de mesures souvent réduites en torrent mais assez grand pour éviter de « sur échantillonner » les gros éléments (comptés autant de fois qu'ils apparaissent sous une graduation)). Il a été montré qu'un pas de prélèvement supérieur au d90 permet d'éviter ce sur échantillonnage. Comme cette valeur sera déterminée a posteriori suite à cet échantillonnage, il faut alors évaluer in situ sur le terrain ce d_{90} , ce qui n'est pas évident : on a souvent tendance à le surestimer (en le confondant avec le d_{max} (diamètre maximal de la zone de prélèvement) souvent bien supérieur).

Pour un torrent à charriage classique, on prendra souvent un pas de prélèvement de l'ordre de 20 cm, ce qui permet d'échantillonner une zone de « seulement » 20 m de long pour arriver à 100 éléments.

Choix de la zone de mesure :

Le plus délicat consiste finalement à choisir la zone dans laquelle on va prélever les éléments. Le site de mesure doit être le plus « pur » possible et en rapport avec la morphologie recherchée. Étant donné l'importance des variations longitudinales d'un lit de torrent, il est d'abord indispensable de réaliser les mesures à l'endroit où elles doivent être utilisées. Dans le cas présent, la granulométrie que l'on veut connaître doit nous servir à quantifier les apports solides du torrent en crue à partir de formules de transport solide. Les zones à retenir seront ainsi des zones de dépôts de crues si possible non remaniés (mécaniquement) et surtout non lessivés (de leurs éléments les plus fins) par les écoulements courants (site si possible éloigné du lit mineur). Pour les zones de faibles superficies, il sera préférable de faire des mesures dans plusieurs secteurs plutôt que de « sur échantillonner » une seule zone. Enfin, il est également conseillé de réaliser au moins deux mesures à chaque fois afin de mieux cerner l'erreur de mesure.

2) Relevés granulométriques sur le torrent de l'Abéous

Positionnement des relevés :

- Le point de prélèvement n°1 se situe en dessous du hameau des Trons, rive droite. Le site présente, à vue d'œil, de nombreux blocs d'un diamètre conséquent (plus de 10 cm) et est situé à proximité immédiate du torrent. Les berges sont instables et apportent des matériaux parfois imposants (de l'ordre de 30 cm de diamètre intermédiaire), le lit est très enclavé et étroit (de l'ordre de quinze mètres).
- Le point de prélèvement n°2, situé à 50 m à l'aval du premier en rive gauche, possède des caractéristiques à peu près similaires : lit étroit (20m maximum), proximité moins immédiate au torrent (de l'ordre de 2 m), berges érodées.
- Le point de prélèvement n°3 est localisé à environ 100m à l'amont du barrage n°3 et à une distance latérale de l'écoulement permanent de l'ordre de 20m en rive gauche. Le lit y est large ($\approx 70m$) et les berges érodées.
- Le point de prélèvement n°4 a été effectué à 25 m à l'amont de la confluence avec l'Ubaye et à 4 m à coté de l'écoulement actuel. Le lit y est relativement large (35m).

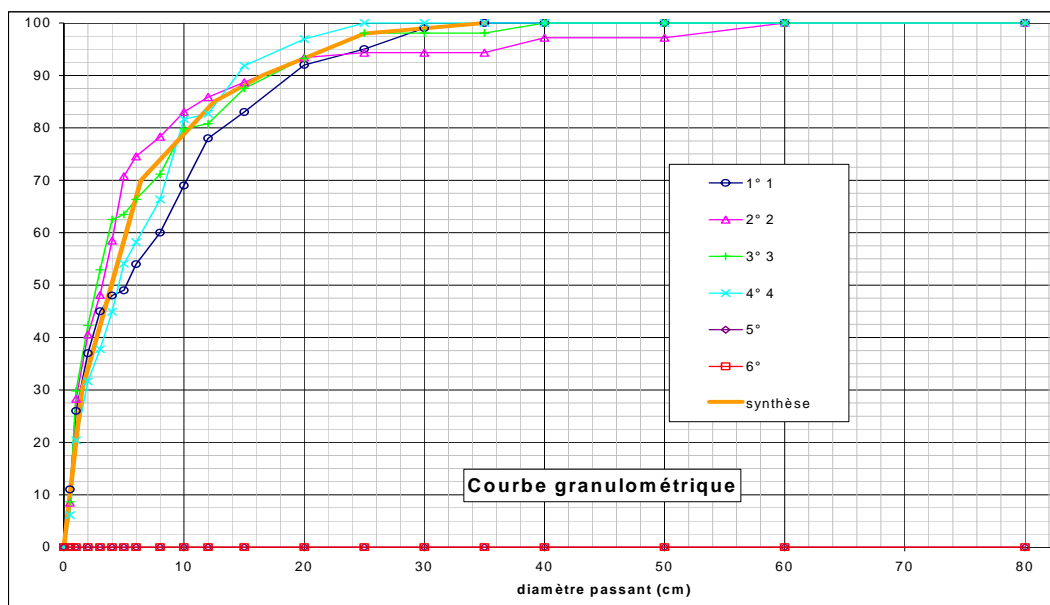
Après analyse granulométrique au bureau, les résultats suivants apparaissent :

Point de prélèvement	1	2	3	4
Diamètre moyen (cm)	7,5	6,7	6,1	6,2

Comme je l'avais « pressenti » au cours de l'échantillonnage, le point de prélèvement n°1 donne des diamètres moyens bien supérieurs aux trois autres. Ceux-ci proviennent, pour la plupart, de la berge s'affouillant considérablement à ce niveau du torrent et le phénomène est donc local. De même, le point de prélèvement n°2 se situe au pied d'une berge qui s'érode de manière significative. Cependant le phénomène n'est pas extrême et l'espace séparant le point de prélèvement du lit mineur commence à devenir significatif pour que le site ne soit pas lessivé par les écoulements courants. De manière plus nette, le site n°3 est exempt de lessivages. La largeur conséquente et la pente contrôlée par le barrage B3 en font une zone préférentielle de dépôt. Le site n°4 ne peut être retenu comme caractéristique au niveau granulométrique car il est remanié presque tous les deux ans, perdant alors la pureté nécessaire à ce type de prélèvement. A partir de ces remarques j'ai alors choisi le diamètre moyen suivant :

$$dm = 6,5 \text{ cm}$$

L'utilisation des formules de transport solide nécessite la connaissance d'autres diamètres caractéristiques issus d'une courbe granulométrique propre au site étudié. D'après les remarques précédentes, ce sont les points 2,3 et 4 qui sont donc utilisés pour former la courbe granulométrique synthétique. Son allure est la suivante :



De ce graphique, par simple report de pourcentage sur la courbe de synthèse puis sur l'axe des diamètres, on obtient les résultats explicités sur l'étude hydraulique de l'Abeous. (dm,d90,d30,d50)

Annexe 5: Page de calcul (élaborée par Christophe Péteuil) hydrogramme de crue et détermination du volume solide de l'Abéous:

Commune : Méolans Revel
Torrent : L'Abéous
Site : confluence

Grandeurs (unités)	Temps de concentration (h)	Débit liquide maximum (m3/s)	Pente d'équilibre (%)	dm (m)	d90/d30	S	Qo (m3/s)	Volume solide (m3)
Q10	1.0	16.0	12.0%	0.065	10.7	2.65	0.07	11 126
Q100		42.0						30 913

t (h)	Q ₁₁₀ (m ³ /s)	V ₁₁₀ (m ³)	Q _{s10} (m ³ /s)	V _{s10} (m ³)	Q ₁₁₀₀ (m ³ /s)	V ₁₁₀₀ (m ³)	Q _{s100} (m ³ /s)	V _{s100} (m ³)
0.00	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.17	0.35	104	0.03	9	0.91	273	0.10	31
0.33	2.84	1060	0.39	134	7.46	2784	1.12	397
0.50	7.39	4130	1.11	582	19.40	10841	3.08	1656
0.67	11.99	9944	1.85	1470	31.47	26102	5.11	4114
0.83	15.03	18049	2.36	2732	39.45	47380	6.46	7586
1.00	16.00	27358	2.52	4194	42.00	71815	6.90	11593
1.17	15.22	36724	2.39	5665	39.95	96399	6.55	15626
1.33	13.33	45288	2.07	7003	34.99	118881	5.71	19302
1.50	10.96	52576	1.69	8131	28.78	138011	4.66	22411
1.67	8.58	58438	1.30	9026	22.52	153399	3.60	24888
1.83	6.45	62946	0.95	9701	16.93	165232	2.67	26770
2.00	4.69	66287	0.67	10190	12.31	174003	1.91	28143
2.17	3.32	68688	0.46	10531	8.70	180306	1.32	29110
2.33	2.29	70370	0.30	10760	6.01	184721	0.88	29771
2.50	1.55	71521	0.19	10909	4.07	187744	0.58	30209
2.67	1.03	72295	0.12	11004	2.70	189775	0.37	30492
2.83	0.67	72806	0.07	11061	1.77	191116	0.23	30670
3.00	0.43	73139	0.04	11094	1.14	191989	0.14	30778
3.17	0.28	73352	0.02	11112	0.73	192550	0.08	30842
3.33	0.17	73488	0.01	11121	0.46	192905	0.04	30879
3.50	0.11	73573	0.00	11125	0.29	193129	0.02	30898
3.67	0.07	73626	0.00	11126	0.18	193268	0.01	30908
3.83	0.04	73658	0.00	11126	0.11	193353	0.00	30912
4.00	0.03	73678	0.00	11126	0.07	193406	0.00	30913
4.17	0.02	73690	0.00	11126	0.04	193437	0.00	30913
4.33	0.01	73698	0.00	11126	0.02	193457	0.00	30913
4.50	0.01	73702	0.00	11126	0.01	193468	0.00	30913
4.67	0.00	73705	0.00	11126	0.01	193475	0.00	30913
4.83	0.00	73706	0.00	11126	0.01	193479	0.00	30913
5.00	0.00	73707	0.00	11126	0.00	193481	0.00	30913

*Annexe 6 : Méthodes globales pour l'estimation du volume des laves
torrentielles*

(S.Brochot, 1996)

Tableau 1 : principales formules utilisées

	Formule	Nombre de cas	Région/Pays	Type de méthode	Référence
1	$V = C_1 \cdot 13600 \cdot A_d^{0,61}$	551	Japon	Régression	Takei (1984)
2	$V = K \cdot A_d \cdot I_c$	1420	Autriche	Conceptuel	Kronfellner-Kraus (1985)
3	$V / A_d = C_2 \cdot 755,1 \cdot A_d^{-0,218}$ <i>1ha < A_d < 10000 km²</i> <i>2 < C₂ < 50, mais</i> <i>6 < C₂ < 20 pour un événement centennial</i>	16	Canton d'Uri (Suisse)	Empirique	Zeller (1976) ; proposé comme norme pour le canton d'Uri
4	$V = 29100 \cdot A_d^{0,67}$	62	Trentino (Italie)	Conceptuel	D'Agostino (1996)
5	$V = 39 \cdot A_d \cdot I_c^{1,5} \cdot IG \cdot IT^{-0,3}$ <i>IT = 1 pour les laves</i> <i>IT = 2 pour les écoulements hyperconcentrés</i> <i>IT = 3 pour le charriage</i>	62	Trentino (Italie)	Conceptuel	D'Agostino et al. (1996)
6	$V = L_c (6,4 \cdot S_f - 23)$ si $7\% < S_f < 15\%$ $V = L_c (110 - 2,5 \cdot S_f)$ si $15\% < S_f < 40\%$	82	Suisse	Empirique (courbe enveloppe)	Rickenmann (1997)
7	$V100 = 0,49 \cdot A_d \cdot I_{bv}^{1,6} \cdot IGM$ $(SNV+2)^{0,2}$ Valable pour $I_{bv} < 200\%$	12	Alpes françaises	Conceptuel	Bianco et al. (2001)

Avec :

V : Volume des laves torrentielles ;
V100 : :Volume centennial des laves torrentielles (m³) ;
A_d : Superficie du bassin versant (km²) ;
S_f : pente du cône de déjection (%) ;
L_c : longueur du torrent (m) ;
I_c : pente moyenne du torrent (%) ;
I_{bv} : dénivelée spécifique ;
C₁, C₂ : paramètre dépendant de la fréquence ;
IG : indice géologique de D'Agostino ;
IT : indice de torrentialité de D'Agostino,
IGM : indice géologique selon Marie (voir formule ci-après) ;
SNV : superficie non végétalisée (%) ;
K : facteur de torrentialité de Kronfellner-Kraus

Tableau 2 :
Elaboration de l'indice géologique IGM utilisé dans le modèle de Bianco et al. (2001)

Classes Marie	Description	Classes D'Agostino
1 ; Formations rocheuses cohérentes : écroulements ou éboulisation à gros blocs	a. Granites/roches volcaniques : diorites, microdiorites, roches vertes b. Molasse/calcaires massifs/grès type Annot c. Gneiss/certains micaschistes	0 1 4
2. Formations rocheuses fracturées : éboulisation avec blocs décimétriques	a. Dolomies, quartzites/brèches et conglomérats, certains grès, cargneules/calcaires marneux b. Calcschistes et schistes, certains micaschistes	2 4
3. Formations rocheuses peu cohérentes : teneur importante en argile	a. Marnes, schistes et grès en association (type Houiller) schistes argileux b. Certains flyschs	3 3
4. Formations meubles cohérentes : terrains facilement mobilisables avec infiltrations possibles	Moraines, fluvio-glaciaire, alluvions, éboulis, produits d'altération	5
5. Formations meubles peu cohérentes : ayant subi un mouvement actuel ou ancien	Eboulements, terrains glissés, coulées boueuses	5
6. Roches solubles	Gypse	N'existe pas ; à classer selon l'étude

L'indice (1 à 10) se calcule à partir des surfaces en pourcentage dans les différentes classes pondérées par une note représentant le potentiel en volume de matériaux produits par les laves.

On a donc :

$$\text{IGM} = (1 . (\text{surf. en \% en classe 1}) + 2 . (\text{surf. en \% en classe 2}) + 10 . (\text{surf. en classe 3 à 6})) / 100$$

NB : Des notes distinctes seraient à attribuer aux classes 3 à 6, mais nous ne disposons pas de connaissances suffisantes pour entrer dans ces nuances.

Annexe 7 : Démarche d'utilisation du logiciel « EFLvs4 »

(P.COUSSOT, 1993)

Outil numérique :

Il est fait en Visual Basic sous excel.

Préparation des données :

1. Plage de cellule de deux colonnes contenant le profil sous la forme d'une série de points (x,z)
2. Plage de cellule de deux colonnes contenant l'hydrogramme liquide sous la forme d'une série (t, Q_{liquide}), Q en heure
3. Largeur du lit constante
4. Pente d'équilibre amont
5. Paramètres granulométriques
6. Cellule positionnant la plage d'écriture des résultats (une seule cellule suffit). Attention qu'il n'y ait rien à droite et en bas, sinon ça écrase
7. Résultats affichés (profil pour tous les pas de temps, profil à la pointe de crue, profil en fin de crue)
8. les paramètres de calcul :
 - Rapport de prolongement : le profil initial est le profil saisi en 1 prolongé de la pente d'équilibre amont sur une longueur égale à la longueur du profil de 1 multiplié par ce rapport de prolongement. L'objectif est de contrôler que le profil modifié est toujours en contact avec la pente d'équilibre amont, sinon (création d'une contre-pente, d'un seuil), il faut augmenter le rapport de prolongement ;
 - Nombre d'itération suivant x : calcule Δx en tenant compte du prolongement dans le profil ;
 - Nombre d'itération suivant t : le calcul propose une valeur minimale du nombre d'itérations pour que les pentes restent dans l'intervalle initial (paragraphe précédent). Donc il faut prendre une valeur supérieure.

Le calcul est fait avec les conditions aux limites suivantes :

- Seuil en z_0 donc z_0 est constant
- Apport solide constant en amont correspondant à la pente d'équilibre amont.

La ligne initiale est une interpolation de la ligne indiquée dans les cellules, prolongée par la pente d'équilibre sur des intervalles de Δx .

Un bouton permet de calculer le Δt comme décrit précédemment (en fait, je prend la moitié du temps calculé suivant la formule précédente pour « affiner l'intégration »).

Le reste n'est que l'itération successive de l'équation 4 avec un pas de temps Δt .

Annexe 8 : Utilisation du logiciel de calcul des hauteurs et débits de laves torrentielles « Lavfoprtn.doc »

Rédigé par **Philippe FREY** :

Il ne s'agit pas d'un mini logiciel figé. Ne pas hésiter à le manipuler sous réserve d'une connaissance minimale d'Excel. Il est livré en mode protégé : les cellules verrouillées ne peuvent pas être modifiées tant que la protection n'est pas enlevée.

Objectif :

Calcul de la vitesse et du débit connaissant la hauteur d'une section trapézoïdale de fruit unitaire ou de section rectangulaire de fruit nul

Calcul de la hauteur et de la vitesse connaissant le débit

Comparaison de la lave et des hauteurs de berge sous forme graphique

Bibliographie

COUSSOT (1996) Les laves torrentielles. Connaissances à l'usage du praticien. Collection Etudes : équipements pour l'eau et l'environnement N°23. Cemagref Editions.

Formulation : voir §4.2 de Coussot (1996)

$$U = \left(\frac{\tau_c}{K} \right)^3 h \left[\frac{1}{A} \left(\frac{\rho g R_h \sin i}{\tau_c} - 1 \right) \right]^{\frac{10}{3}}$$

τ_c : seuil de contrainte

ρ : masse volumique (kg/m³)

K : coefficient de la loi de comportement

K et τ_c sont les paramètres rhéologiques

U : Vitesse moyenne (m/s)

H : hauteur (m)

I : angle de la pente : (tan i = pente en m/m)

- Pour une section trapézoïdale avec berges inclinées à 45° :

$$R_h = \frac{B_h + h^2}{B + 2\sqrt{2}h} : \text{rayon hydraulique (m)} \text{ Attention : l'expression de } R_h \text{ donnée en pages 74 de Coussot}$$

(1996) est fautive. B : largeur de plat fond (m)

$$A = 1.93 - 0.6 \arctan \left[\left(\frac{0.4h}{B} \right)^{20} \right] \text{ Formule valable si } h/B < 4 \text{ Si } h/B < 2 \text{ (presque toujours vrai), } A = 1.93$$

- Pour une section rectangulaire :

$$R_h = \frac{hL}{l + 2h} \text{ et } A = 1.93 - 0.43 \arctan \left[\left(\frac{10h}{L} \right)^{20} \right] \text{ formule vraie si } h/L < 1 \text{ si } h/L < 0.1 \text{ on a } A = 1.93$$

L : largeur du canal

Définition des variables et paramètres

Les valeurs à saisir sont sur fond gris.

$\tau_{auc}/\rho = \tau_c / \rho$ = seuil de contrainte divisé par la masse volumique : peut être approché en mesurant les hauteurs limites d'arrêt d'un dépôt sur une pente connue (voir Coussot, 1996)

$K/\tau_{ac} = K/\tau_c$: peut se mesurer au laboratoire sur fraction fine. En l'absence de données, prendre $K/\tau_c = 0.3$.

Profil : nom du profil en travers (facultatif)

Distance : abscisse du profil (uniquement pour graphique) : le 0 peut être pris n'importe où.

Base : largeur au plat-fond de la section trapézoïdale de fruit unité (nécessite d'avoir préalablement calé une telle section réelle de façon à conserver les surfaces mouillées)

Fruit : 1 ou 0 (ne pas utiliser d'autres valeurs de fruit, pour l'instant)

Pente : en m/m

h : hauteur en m

A = A (voir ci dessus)

U : vitesse moyenne (débit que divise la section mouillée)

Q : débit en m³/s

h/Base : rapport de la hauteur d'écoulement à la base (trapézoïdal) ou à la largeur (rectangulaire)

Froude : valeur du nombre de Froude

Fond : cote de fond (m)

S_{libre} : calcul de Fond+h(m)

RG (m) : cote de la berge en rive gauche

RD (m) : cote de la berge en rive droite

RG - SL(cm) : calcul de la différence de cote de la berge en rive gauche et la surface libre (en cm)

RD - SL(cm) : calcul de la différence de cote de la berge en rive droite et la surface libre (en cm)

Utilisation

Pour une lave donnée : saisir les paramètres rhéologiques

Pour un profil donné, saisir la base, la pente

Saisir la hauteur pour le calcul immédiat de la vitesse et du débit

Si on connaît le débit, utiliser la procédure « sélection valeur cible » pour le calcul de la hauteur qui correspond à la valeur du débit désiré (voir aide d'Excel).

Cette procédure est automatisée par la macro laveberge.xls.

Ouvrir la macro, saisir dans « valeur cible » la valeur du débit désiré, se placer sur la cellule « débit » dans lavfoprtn.xls, faire Ctrl q, le débit désiré s'affiche et la valeur de hauteur correspondante est calculée. Répéter l'opération pour chaque cellule de débit.

Pour rajouter des profils, copier une ligne entière sous les lignes déjà existantes, mais nécessité de lever la protection des cellules s'il y a lieu.

Pour la comparaison entre hauteurs de berge, saisir les cotes de fond, des berges pour un calcul immédiat de la différence entre berges et la surface libre

Graphique : directement collé dans la feuille

Sous forme d'un nuage de points XY. En abscisse : distance

En ordonnées : fond (colonne J), S_{libre} (colonne K), RG (colonne L), RD (colonne C).

D'autres graphiques peuvent être créés : par exemple débit en fonction de la base (colonne C)

Annexe 9 : Feuille de calcul Excel du logiciel « Lavfoprtn.doc » appliquée au torrent de l'Abéous pour différents débits

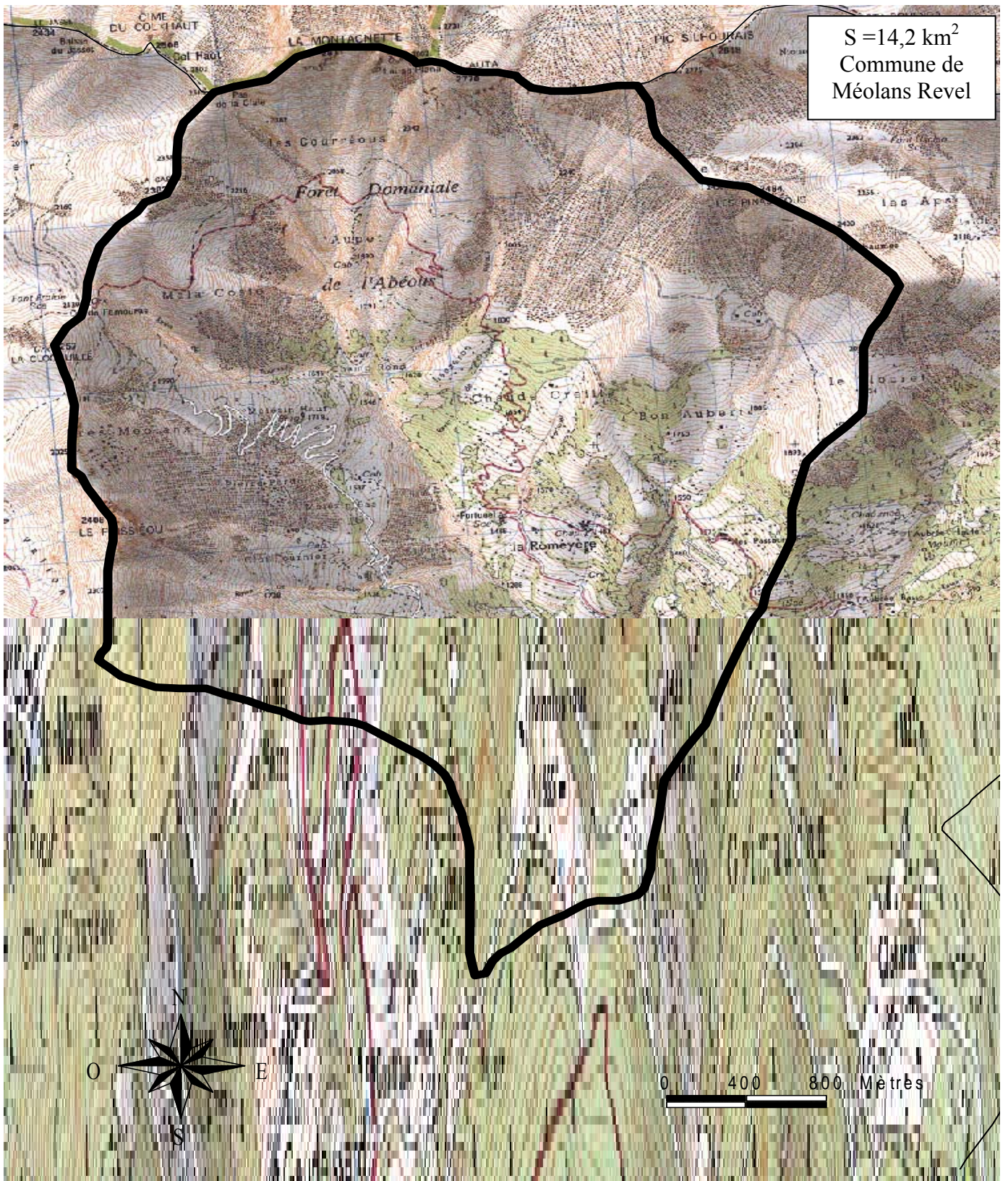
P10,20...160 :Profils en travers

Lave en régime permanent uniforme dans une section rectangulaire ou trapézoïdale de fruit unité																
	Tauc/ro	1.35						fruit =0		Autre valeur de fruit non valable						
	K/tauc	0.3						fruit =1								
Profil	Distance	Base	Fruit	penne m/m	h (m)	A	U (m/s)	Q (m3/s)	h/Base	Froude	Fond	SLibre	RG(m)	RD(m)	RG-SL (cm)	RD-SL (cm)
P10	53.18	30	0	0.11	2.45	1.923	2.72	200.00	0.08	0.56	1028.8	1031.3	1032.7	1031.6	143	33
P20	113.96	23.2	1	0.12	2.33	1.93	3.36	200.00	0.10	0.74	1033.4	1035.7	1038.25	1037.7	255	200
P30	165.46	33	1	0.09	2.79	1.93	2.00	200.04	0.08	0.40	1037.3	1040.1	1040.9	1042.5	81	241
P40	360.49	25	1	0.08	3.29	1.93	2.15	200.00	0.13	0.40	1053.6	1056.9	1057.8	1058.87	88	195
P50	469.74	26	1	0.09	2.93	1.93	2.36	200.00	0.11	0.46	1062.5	1065.5	1068.1	1069.1	265	365
P60	695.48	35	1	0.12	2.15	1.93	2.50	200.00	0.06	0.56	1088.5	1090.7	1100.67	1094.15	999	347
P70	745.21	26	1	0.09	2.93	1.93	2.36	200.00	0.11	0.46	1091.9	1094.8	1102.45	1097.77	762	294
P80	876.8	32	1	0.1	2.56	1.93	2.26	200.00	0.08	0.47	1105.6	1108.2	1109.68	1110.8	152	264
P90	1037.5	35	1	0.08	3.06	1.93	1.71	200.00	0.09	0.33	1123	1126.1	1127.14	1129.86	108	380
P100	1283.7	35	1	0.08	3.06	1.93	1.71	200.00	0.09	0.33	1139.7	1142.8	1148.8	1147.55	604	479
P110	1424.12	37	1	0.11	2.29	1.93	2.22	200.00	0.06	0.48	1148.6	1150.9	1159.05	1155.85	820	500
P120	1584	30	1	0.09	2.84	1.93	2.14	200.00	0.09	0.42	1172.3	1175.1	1179	1178.66	386	352
P130	1733.6	28	1	0.09	2.88	1.93	2.24	200.00	0.10	0.44	1183.5	1186.4	1194.05	1190.38	765	398
P140	1948.6	23	1	0.09	3.01	1.93	2.55	200.00	0.13	0.50	1205.2	1208.2	1210.8	1212.4	259	419
P150	2115.9	25	1	0.08	3.29	1.93	2.15	200.00	0.13	0.40	1222.5	1225.8	1225.5	1226.3	-29	51
B2	2171.16	35	1	0.08	3.07	1.93	1.72	200.32	0.09	0.33	1232.1	1235.2	1235.14	1235.14	-7	-7
P160	2295.5	40	1	0.09	2.69	1.93	1.74	200.00	0.07	0.35	1249.7	1252.4	1252.3	1255.5	-9	311

Suite de la page précédente :

P10	53.18	30	0	0.11	2.56	1.913	3.91	300.00	0.09	0.78	1028.8	1031.4	1032.7	1031.6	132	22
P20	113.96	23.2	1	0.12	2.44	1.93	4.80	300.00	0.11	1.03	1033.4	1035.8	1038.25	1037.7	244	189
P30	165.46	33	1	0.09	2.91	1.93	2.87	300.00	0.09	0.56	1037.3	1040.2	1040.9	1042.5	69	229
P40	360.49	25	1	0.08	3.44	1.93	3.07	300.00	0.14	0.56	1053.6	1057.1	1057.8	1058.87	73	180
P50	469.74	26	1	0.09	3.06	1.93	3.37	300.00	0.12	0.65	1062.5	1065.6	1068.1	1069.1	252	352
P60	695.48	35	1	0.12	2.25	1.93	3.59	300.00	0.06	0.79	1088.5	1090.8	1100.67	1094.15	989	337
P70	745.21	26	1	0.09	3.06	1.93	3.37	300.00	0.12	0.65	1091.9	1095.0	1102.45	1097.77	749	281
P80	876.8	32	1	0.1	2.67	1.93	3.24	300.00	0.08	0.66	1105.6	1108.3	1109.68	1110.8	141	253
P90	1037.5	35	1	0.08	3.19	1.93	2.46	300.00	0.09	0.46	1123	1126.2	1127.14	1129.86	95	367
P100	1283.7	35	1	0.08	3.19	1.93	2.46	300.00	0.09	0.46	1139.7	1142.9	1148.8	1147.55	591	466
P110	1424.12	37	1	0.11	2.39	1.93	3.18	300.00	0.06	0.68	1148.6	1151.0	1159.05	1155.85	810	490
P120	1584	30	1	0.09	2.97	1.93	3.07	300.00	0.10	0.60	1172.3	1175.3	1179	1178.66	373	339
P130	1733.6	28	1	0.09	3.01	1.93	3.21	300.00	0.11	0.62	1183.5	1186.5	1194.05	1190.38	752	385
P140	1948.6	23	1	0.09	3.15	1.93	3.64	300.00	0.14	0.69	1205.2	1208.3	1210.8	1212.4	245	405
P150	2115.9	25	1	0.08	3.44	1.93	3.07	300.00	0.14	0.56	1222.5	1225.9	1225.5	1226.3	-44	36
B2	2171.16	35	1	0.08	3.19	1.93	2.46	300.00	0.09	0.46	1232.1	1235.3	1235.14	1235.14	-19	-19
P160	2295.5	40	1	0.09	2.80	1.93	2.50	300.00	0.07	0.49	1249.7	1252.5	1252.3	1255.5	-20	300
P10	53.18	30	0	0.11	2.63	1.898	5.06	400.00	0.09	1.00	1028.8	1031.5	1032.7	1031.6	125	15
P20	113.96	23.2	1	0.12	2.52	1.93	6.16	400.00	0.11	1.30	1033.4	1035.9	1038.25	1037.7	236	181
P30	165.46	33	1	0.09	3.00	1.93	3.71	400.00	0.09	0.71	1037.3	1040.3	1040.9	1042.5	60	220
P40	360.49	25	1	0.08	3.54	1.93	3.95	400.00	0.14	0.71	1053.6	1057.2	1057.8	1058.87	63	170
P50	469.74	26	1	0.09	3.16	1.93	4.34	400.00	0.12	0.82	1062.5	1065.7	1068.1	1069.1	242	342
P60	695.48	35	1	0.12	2.32	1.93	4.62	400.00	0.07	1.00	1088.5	1090.8	1100.67	1094.15	982	330
P70	745.21	26	1	0.09	3.16	1.93	4.34	400.00	0.12	0.82	1091.9	1095.1	1102.45	1097.77	739	271
P80	876.8	32	1	0.1	2.75	1.93	4.18	400.00	0.09	0.84	1105.6	1108.4	1109.68	1110.8	133	245
P90	1037.5	35	1	0.08	3.29	1.93	3.18	400.00	0.09	0.58	1123	1126.3	1127.14	1129.86	85	357
P100	1283.7	35	1	0.08	3.29	1.93	3.18	400.00	0.09	0.58	1139.7	1143.0	1148.8	1147.55	581	456
P110	1424.12	37	1	0.11	2.47	1.93	4.11	400.00	0.07	0.86	1148.6	1151.0	1159.05	1155.85	802	482
P120	1584	30	1	0.09	3.06	1.93	3.95	400.00	0.10	0.76	1172.3	1175.4	1179	1178.66	364	330
P130	1733.6	28	1	0.09	3.11	1.93	4.14	400.00	0.11	0.79	1183.5	1186.6	1194.05	1190.38	742	375
P140	1948.6	23	1	0.09	3.25	1.93	4.68	400.00	0.14	0.88	1205.2	1208.5	1210.8	1212.4	235	395
P150	2115.9	25	1	0.08	3.54	1.93	3.95	400.00	0.14	0.71	1222.5	1226.0	1225.5	1226.3	-54	26
B2	2171.16	35	1	0.08	3.29	1.93	3.18	400.00	0.09	0.58	1232.1	1235.4	1235.14	1235.14	-29	-29
P160	2295.5	40	1	0.09	2.89	1.93	3.23	400.00	0.07	0.63	1249.7	1252.6	1252.3	1255.5	-29	291

Annexe 11: Délimitation du bassin versant de l'Abéous sous SIG (Arcview)



Annexe 12 : Photos aériennes à différentes périodes au niveau de « Maison Blanche » (source : IGN)



La situation en 1948, la bande active longe la piste, remarquer le tressage et les îlots gagnés par la végétation.

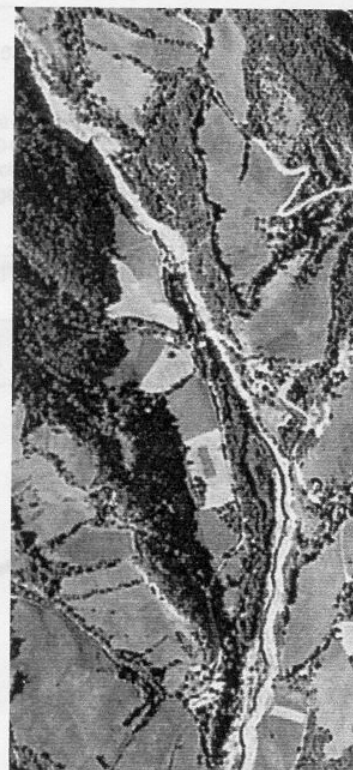


Après la crue de 1973, les dépôts engravent des secteurs actifs en 1948 (hormis la pâture).



En 1982, le torrent semble fixé dans un lit unique, les digitations sont en cours de végétalisation.

échelle 1 : 10 000
sources: photos IGN
campagnes Guillestre -
Allos 1948 ; 1973 ;
1982 ; 1995.



En 1995, la bande active s'est réduite et le torrent s'est brusquement incisé.

*Annexe 13 : Estimation des débits liquides de crue via l'utilisation de l'outil
« CALCUL HYDROLOGIQUE »*

Caractéristiques du bassin versant utilisées pour calculer le temps de concentration (Feuille « Bassin »):

Bassin	Hauteur min	Hauteur max	Δz	x_{max}	$L=\Delta x$	Pente moyenne
	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	
Abéous	1023	2811	1788	6350	6350	28.2%
Surface (km²)			14.2			

Calcul du temps de concentration (t_c) (Feuille « Bassin »):

<u>Formules</u>	t_c
	(h)
Turazza-Passini	1.17
Izzard-Meunier (bassin végétalisé)	1.57
Izzard-Meunier (bassin dégradé)	0.69
SCS	0.89
CN 65	
Socose Bv rapide = durée caractéristique de crue = Dr	1.9
Giandotti	1.03
Temps de concentration retenu (h)	1

Caractéristiques du bassin versant pour calculer le débit décennal (Feuille « Q10max »):

Pluie annuelle (mm)	$\frac{\text{Débit}_{\text{pointe}}}{\text{Débit}_{\text{moyen}}}$ (crue)	Coefficient de Montana b	Pluie décennale journalière (mm)	Gradex pluie (24h) (mm)	Pluie centennale journalière (mm)	<u>Coefficient de Montana obtenus</u>	
900	1.70	0.65	85.0	14.9	120.00	a (mm)=27.9	a'(mm)=4.9

Calcul du débit décennal par différentes méthodes (Feuille « Q10max »):

<u>CRUPEDIX</u>	Coefficient régional R	$Q_{\text{décennal Nationale}}$	Coefficient de correction R23d	$Q_{\text{décennal régionale}}$
		(m ³ /s)		(m ³ /s)
Abéous	1	9.4	1.5	15.7

<u>RATIONNELLE</u>	Coefficient de ruissellement décennal	$P_{\text{décennale}(t_c)}$	$Q_{\text{décennal}}$
		(mm)	(m ³ /s)
Abéous	0.25	31.9	25.2

<u>S.C.S.</u>	Durée caractéristique SCS	Pluie décennale	hauteur d'infiltration	Coefficient d'apport	$Q_{\text{décennal}}$
	(h)	(mm)	(mm)		(m ³ /s)
Abéous	2.8	51.0	61.8	0.3	28.10

Calcul du débit centennal (Feuille Q100 max)

<u>Grandeurs</u>	Surface	t_c	b	Gradex des débits pour T>10ans	$\frac{\text{Débit}_{\text{pointe}}(\text{crue})}{\text{Débit}_{\text{moyen}}}$
	(km ²)	(h)		(m ³ /s)	
Méolans	14.2	1.0	0.65	32.8	1.70

<u>Grandeurs à entrer</u>	Bassin de référence					Bassin d'étude	
	S (km ²)	Q (10) (m ³ /s)	Q(2) (m ³ /s)	Gq(T<10)m ³ /s	P10/24(mm)	Q ₂ m ³ /s	Gq(T<10)m ³ /s
Ubaye Barcelonnette	549.00	162.00	75	46.18	66.00	5.89	5.37

<u>GRADEX brutal</u>	Q ₁₀ (m ³ /s)	Q ₁₀₀ (m ³ /s)	k _{100/10}	<u>GRADEX Progressif</u>	Q ₁₀ (m ³ /s)	Q ₁₀₀ (m ³ /s)	k _{100/10}
Méolans	16.0	91.6	6.5	Meolans	16.0	45.7	3.0

<u>RATIONNELLE</u>	C ₁₀₀	P _{100/tc} (mm)	Q ₁₀₀ (m ³ /s)	k _{100/10}
Méolans	0.55	45.1	71.1	3.1

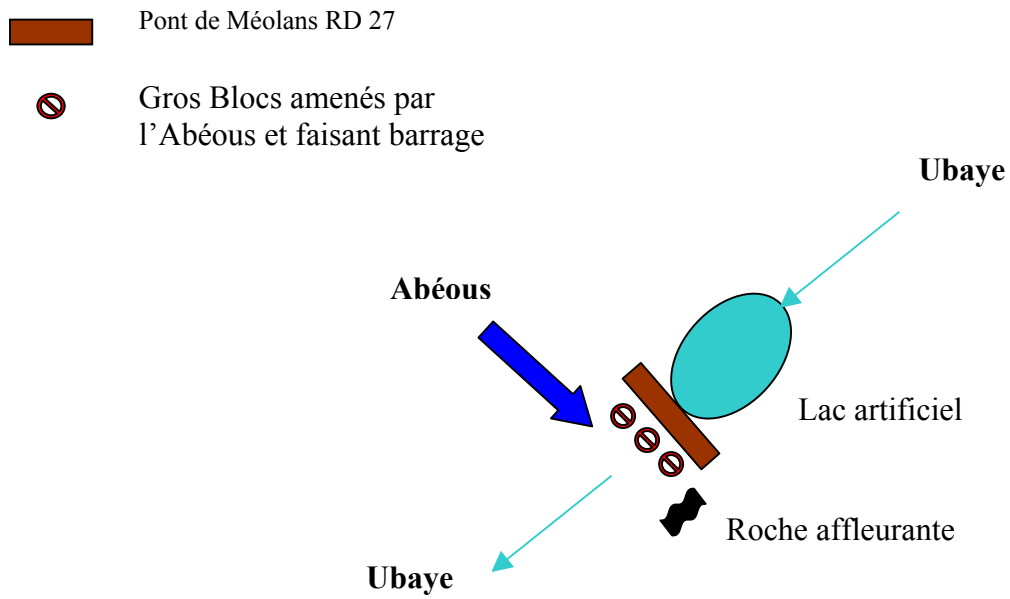
<u>Méthode Sommaire</u>	
Q ₁₀₀ (m ³ /s)	48

<u>S.C.S.</u>	D _r (h)	D _{soo/3} (h)	D _{scs} (h)	P _{100/Dscs} (mm)	J _{scs} (mm)	Ca	r.Ca
Méolans	1.85	3.76	2.81	64.7	51.00	0.5	0.80

<u>S.C.S.</u>	Q _{100 moy} (m ³ /s)	Q ₁₀₀ (m ³ /s)	k _{100/10}
Méolans	47.6	67.3	2.4

Annexe 14 : Situation à la confluence

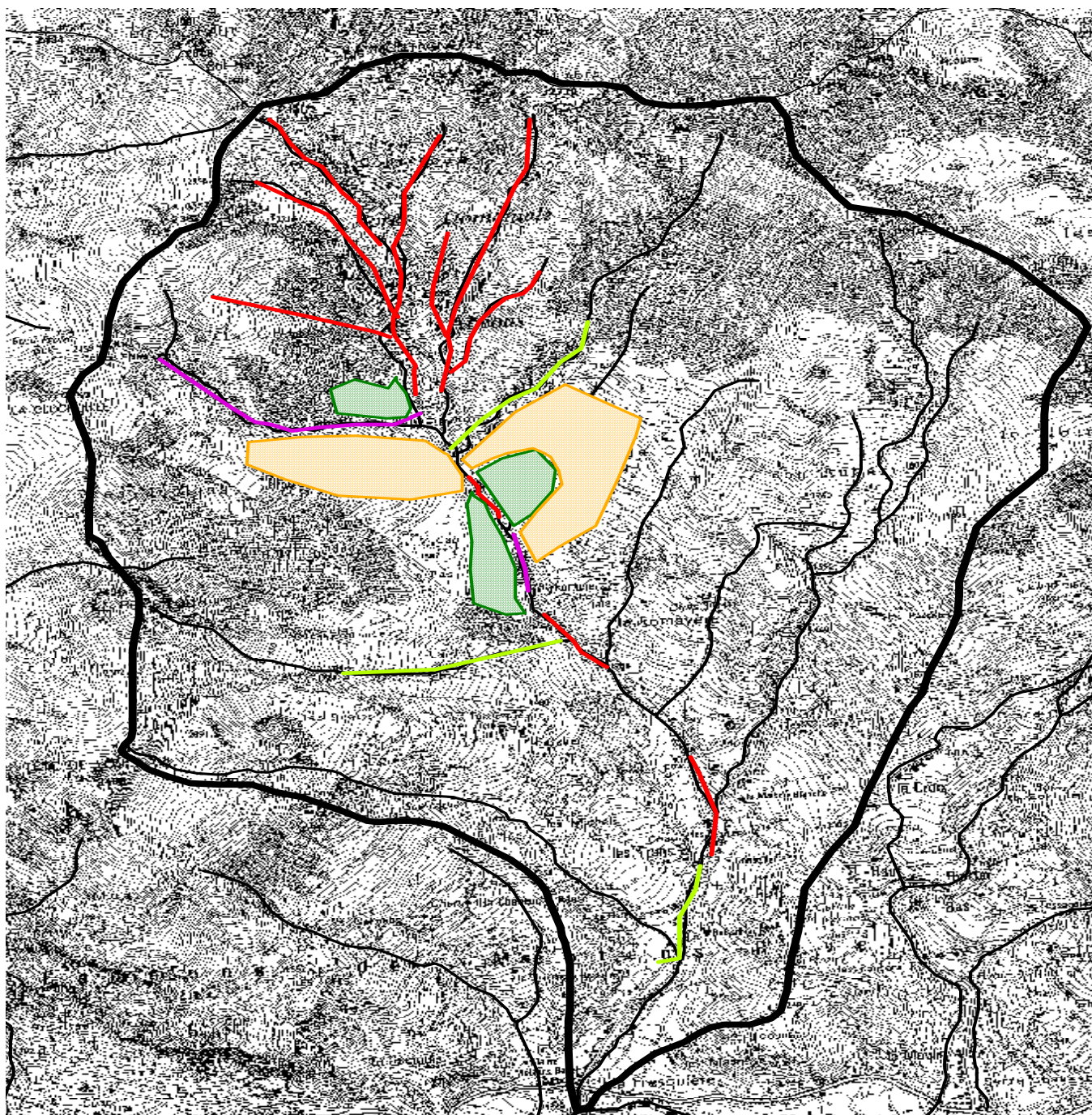
Annexe 14 a : Schéma de la situation actuelle:









Annexe 14 b : Photographie de la situation après la crue de 2003 :



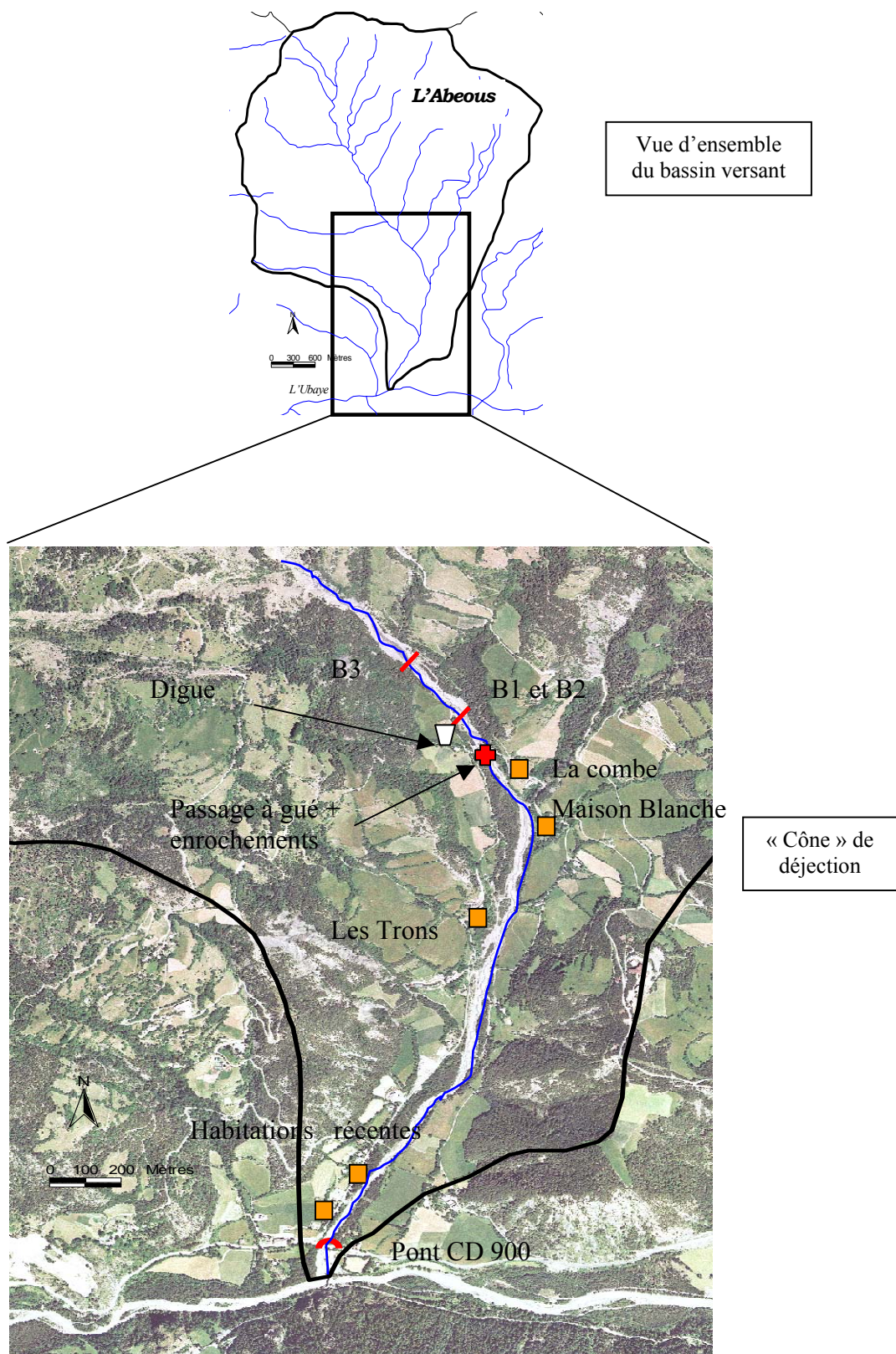
Annexe 15 : Cartographie des phénomènes d'érosion sur le bassin versant de l'Abéous sous SIG (Arcview)



Légende de la figure précédente :

- | | | | |
|---|--------------------------------|---|---|
|  | Erosion importante |  | Glissement de terrain potentiellement actif |
|  | Erosion moyenne |  | Glissement de terrain actif |
|  | Erosion faible mais présente | | |
|  | Délimitation du bassin versant | | |

Annexe 16: Carte de localisation du cône de déjection et des ouvrages



Annexe 17 : Estimation des hauteurs de lave de 2005

Photo : Evaluation de la hauteur de lave de 2005 au niveau du pont CD 900

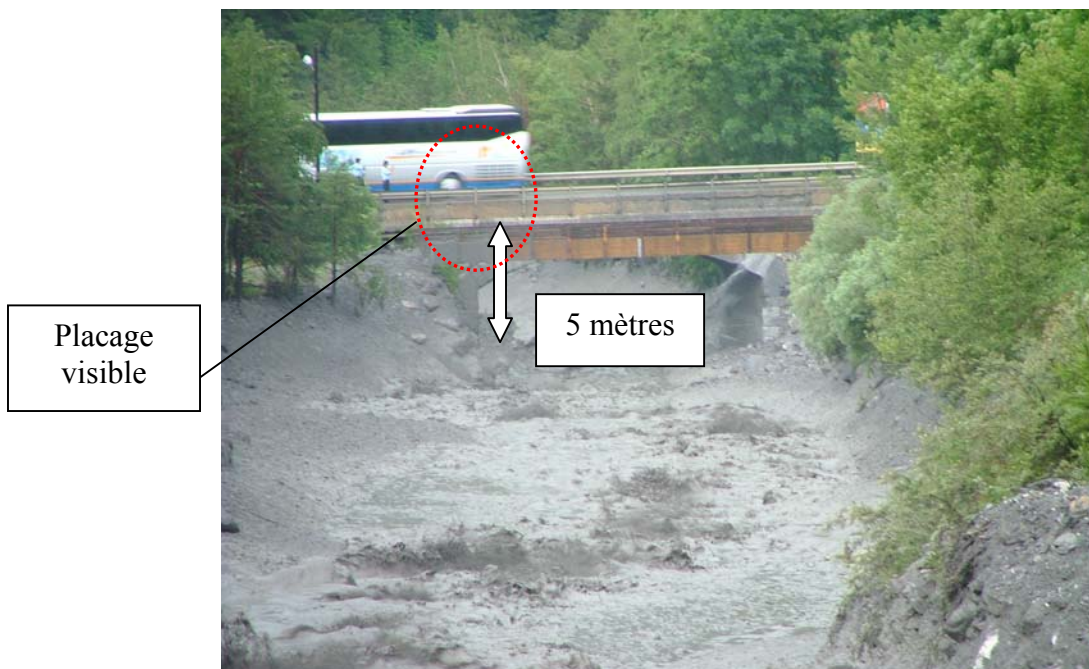
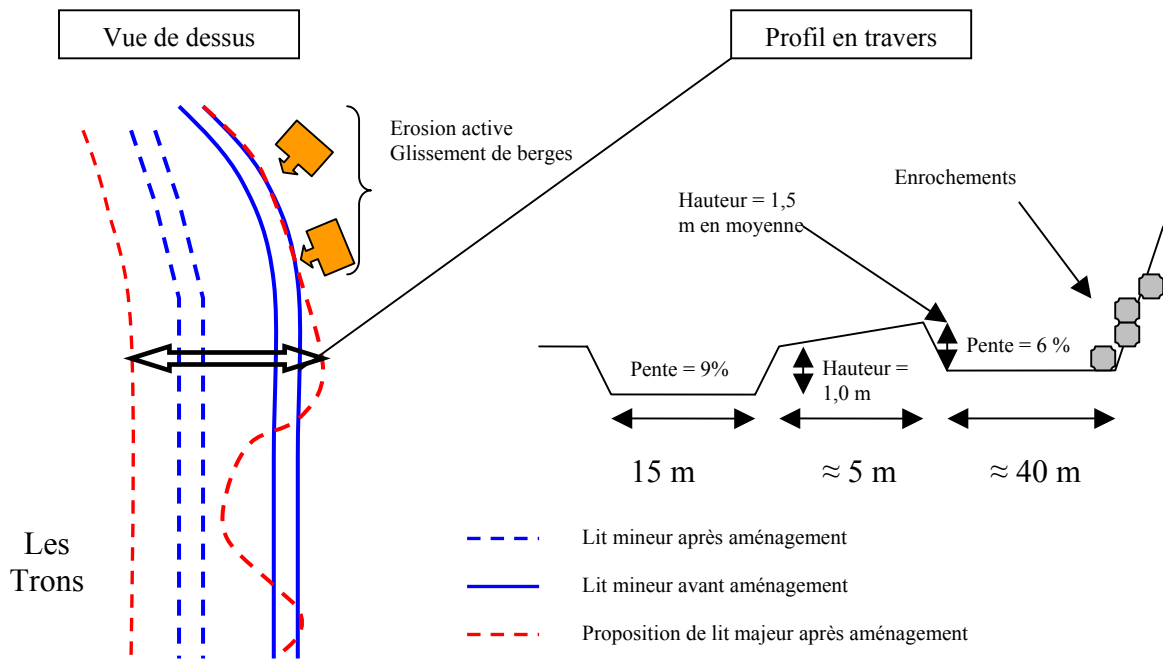


Photo : Evaluation de la hauteur de lave au niveau du barrage B2

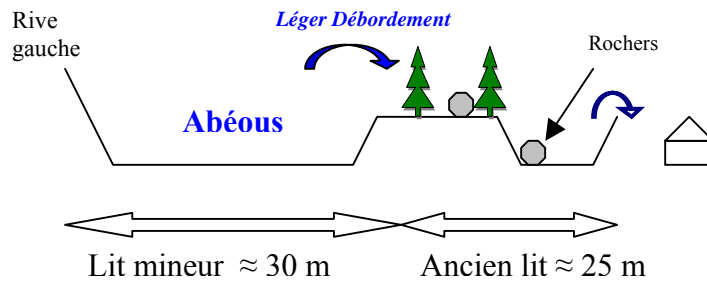


Annexe 18 a: Schéma de principe de la plage de dépôt : (profil en travers)

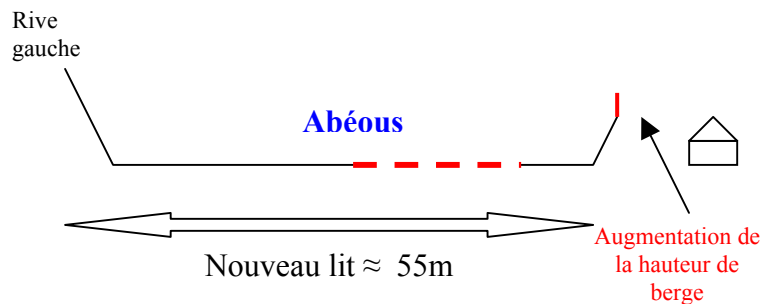


Annexe 18 b: Aménagement de la confluence

Situation actuelle : profil en travers



Situation aménagée : profil en travers



Annexe 19: Localisation de la plage de dépôt sur ortho photographie (Arcview)

Légende des traits : **rouge** : profil en travers GPS, **jaune** : ligne de niveau, **vert** : pente des berges
Légende des flèches : **bleu turquoise** : écoulement actuel ; **bleu marine pointillé** : écoulement après aménagement rejeté en rive droite

