SYNDICAT DU PAYS DE MAURIENNE

PROTECTION DES ENJEUX MENACES SUITE A LA CRUE DE L'ARC DU 29 MAI 2008

SECTEUR DU PONT DU BOCHET

ETUDE PREALABLE

Phase 1

Rapport principal

R – 016 24756/CTB

– juin 2009 –

Pièce N° ***1.1***

HYDRATEC IMMEUBLE L'ORIENT
10, PLACE CHARLES BERAUDIER – 69428 LYON CEDEX 03
TEL. : 04 27 85 48 80 FAX : 04 27 85 48 81
E-MAIL : hydratec_lyon@hydra.setec.fr

SOMMAIRE

Page

1 CADRE ET OBJET DE L'ETUDE 3

2 HYDROLOGIE DE L'ARC ET DE SES AFFLUENTS 4

2.1 BASSIN VERSANT 4

2.2 AMENAGEMENTS HYDROELECTRIQUES DE L'ARC MOYEN 7

2.3 REGIME HYDROLOGIQUE ORDINAIRE DE L'ARC 8

2.4 CRUES DE L'ARC 13

2.4.1 Régime de crue 13
2.4.2 Crues historiques 13
2.4.3 Analyse statistique des crues 17

2.5 APPORTS SOLIDES LATERAUX 23

2.5.1 Bassins versants 23
2.5.2 Les plages de dépôts 27
2.5.3 Estimation des apports solide dans l'Arc en situation naturelle 30

2.6 APPORTS SOLIDES PROVENANT DE L'AMONT 34

3 EVOLUTION MORPHOLOGIQUE DU LIT DE L'ARC 35

3.1 MORPHOLOGIE GENERALE DE L'ARC DANS LE SECTEUR D'ETUDE 35

3.1.1 Le lit de l'Arc entre le barrage de Saint Martin la Porte et le viaduc des Resses. 35
3.1.2 Entre le viaduc des Resses et le Rieubel. 36
3.1.3 Entre le Rieubel et pont d'Arc. 36

3.2 EVOLUTION DU PROFIL EN LONG DU LIT 37

3.3 EVOLUTION EN PLAN DU LIT 39

3.4 DESORDRES OCCASIONNES LORS DE LA CRUE DE MAI 2008 40

4 EVALUATION DU TRANSPORT SOLIDE PAR CHARRIAGE 43

4.1 GRANULOMETRIE DES MATERIAUX DE L'ARC 43

4.1.1 Granulométrie de 1992 43
4.1.2 Granulométrie de 2009 44
4.1.3 Synthèses des évolutions granulométriques observées dans le secteur d'étude 45

4.2 CALCUL DU TRANSPORT SOLIDE PAR CHARRIAGE 48

4.2.1 Structure des pentes 48
4.2.2 Formulations du transport solide 51
4.2.3 Evolution de la capacité de charriage annuel 53
4.2.4 Le transport par charriage durant les dernières crues 57

4.3 EVALUATION DU BILAN SEDIMENTAIRE DE L'ARC 58
4.3.1 Méthodologie 58
4.3.2 Crue de 1993 60
4.3.3 Crue de 2000 60
4.3.4 Crue de 2008 61
4.3.5 Bilan sédimentaire entre 1993 et 2008 62
4.4 CONSEQUENCE DE L'EVOLUTION DU TRANSPORT SOLIDE DE L'ARC SUR LES EVOLUTIONS FUTURES DU LIT 64
4.4.1 Evolution de la capacité de charriage annuelle 64
4.4.2 Evolution des apports solides à l'Arc 64
4.4.3 Conséquence sur l'évolution du profil en long de l'Arc 65
5 ANALYSE DES CONDITIONS D'ECOULEMENT DES CRUES 67
5.1 MODELISATION MATHEMATIQUE DES ECOULEMENTS 67
5.1.1 Logiciel utilisé 67
5.1.2 Données topographiques 67
5.1.3 Structure générale du modèle 67
5.2 SIMULATION DES DIFFERENTS ETATS DU LIT 67
5.3 IMPACTS DES APPORTS SOLIDES DES AFFLUENTS 71

ANNEXES

(Voir fascicule d'annexes)

1 CADRE ET OBJET DE L'ETUDE

Le Syndicat du Pays de Maurienne, gestionnaire de l'Arc et ses affluents, s'est engagé depuis 2005 dans un programme d'actions de prévention contre les inondations.

La vallée de la Maurienne est soumise à des crues violentes de l'Arc et de ses affluents, dont la dernière en mai 2008, qui a généré d'importants dégâts sur l'ensemble de la vallée. Sur le tronçon situé en aval de Saint Martin la Porte, les phénomènes d'incision du lit, associés à la ruine du seuil du Bochet lors de la dernière crue ont causé des désordres sur les ouvrages situés en bordure du torrent et mettent en danger certaines infrastructures et équipements (voie ferrées, conduites AEP,…). Des travaux de confortement ont d'ailleurs été engagés en urgence suite à la crue.

Dans ce cadre, le SPM a confié à Hydratec, la réalisation de l'étude préalable ayant pour objectifs :

- L'actualisation du diagnostic morphologique de l'Arc sur le tronçon Saint Martin la Porte – Pont d'Arc
- La définition de scénarios d'aménagement visant à restaurer un fonctionnement équilibré du cours d'eau et à mettre en sécurité les enjeux présents en bordure de l'Arc.

Le présent mémoire constitue le rapport de phase 1 d'état des lieux. Il présente successivement :

- Les caractéristiques hydrologiques de l'Arc dans le périmètre de l'étude, pour la situation naturelle avant aménagements de la vallée et en situation actuelle ;
- L'analyse des principales crues survenues depuis la mise en service des aménagements EDF ;
- L'évolution du transport solide et le fonctionnement morphologique actuel de l'Arc ;
- Les conditions actuelles d'écoulement des crues ;
- Les évolutions futures du lit et les risques pour les ouvrages existants dans le lit.

2 HYDROLOGIE DE L'ARC ET DE SES AFFLUENTS

2.1 BASSIN VERSANT

Le bassin versant total de l'Arc à sa confluence avec l'Isère couvre une superficie de 1957 km².

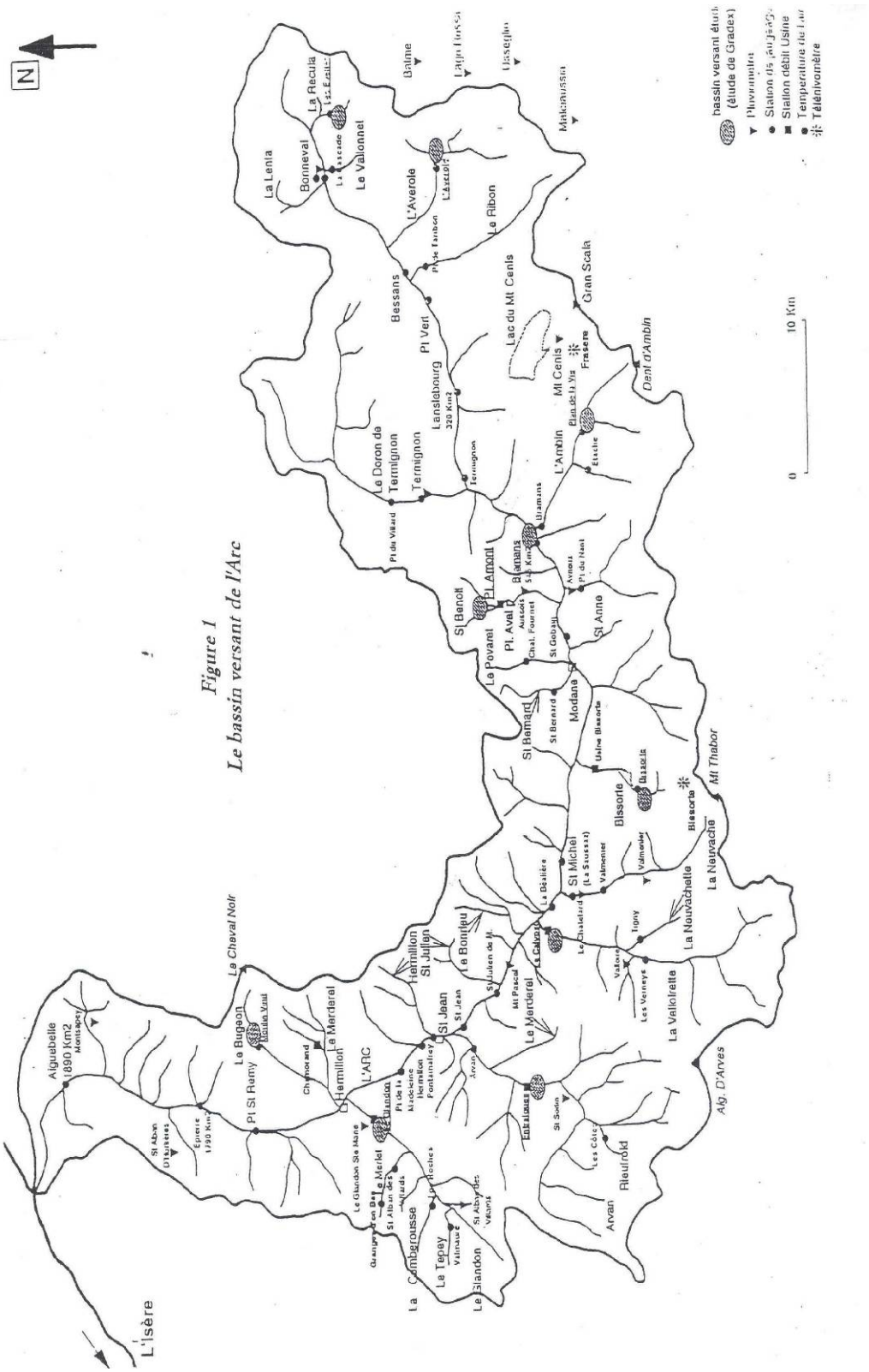
La surface drainée au droit du projet est comprise entre :

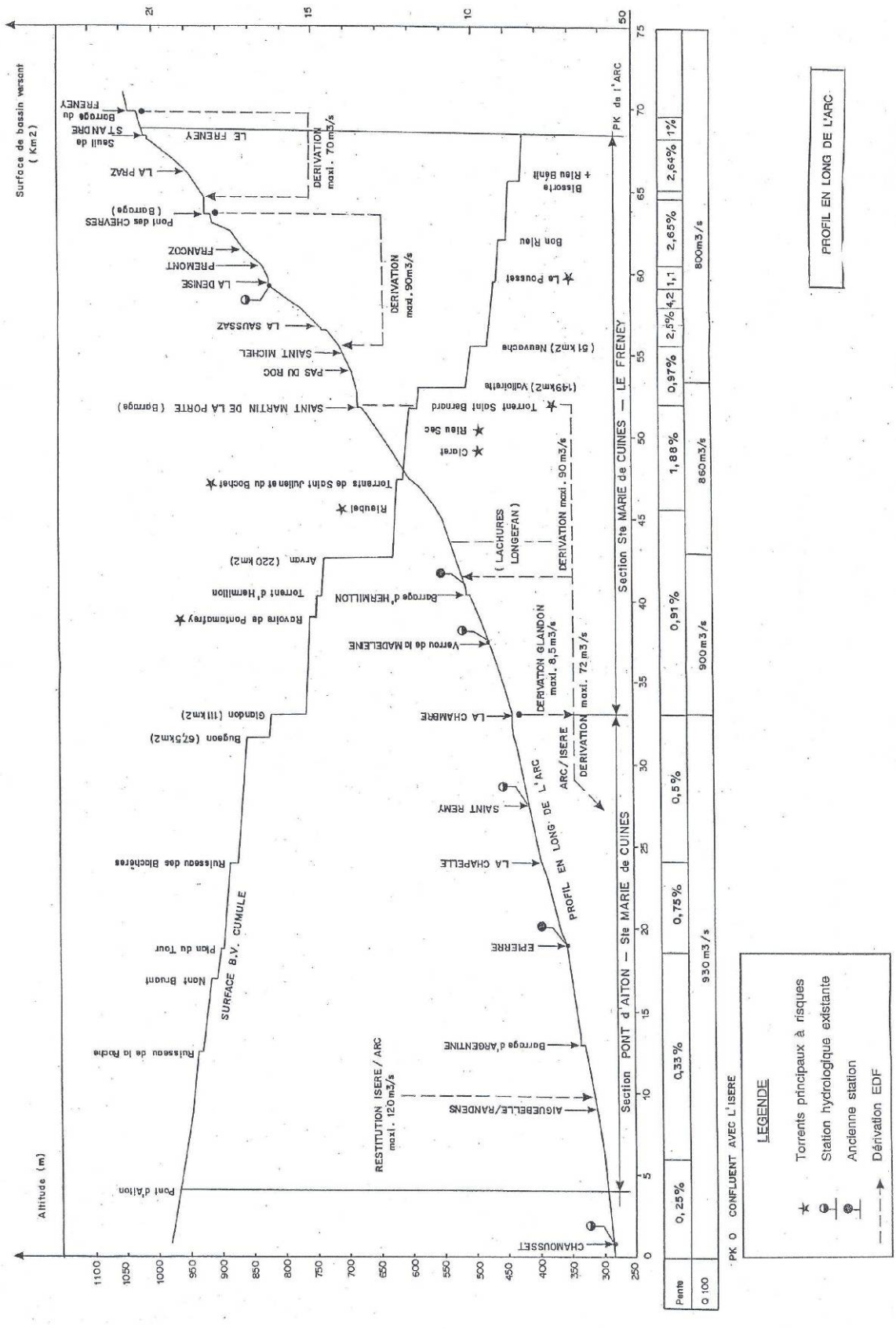
- 1167 km² à Saint Michel de Maurienne, et
- 1244 km² à Saint Jean de Maurienne en aval de Pont d'Arc.

Entre le barrage EDF de Saint Martin la Porte et la confluence de l'Arvan, l'Arc reçoit les principaux affluents ci-après.

	Surface (km²)
Saint Bernard	18.13
Moulins	7.35
Rieu Sec	0.87
Claret	2.74
Bochet	2.72
Saint Julien	19.77
Rieubel	2.59
Total superficie	54.17

Les figures pages suivantes présentent l'ensemble du bassin versant de l'Arc, son profil en long, et les bassins versants affluents.

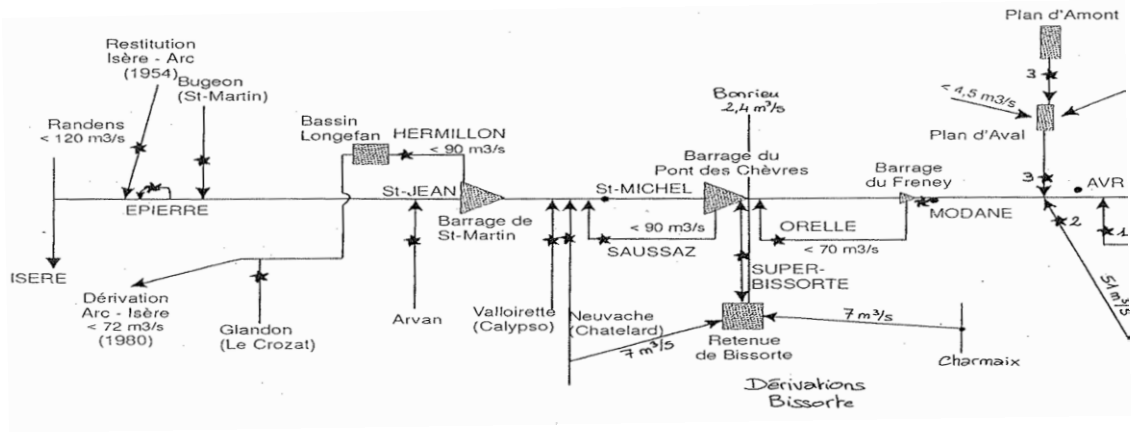

N
La Lenia
Bonneval
La Recula
Le Vallonnel
L'Averole
Le Ribon
Bessans
Pt Vert
Lanslebourg
320 Km2
Termignon
Le Doron de Termignon
Lac du Mt Cenis
Mt Cenis
Gran Scala
Dent d'Ambin
L'Ambin
Bramans
Pt Amont
Pt Aval
Si Benoît
Le Poyaret
St Anne
Modane
St Bernard
Si Bernard
Bissorte
Mt Thabor
La Nouvachette
La Vallolrette
Si Michel
Valmeinier
Hermillon
St Julien
Le Bouteyu
St Jean
Le Marderel
L'ARC
Le Cheval Noir
Le Bugeon
Pt St Remy
Aiguebelle
1890 Km2
Epierre
1190 Km2
St Alban des Hurtières
La Chambrousse
Le Tepey
Le Siandon
Arvan
Rieulrold
Arg. D'Arves
L'Isère
Figure 1
Le bassin versant de l'Arc
bassin versant étudié (étude de Gradex)
Pluviomètre
Station débit Barrage
Station débit Usine
Température de l'air
Télénivomètre
0
10 Km


PROFIL EN LONG DE L'ARC
Altitude (m)
Surface de bassin versant (Km2)
PK de l'ARC
Section PONT d'AITON — Ste MARIE de CUINES
Section Ste MARIE de CUINES — LE FRENEY
PROFIL EN LONG DE L'ARC
SURFACE B.V. CUMULE
CHAMOUSSET
Pont d'Aiton
AIGUEBELLE/RANDENS
Barrage d'ARGENTINE
EPIERRE
LA CHAPELLE
SAINT REMY
LA CHAMBRE
Verrou de la MADELEINE
Barrage d'HERMILLON
Torrent d'Hermillon
Arvan (220 km2)
Rieubel
Torrents de Saint Julien et du Bochet
Claret
Rieu Sec
Torrent Saint Bernard
SAINT MARTIN DE LA PORTE (Barrage)
PAS DU ROC
SAINT MICHEL
LA SAUSSAZ
LA DENISE
PREMONT
FRANCOZ
Pont des CHEVRES (Barrage)
LA PRAZ
Seuil de ST ANDRE
Barrage du FRENEY
LE FRENEY
DERIVATION maxi. 70 m3/s
DERIVATION maxi. 90m3/s
DERIVATION maxi. 90 m3/s
DERIVATION GLANDON maxi. 8,5 m3/s
DERIVATION maxi. 72 m3/s
ARC/ISERE
(LACHURES LONGEFAN)
(51 km2) Neuvache
Le Pousset
Bon Rieu
Blessorte + Rieu Bénit
(149km2) Valloirette
Glandon (111km2)
Bugeon (67,5km2)
Ruisseau des Blachères
Plan du Tour
Nant Bruant
Ruisseau de la Roche
RESTITUTION ISERE / ARC maxi. 120 m3/s
Pente
0,25%
0,33%
0,75%
0,5%
0,91%
1,88%
0,97%
2,5%
4,2
1,1
2,65%
2,64%
1%
0 100
930 m3/s
900 m3/s
860 m3/s
800 m3/s
PK 0 CONFLUENT AVEC L'ISERE
LEGENDE
Torrents principaux à risques
Station hydrologique existante
Ancienne station
Dérivation EDF

2.2 AMENAGEMENTS HYDROELECTRIQUES DE L'ARC MOYEN

Le régime hydrologique de l'Arc est fortement influencé par les aménagements hydroélectriques d'EDF. Le schéma ci-dessous présente le fonctionnement des principaux ouvrages hydroélectriques de la vallée.

Synoptique du fonctionnement des aménagements hydroélectriques de l'Arc moyen



Dans la zone d'étude, les débits de l'Arc sont dérivés au barrage de Saint-Martin-la-Porte vers l'aménagement de la chute de l'Echaillon (débit d'équipement de 90 m³/s) mis en service en 1973, et sont amenés gravitairement vers l'Isère pour un débit maximal de 72 m³/s.

Les débits sont influencés en particulier par les aménagements ci-après :

- Retenue et chute du Mont Cenis en 1968
- Aménagement de la Saussaz II en 1973
- Super Bissorte vers 1986-87

En aval du barrage, pour le régime ordinaire de l'Arc, le débit correspond au débit réservé du barrage de Saint Martin la Porte (700 l/s), auquel viennent s'ajouter les apports des torrents latéraux (principalement le Saint Bernard, le Claret, le Saint Julien, le Bochet et le Rieubel).

L'entretien des ouvrages EDF comporte :

- les vidanges décennales des retenues de Plan d'Aval et de Bissorte,
- les chasses d'eau annuelles de dégravement des retenues de l'Arc moyen. Elles consistent à ouvrir totalement et par palier les vannes des barrages afin de créer un régime torrentiel dans les retenues permettant l'entrainement des matériaux vers l'aval et le curage hydraulique des ouvrages. Elles présentent en général un débit de l'ordre de 100 à 150 m^3/s et durent quelques heures (de 9h à 15h, soit environ 6 h)
- des curages d'entretien dans les retenues.

2.3 REGIME HYDROLOGIQUE ORDINAIRE DE L'ARC

Le régime hydrologique de l'Arc dans la zone d'étude peut être défini à la station de la Saussaz située en amont de Saint Michel de Maurienne.

Cette station contrôle un bassin versant de 939 km². Le graphe de la page 11, précise la répartition des débits moyens mensuels en situation avant et après aménagement de l'Arc moyen (réalisation des chutes de la Saussaz II et de super Bissorte)

Le régime de l'Arc est de type nival de montagne caractérisé par un maximum annuel de débit en été (juin – juillet), dû à la fonte des neiges et un minimum en hiver (rétention nivale) Des oscillations journalières de débits ont lieu de façon plus ou moins atténuée, liées à la fusion nivale (minimum lors du froid nocturne).

Pour le régime ordinaire de l'Arc, l'influence des dérivations EDF, dont le débit d'équipement de 90 m^3/s est supérieur à celui de la rivière, est très nette.

Nous avons procédé à une analyse statistique actualisée sur la série 1948 – 2008 des débits journaliers. Les résultats sont présentés dans les paragraphes ci-après et sur les figures pages suivantes.

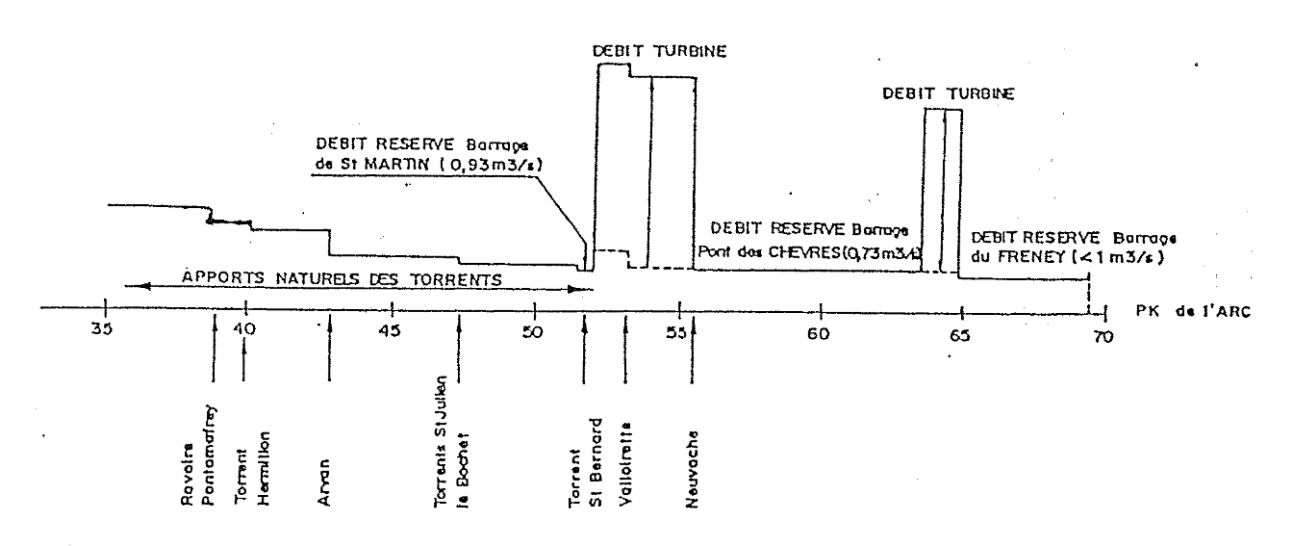
On peut distinguer trois tronçons entre le Freney et Sainte Marie de Cuines :

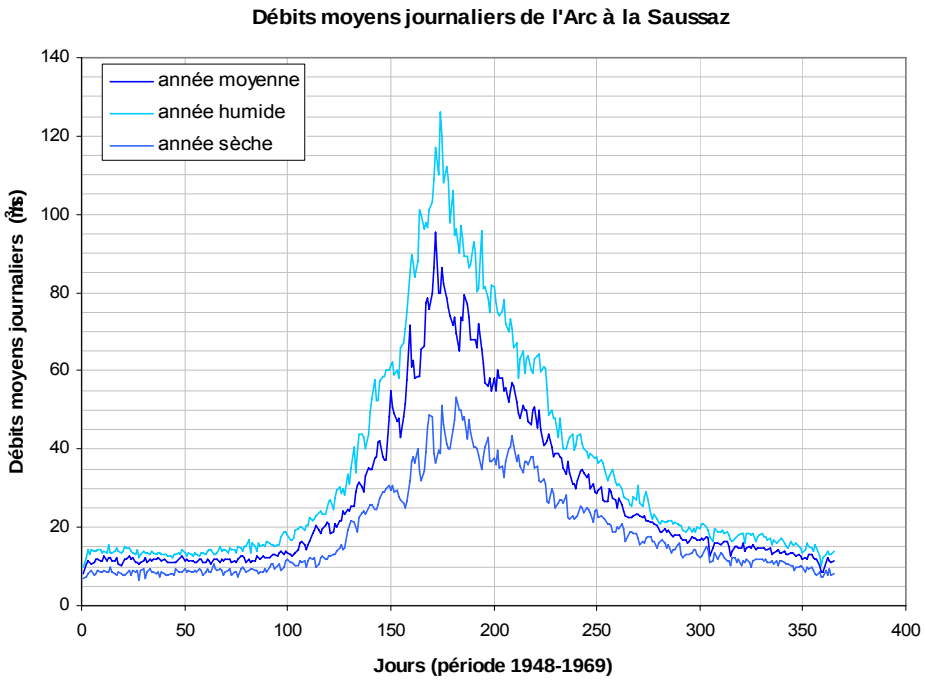
- **Entre le barrage du Freney et la Saussaz** : le débit de l'Arc correspond globalement au débit réservé en aval des barrages du Freney et du pont des Chèvres (0.6 à 1m^3/s).
- **Entre Saint Michel de Maurienne et Saint Martin la Porte** (Pas du roc), la rivière transite tout le débit de l'Arc. On distingue néanmoins deux périodes :

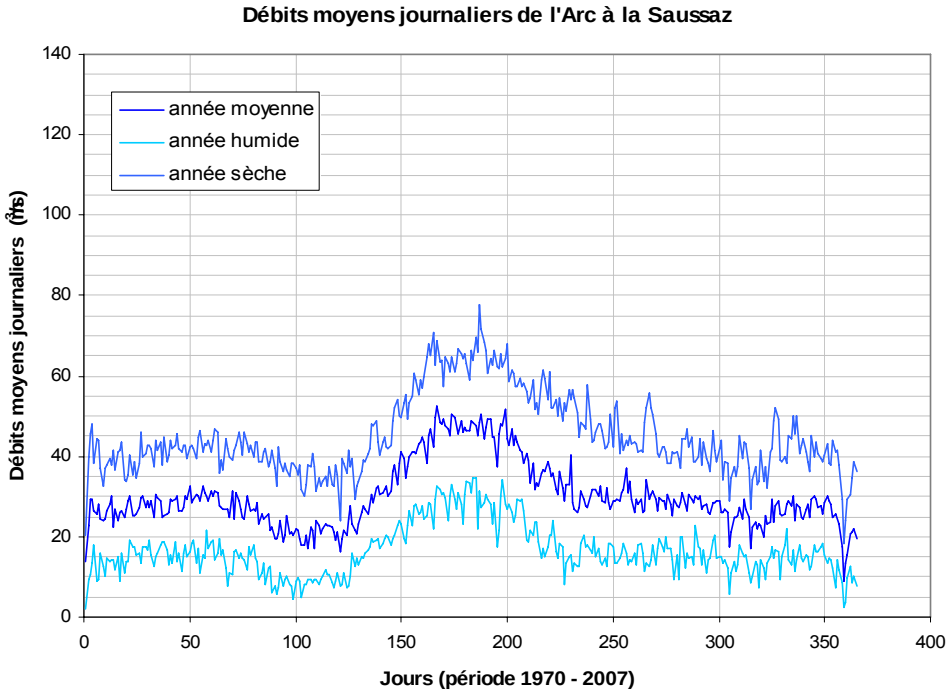
- La période avant l'aménagement (jusqu'en 1969 environ). Les débits correspondent au régime naturel du cours d'eau, avec des basses eaux régulières en hiver, autour de 10 à 15 m3/s et une irrégularité importante des débits en été liée au phénomène de fonte diurne.
- La période après aménagement hydroélectrique(1970-2008). Les débits sont soumis au rythme des usines hydroélectriques avec des variations liées aux turbinages selon les différentes heures de la journée, entre jours de semaine et week-ends et entre jours fériés et jours ouvrables. Par ailleurs les retenues d'altitude (Plan d'Amont, Plan d'Aval, l'Ecot, et surtout le Mont Cenis) et la chute de la Saussaz II (à partir de 1974) entrainent des modifications importantes des débits moyens journaliers, avec une hausse sensible des débits en hiver (restitution des volumes stockés dans les retenues) et une baisse des débits estivaux (stockage dans les retenues). Ces différentes modifications du régime hydrologique à la station de la Saussaz qui représente les écoulements arrivant dans la retenue de Saint Martin la Porte (excepté ceux de la Valloirette), sont illustrées sur les figures, pages suivantes.

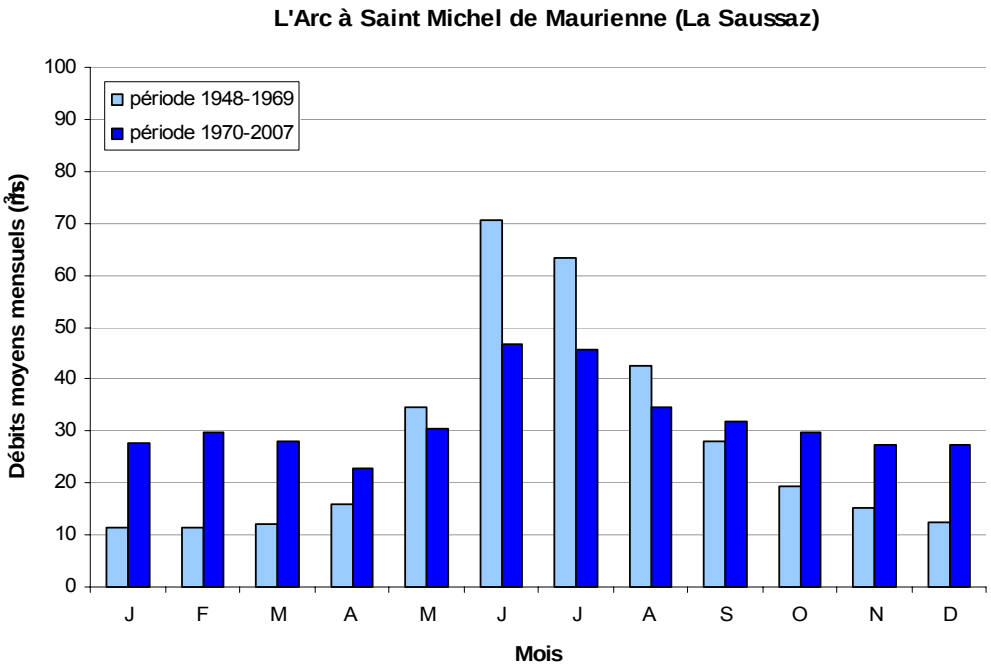
- **En aval du barrage de Saint Martin la Porte**, le tronçon est alimenté par le débit réservé au barrage de Saint Martin (0.7 m^3/s), renforcé par les apports des torrents et notamment de l'Arvan.

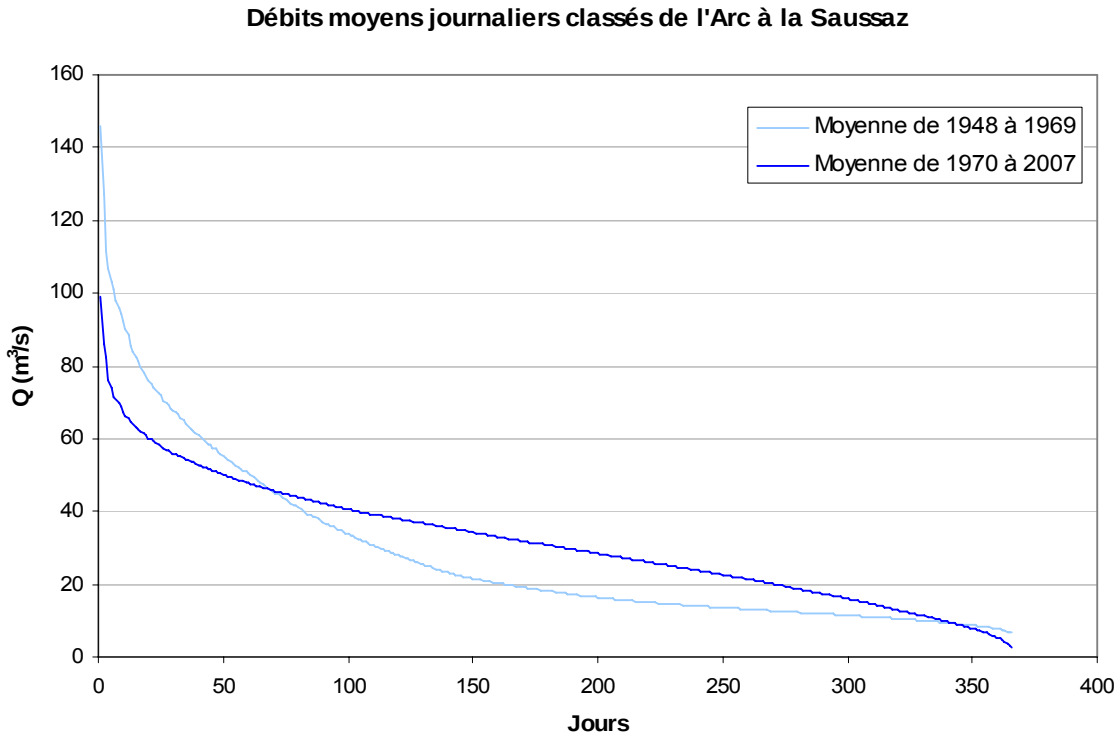
Schéma de principe de l'évolution des débits en aval des retenues EDF



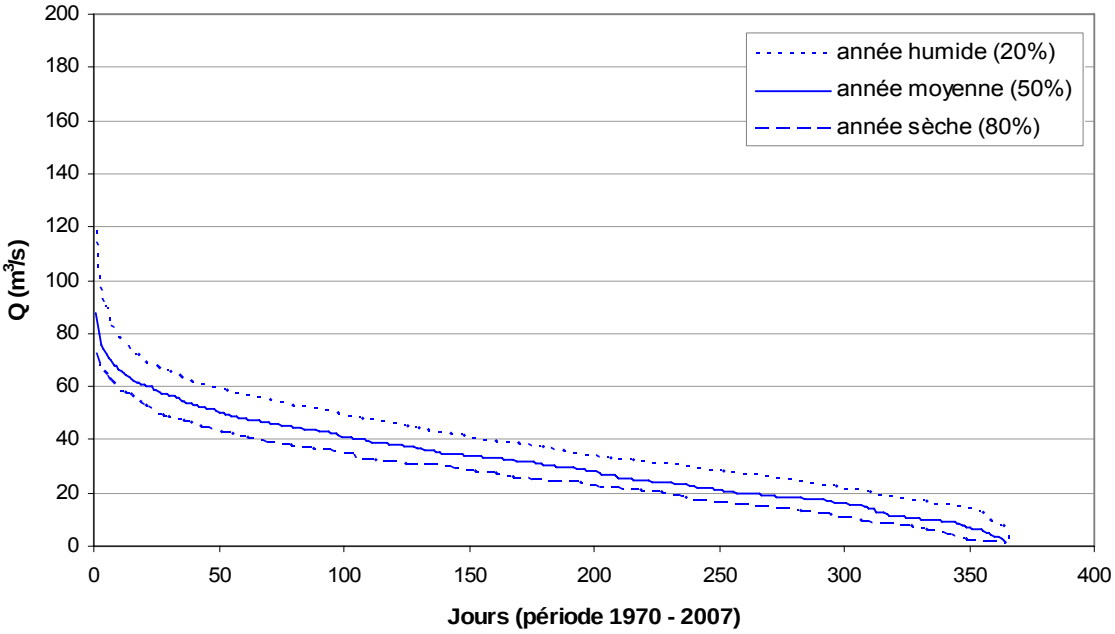

Débits moyens journaliers de l'Arc à la Saussaz
année moyenne
année humide
année sèche
Débits moyens journaliers (m³/s)
Jours (période 1948-1969)
0
20
40
60
80
100
120
140
0
50
100
150
200
250
300
350
400


Débits moyens journaliers de l'Arc à la Saussaz
année moyenne
année humide
année sèche
Débits moyens journaliers (m³/s)
Jours (période 1970 - 2007)
0
20
40
60
80
100
120
140
0
50
100
150
200
250
300
350
400

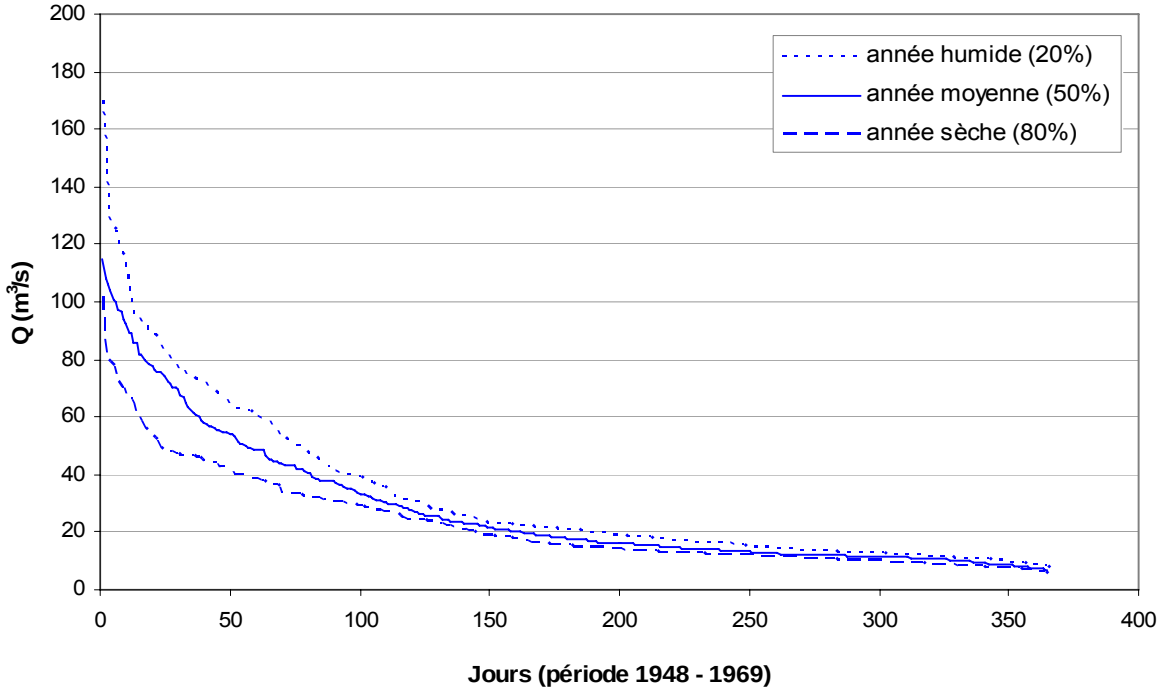

L'Arc à Saint Michel de Maurienne (La Saussaz)
période 1948-1969
période 1970-2007
Débits moyens mensuels (m³/s)
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
J
F
M
A
M
J
J
A
S
O
N
D
Mois


Débits moyens journaliers classés de l'Arc à la Saussaz
Moyenne de 1948 à 1969
Moyenne de 1970 à 2007
Q (m³/s)
160
140
120
100
80
60
40
20
0
0
50
100
150
200
250
300
350
400
Jours

Débits moyens journaliers classés de l'Arc à la Saussaz



Débits moyens journaliers classés de l'Arc à la Saussaz



2.4 CRUES DE L'ARC

2.4.1 Régime de crue

Les crues de l'Arc sont générées par deux types d'évènements pluviométriques dominants :

- les perturbations océaniques venues de l'Ouest, qui engendrent des crues à moyennes (les plus fréquentes),
- un régime de Sud avec retour d'Est (déviation du flux par les massifs alpins frontaliers avec l'Italie), dit phénomène de Lombarde qui se caractérise par des épisodes rares et très violents sur le haut bassin et engendre les crues les plus fortes (juin 1957, septembre 1993, juin 1994, octobre 2000, mai 2008)

Il faut souligner que les aménagements hydroélectriques ne jouent pas de rôle significatif sur les fortes crues de l'Arc, même si EDF peut continuer de turbiner une partie du débit durant la crue (cf. graphe ci-après).

Les risques de crues sont les plus importants en juin-juillet et en septembre-octobre, et sont quasiment nuls en hiver (décembre à avril).

2.4.2 Crues historiques

Les crues faisant référence dans la vallée et correctement renseignées sont estimées à la Saussaz comme suit :

- Crue de juin 1957 : supérieur à 600 m³/s
- Crue de septembre 1993 : 450 à 500 m³/s
- Crue de juin 1994 : 400 m³/s
- Crue de septembre 1994 : 350 m³/s
- Crue de juin 1998 : 200 m³/s
- Crue d'octobre 2000 : 450 m³/s
- Crue de mai 2008 : 450 m^3/s

A noter qu'une crue de l'Arc en 1920 a été estimée à l'époque à plus de 800 m³/s, mais elle reste très mal connue.

La crue de 1957, a par contre fait l'objet de nombreuses études qui ont permis d'estimer son débit de pointe. Elle est considérée comme centennale à Lanslebourg et trentennale à Saint Jean de Maurienne et en aval (effet d'amortissement).

La crue de septembre 1993, d'un débit de pointe estimé à 500 m^3/s à la Saussaz, a eu lieu sur un lit très engravé et boisé, conséquences d'une longue période sans crue forte de l'Arc (depuis 1957). Elle a causé des dégâts importants dans l'ensemble de la vallée.

La crue des 14 et 15 octobre 2000 a été caractérisée par un débit de pointe de 450 m^3/s environ à la Saussaz, plus faible que le débit de pointe de la crue de 1957.Cependant, elle présente la particularité d'avoir été très longue, le débit de 200 m^3/s, à partir duquel des évolutions morphologiques sensibles se produisent, ayant été dépassé pendant plus de 24 h. Le volume de crue écoulé au-dessus du seuil de 200 m^3/s a été de l'ordre de 13 hm^3, contre 8 hm^3 environ en 1957 (information à prendre avec la plus grande prudence et établie sur la base de l'hydrogramme de crue reconstituée par EDF au pont de la Madeleine).

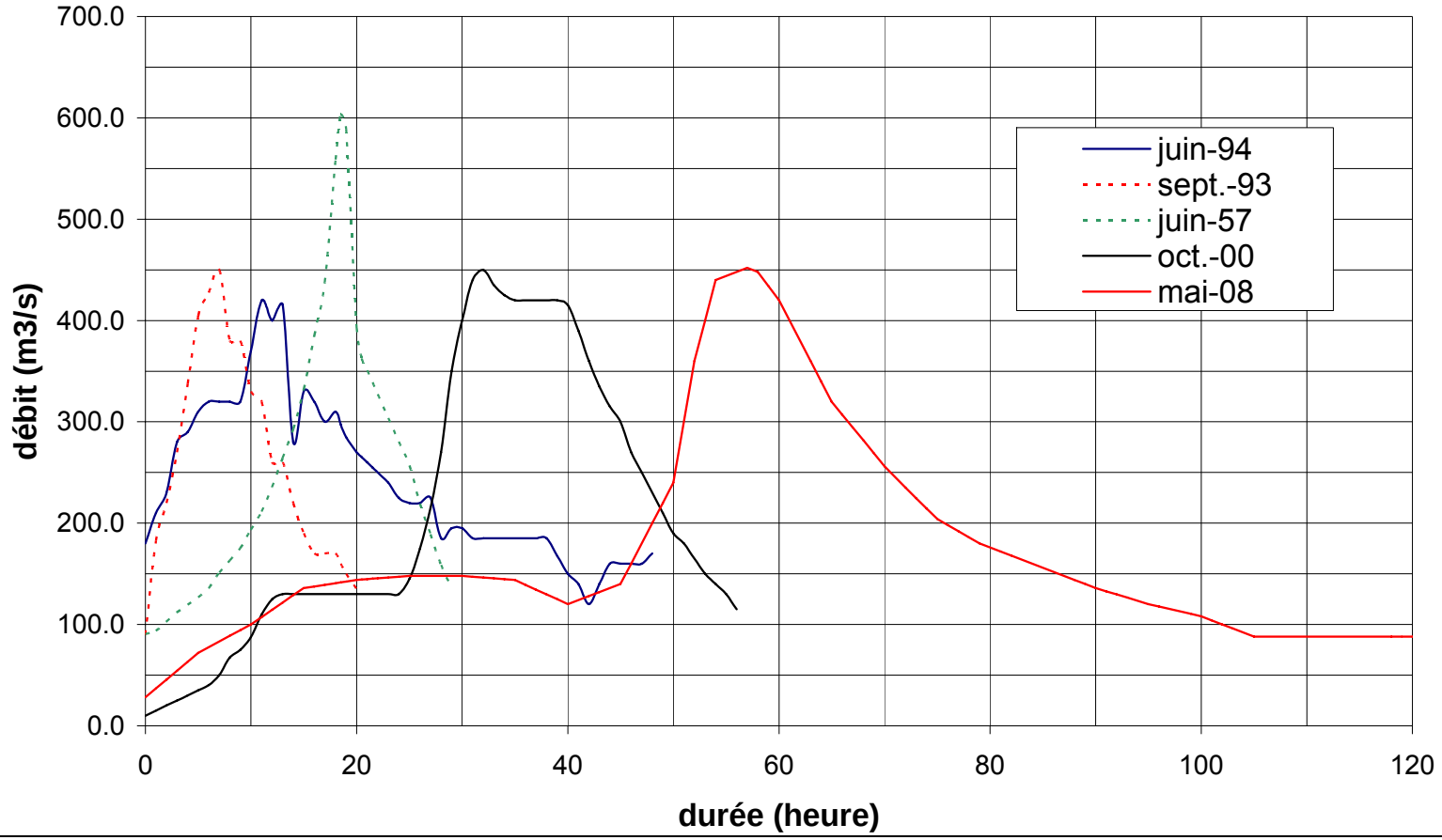
Les caractéristiques de la crue de mai 2008 données dans le présent rapport sont issues du mémoire de crue établi par la société CIDEE. Les informations correspondantes n'ont été validées ni par les services de l'Etat ni par EDF. Elles sont donc à considérer avec une certaine réserve. D'après ces premières informations, le débit de pointe et le volume de la crue sont similaires à ceux de l'évènement d'octobre 2000 (450 m3/s et 13 hm^3). La crue a cependant été plus longue pour les débits intermédiaires situés entre 100 et 200 m^3/s. Durant la crue, EDF a ouvert totalement les vannes du barrage de Saint Martin la Porte ce qui a permis un curage de la retenue. De ce fait, il n'a pas été nécessaire de réaliser la chasse de dégravement en 2008 (chasse prévue en général en juin).

Les hydrogrammes ainsi que les caractéristiques durée-débit-volumes des crues reconstituées à la Saussaz sont indiqués sur les figures de la page suivante.

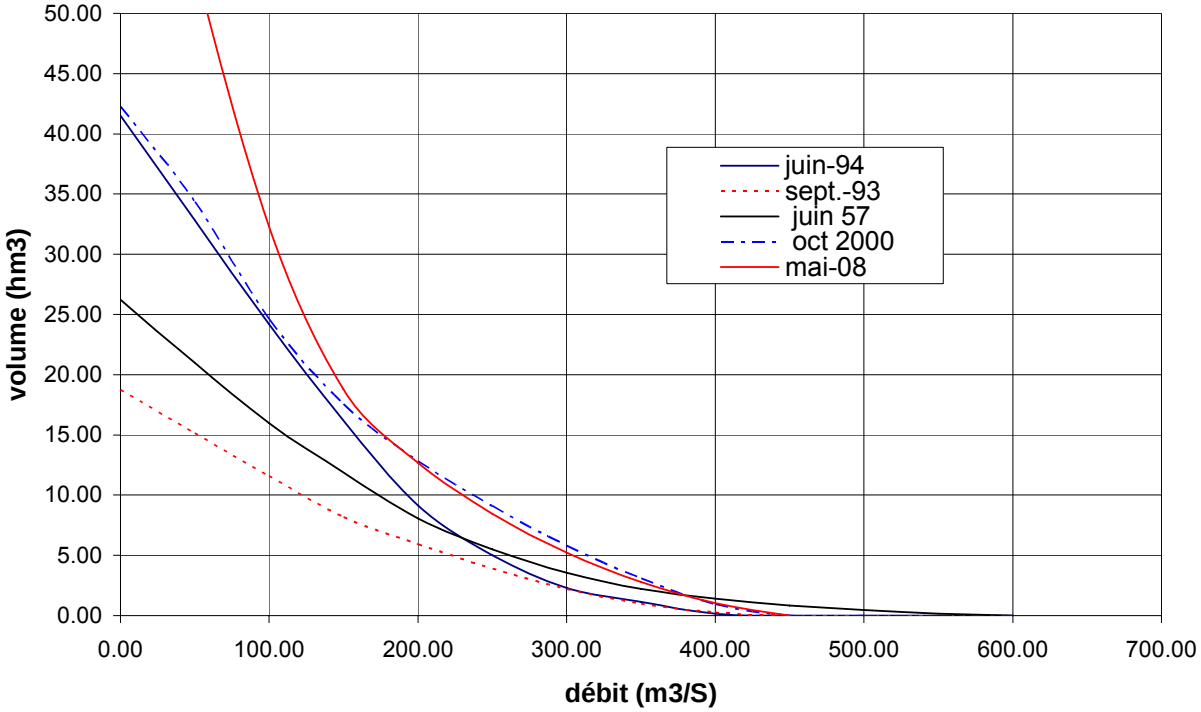
Estimations des volumes écoulés (hm3) en fonction des débits seuils dépassés (m^3/s)

débit	juin-94	sept.-93	juin 57	oct 2000	mai-08
0.0	41.5	18.8	26.2	42.3	79.0
50.0	32.9	15.2	21.0	34.4	54.0
100.0	24.2	11.6	16.0	24.6	32.3
150.0	16.2	8.2	11.9	17.5	18.8
200.0	9.1	5.9	8.1	12.8	12.7
250.0	5.0	3.9	5.5	9.1	8.5
300.0	2.3	2.2	3.5	5.8	5.2
350.0	1.2	1.0	2.2	3.1	2.8
400.0	0.2	0.3	1.4	0.9	1.0

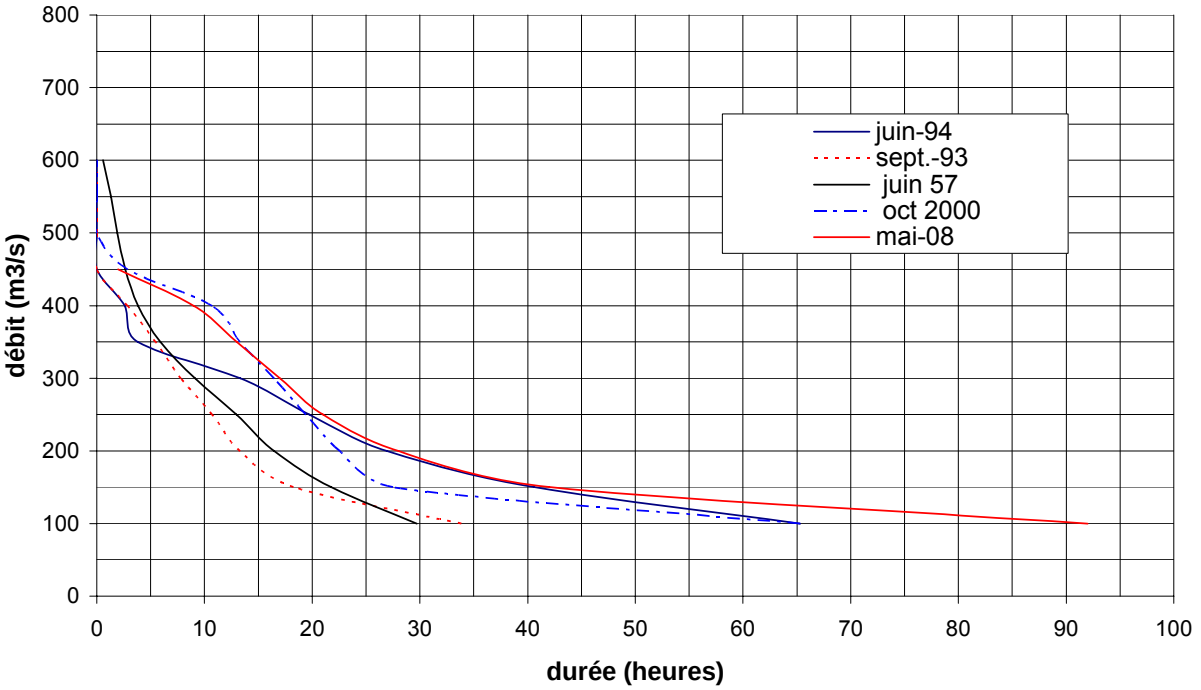
Hydrogrammes des crues historiques reconstitués à l'entrée du barrage de Saint Martin la Porte



Crues en entrée de la retenue de Saint Martin la Porte Courbe V(hm3) =f(débit) (m3/s)



Crues en entrée de retenue de Saint Martin la Porte- courbes durée (heures) =f(débit) (m3/s)



2.4.3 Analyse statistique des crues

2.4.3.1 Résultats des études antérieures

Lors de l'analyse hydrologique de l'Arc réalisée en 1992 dans le cadre de la conception de l'autoroute A43, une analyse fréquentielle des crues annuelles avait été réalisée par ajustements de Gümbel sur les données de débits journaliers maximaux annuels aux stations de la Saussaz et de Hermillon. Les valeurs obtenues pour les débits de crue instantanés étaient les suivantes (m^3/s) :

Station	Q_2	Q_5	Q_{10}
La Saussaz	170	270	340
Hermillon	270	360	470

L'extrapolation des débits de pointe de fréquence centennale avait alors été estimée à partir des résultats d'une synthèse hydrologique locale (Sogreah – Etude générale Arc/Isère/Doron 1989), qui mettait en évidence un alignement des valeurs de Q_{10} et Q_{100} en fonction de la surface du bassin versant selon une loi de type Meyer ($S^{0.6}$, S étant la superficie du bassin versant).

Les résultats établis à partir de cette synthèse sont donnés ci-après.

Secteur	Surface drainée	Crue décennale	Crue centennale
	km²	m³/s	m³/s
Amont de la confluence avec la Valloirette	<1018	350	800
Entre les confluences de la Valloirette et de l'Arvan	de 1018 à 1247	450	860
Entre les confluences de l'Arvan et du Glandon		470	900

Notons que le CEMAGREF avait estimé les débits de crue en 1998 à partir d'une analyse QDF (débit-durée-fréquence). Les débits de pointe obtenus étaient les suivants.

	Surface drainée	Crue décennale	Crue centennale
	km²	m³/s	m³/s
Modane	750	240	531
La Saussaz	939	300	664

2.4.3.2 Analyse actualisée des débits journaliers sur la série de données 1970-2007

Hydratec a procédé dans le cadre de la présente étude, à une actualisation des débits de crue rentrant dans la retenue de Saint Martin la Porte à partir des données de débits moyen journaliers reconstitués par EDF à la station de la Saussaz. Ces débits correspondent à la somme des débits déversés au barrage du Pont des Chèvres et des débits turbinés à la centrale de La Saussaz II.

L'étude n'a pas procédé à la reconstitution des séries naturelles, qui demande de connaître les débits turbinés par EDF et non communicables.

Les valeurs maximales annuelles des débits moyens journaliers ont par contre fait l'objet d'une analyse différentiée en distinguant les deux séries 1948-1969 et 1970-2007 correspondant respectivement aux périodes avant et après mise en service des nouvelles usines d'Orelle (1970) et de la Saussaz II (1973)

Les débits journaliers ont été ajustés à une loi de Gumbel jusqu'à une période de retour de 10 ans. Les résultats sont donnés dans le tableau ci-après.

Station	période	Q_2 (m^3/s)	Q_5 (m^3/s)	Q_{10} (m^3/s)
La Saussaz	1948-1969	123	163	190
	1970-2007	92	137	167

Les valeurs du tableau mettent en évidence les principaux résultats suivants :

- Les aménagements EDF tendent à réduire les débits de crue reconstitués à la Saussaz. Cela est à mettre en relation avec la présence des plans d'eau en altitude qui peuvent jouer partiellement un rôle de stockage en période de crue.
- Cet effet, sensible pour les petites crues (-30% pour la crue biennale), se réduit pour les crues plus fortes (-15% pour la crue décennale et -10% pour la crue vingtennale).

2.4.3.3 Détermination du débit de crue centennale

Nous avons procédé à l'extrapolation des débits pour les périodes de retour supérieures à 10-20 ans par la méthode du Gradex des pluies.

Cette méthode fait l'hypothèse que la rétention du bassin atteint une valeur limite pour les pluies extrêmes et que la fonction de répartition des crues pour les périodes de retour élevées a donc même comportement asymptotique que celle des pluies. La pente des lames d'eau écoulées en 24 h sur un graphique de Gümbel correspond ainsi à celle des pluies sur la même durée. La pente correspondante est appelée le gradex.

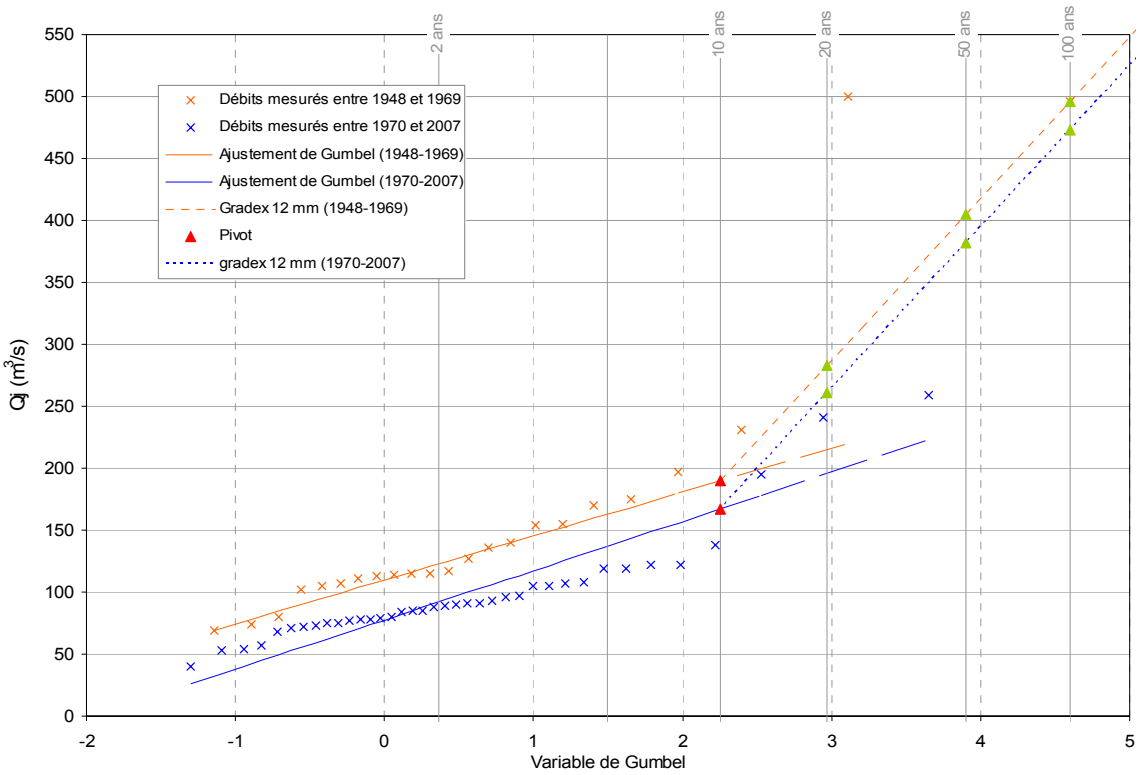
Le gradex des pluies journalières a été calculé à partir des séries pluviométriques des postes de Valloire, Saint Jean de Maurienne et de Saint Martin la Porte. Les précipitations journalières (mm) et le gradex correspondant sont donnés dans le tableau ci-après.

Pluies journalières maximales annuelles et gradex des pluies sur 24 heures

T (ans)	Valloire	Saint Jean de Maurienne	Saint Martin de la porte
période	1974-2002	1984-2002	1951-2002
altitude	1460 m	550 m	790 m
2	40.8	44.6	38.7
5	51.6	60.2	51.4
10	58.7	70.5	59.9
20	65.6	80.3	67.9
50	74.4	93.1	78.4
100	81.1	102.7	86.2
gradex annuel	**9.5**	**13.7**	**11.2**

On retiendra un gradex proche de 12 mm / 24 h

Le graphique ci-après illustre l'extrapolation du débit journalier de crue à la station de la Saussaz, par le gradex de pluies calculé sur 24h.



On obtient les valeurs suivantes pour le débit de crue centennale sur 24 heures.

Station (période)		**Q_{100} 24 h** (m^3/s)
La Saussaz (1)	1948-1969	496
	1970-2007	473

2.4.3.4 Estimation du débit de pointe et reconstitution des hydrogrammes de crue au barrage de Saint Martin la Porte

Le coefficient de pointe des crues de l'Arc (rapport entre le débit de pointe et le débit moyen calculé sur 24 h) couramment cité dans la littérature est de 1.7. Nous donnons ci-après les coefficients de pointe calculés pour 5 crues significatives reconstituées à l'entrée du barrage de Saint Martin la Porte (station de la Saussaz).

Crue reconstituées à la station de la Saussaz

Crue	**Débit de pointe (m^3/s)**	**Débit moyen sur 24 h (m^3/s)**	**K = Qp/Qm**
Juin 1957 (1)	604	280	2.15
Septembre 1993	450	237	1.9
Juin 1994	420	303	1.37
Octobre 2000	450	319	1.41
Mai 2008	452	334	1.35

(1) hydrogramme de crue reconstitué à Saint Martin la Porte à partir de l'information disponible au pont de la Madeleine et en appliquant la formule de Meyer (grande incertitude sur le débit de pointe)

Le coefficient de pointe moyen sur ces 4 crues est égal à 1.64. Les valeurs distinguent néanmoins :

- **La crue de juin 1957 et la crue de septembre 1993** très pointues. Le phénomène de Lombarde a été particulièrement violent pour ces deux crues, générant un cumul pluviométrique enregistré au Mont Cenis sur trois jours de 195 mm et 139.5 mm respectivement pour les crues de 1957 et de 1993. On note par ailleurs que lors de l'évènement de 1993, la pluie est tombée à haute altitude jusqu'à 3000 m. Pour la crue de 1957, les pluies ont pu être localement très violentes comme l'illustre le cumul pluviométrique à Bonneval (330 mm en 4 jours dont 159 mm en une seule journée).
- **La crue de juin 1994**. Elle a été générée par des pluies moins importantes (127 mm au Mont Cenis pour la 3ème décade de juin) s'accompagnant d'un fort redoux générant une fonte de neige très active.
- **La crue d'octobre 2000**. Elle a été provoquée par de très fortes précipitations en haute Maurienne (245.6 mm en trois jours au Mont Cenis). Les volumes très importants de cette crue s'expliquent par la durée de l'événement pluvieux, son extension

géographique sur l'ensemble de la Haute Maurienne et une limite pluie neige se situant à plus de 3000 m d'altitude.

- **La crue de mai 2008**. Les cumuls de précipitation pour cette crue sont proches d'octobre 2000 (229.8 mm en trois jours au Mont Cenis). La douceur observée en mai bien supérieure à ce qui est observé normalement conjuguée à un printemps frais et neigeux expliquent l'importance des volumes observés. Ils correspondent aux plus fortes valeurs de ces cinq crues si l'on considère les volumes écoulés au dessus du débit de 100 m^3/s.

En considérant un coefficient de pointe de 1.6 les débits maximum de crue reconstitués à la Saussaz et à Saint Martin la Porte sont indiqués dans le tableau ci-après.

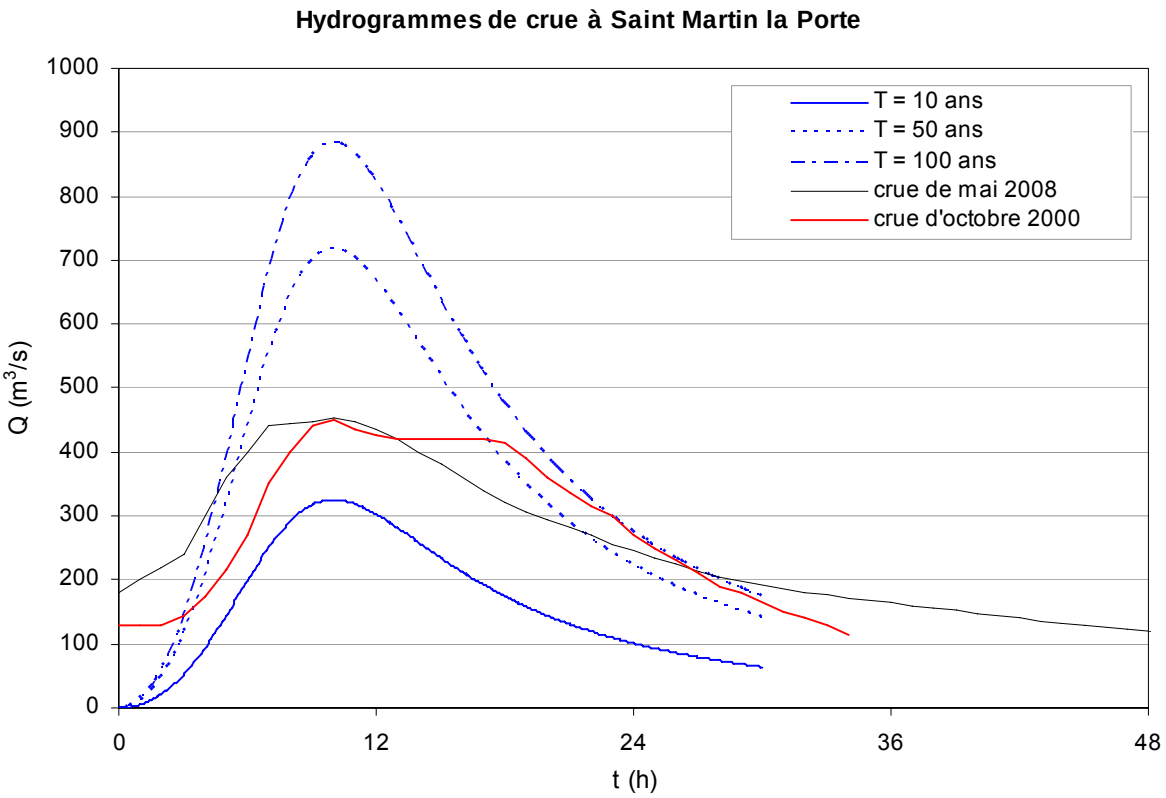
		Q pointe- (m^3/s) (2)		
Station	**Superficie du bassin (km^2)**	**10 ans**	**50 ans**	**100 ans**
La Saussaz	939	267 - 304	611 - 648	757 - 794
Saint Martin La Porte (1)	1167	304 - 346	696 - 738	862 - 904

(1) débit extrapolé à partir des valeurs à la Saussaz en utilisant la formule de Meyer avec α = 0.6

(2) valeurs correspondant aux séries naturelles et influencées par les aménagements EDF

Ces valeurs sont assorties d'une incertitude d'au moins ±15% liée en particulier à l'imprécision sur la valeur du coefficient de pointe de la crue.

Les hydrogrammes de crue des périodes de retour 10, 50 et 100 ans construits en respectant les caractéristiques débit-volume, sont présentés sur la figure ci-après.


Hydrogrammes de crue à Saint Martin la Porte
1000
900
800
700
600
500
400
300
200
100
0
Q (m3/s)
0
12
24
36
48
t (h)
T = 10 ans
T = 50 ans
T = 100 ans
crue de mai 2008
crue d'octobre 2000

2.5 APPORTS SOLIDES LATERAUX

2.5.1 Bassins versants

Les principaux affluents de l'Arc sur le secteur d'étude sont précisés dans le tableau ci-après.

Caractéristiques des bassins versants affluents

Torrent	PK Arc	Rive	Surface BV	Longueur	Altitude maximum	Altitude minimum	Pente
	km		km^2	km	m NGF	m NGF	%
Saint-Bernard	51.44	RD	18.13	8.28	2731.00	667.00	24.9%
Moulins	50.93	RG	7.35	5.50	2518.00	656.00	33.9%
Rieu Sec	50.30	RD	0.87	2.46	2086.00	646.00	58.5%
Le Claret	48.87	RD	2.74	4.13	2510.00	621.70	45.7%
Saint Julien	47.45	RD	19.77	10.50	2766.00	598.00	20.6%
Bochet	47.45	RG	2.72	3.86	2433.00	598.00	47.5%
Rieubel	45.65	RG	2.59	4.04	1986.00	570.00	35.0%

Ces torrents se distinguent par des écoulements violents et brutaux, très chargés en matériaux solides. Pour les événements ordinaires, les crues se caractérisent par des écoulements concentrés à fort charriage. Dans certains cas, moins fréquents, le mélange d'eau et de sédiments constitue un fluide monophasique visqueux (*lave torrentielle)*. Ce type d'écoulement est le plus impactant sur la morphologie de l'Arc compte tenu des volumes mis en jeu et des très gros blocs transportés par les laves.

Les principales informations apportées ci-après proviennent en grande partie du Service RTM de Savoie et de l'ouvrage de Paul Mougin sur les torrents de Savoie.

2.5.1.1 Le Saint Bernard

Le bassin versant du Saint Bernard a la forme d'un triangle dont le sommet vient s'appuyer sur un affleurement rocheux entaillé par deux goulets appelés « de Benoît » et « du Bonrieu ». Le torrent du Saint Bernard se caractérise par une forte activité torrentielle produisant des laves dévastatrices qui se sont maintes fois renouvelées au cours du temps. On recense environ 40 crues ou laves torrentielles d'importance majeure sur les cinq siècles et demi passés. Cette forte production de matériaux trouve son origine dans la géologie du secteur qui se caractérise par la présence de falaises de gypse, cargneules et calcaire fortement altérées. Le glissement dit du « Bonrieu, » à l'Est du Benoit et convergeant vers la combe éponyme constitue par ailleurs avec les nombreux arrachements de berge un gisement important de matériaux. Les couloirs d'avalanches contribuent également à favoriser les apports.

Face aux différentes catastrophes consécutives à l'activité du torrent, l'Etat a entrepris à partir du début du 19ème siècle des aménagements de correction torrentielle. Ces aménagements comprennent :

- Des premières digues réalisées sur le cône de déjection.
- La construction du tunnel ferroviaire.
- L'acquisition dans le cadre de la loi de 1882 sur la Restauration des Terrains de Montagne, de 160 ha de terrains dans le bassin de réception.
- La construction de barrages et seuils pour fixer le lit (travaux ayant commencé en 1880 par la réalisation de 261 barrages et d'un perré de 176 m).
- La construction en 1939 d'un grand barrage édifié dans la combe du Benoit (barrage « Fèvre » de 34 m de hauteur).
- La mise en place entre 1889 et 1907 d'un réseau de drainage dans la zone de glissement du Bonrieu.
- Le reboisement des terrains (environ 6.5 ha) sur les rives du Saint Martin, du Benoît et de la combe de Bonrieu.
- La réalisation d'un canal d'écoulement en 1893 sur le cône de déjection de 570 m de longueur et de 24 m² de section. Ce canal fut réparé et transformé en canal à biefs affouillables avec implantation de 27 seuils, par le service RTM en 1983.
- La réalisation de deux plages de dépôts en 1986 et 1995
- La construction des ponts canaux pour le franchissement de la RN6 et de l'A43.

2.5.1.2 Le Rieu Sec

Le Rieu Sec se caractérise par un bassin versant constitué en entonnoir subvertical. Il peut charrier des quantités monstrueuses de blocs importants provenant des éboulements de falaises et du remaniement des terrains affouillables. Ce bassin versant présente d'importantes surfaces érodables et n'a pas fait l'objet d'aménagements significatifs en matière de correction torrentielle. Les enjeux concernés par les écoulements de laves sont la RN6, et l'A43, et dans une moindre mesure la voie ferrée.

2.5.1.3 Le Claret

Le torrent du Claret est réputé pour sa violence, l'aspect impressionnant de son bassin de réception, ainsi que pour les dégâts importants qu'il a pu occasionner. Au cours du 20ème siècle, on recense environ 25 laves torrentielles. La plus marquante est sans doute celle du 2 juillet 1987, d'un volume solide d'environ 40 000 m3. Les dernières laves torrentielles importantes sont celle du 24 juillet 2000 et du 30 août 2007 avec respectivement un volume de dépôt dans la plage RTM de 10 000 et 12 000 m^3. La géologie du bassin de réception se

caractérise par la présence de gypse, cargneule, et blocs calcaires. Ces différentes unités présentent un degré d'altération avancé contribuant à fournir d'importantes quantités de matériaux dans les ravins à forte pente. Les chutes de blocs et éboulements sont fréquents. Les derniers en date sont ceux de février et mai 2003 dans le secteur de la Croix des Têtes de plusieurs milliers de m^3 chacun.

Les laves torrentielles du Claret ont provoqué de nombreux et fréquents dégâts sur les voies de communication et les terres agricoles. Les travaux de correction torrentielle visant à réduire l'importance de ces dégâts ont démarré au début du 19ème siècle.

Les principaux travaux réalisés sont :

- Premiers endiguements du lit en 1825.
- Acquisition par l'Etat de 200 ha des terrains (les ¾ du bassin de réception) en 1894.
- Reboisement des rives du torrent sur une superficie de 66 ha entre 1894 et 1928.
- Réalisation de 272 seuils et barrages rustiques entre 1897 et 1902 sur les différents ravins du bassin de réception (Claret, Bonnant, rvin du Milieu, Combe Mouillée,…).
- Réalisation d'un grand barrage de 13 m de hauteur en 1956 en tête du cône de déjection. Pendant longtemps il a permis de stopper les matériaux du torrent. Il contribue encore à arrêter les matériaux les plus grossiers du fait de la rupture de pente qu'il a provoqué en amont.
- Réalisation de barrages en enrochements bétonnés en aval du pont de la Serpollière afin de stabiliser le lit au droit du pont.
- Réalisation de contre barrages en 1995, au droit des barrages existants en amont du cône de déjection et en aval du pont de la Serpollière afin de réduire l'incision du lit.
- Réalisation de 2 nouveaux barrages en 2004 pour protéger les barrages existants en aval du pont de la Serpollière.
- Mise en place de 760 m de drains en rive droite du Claret afin de stabiliser les zones de glissement.
- Rectification du lit du torrent en 1972 pour les besoins de l'aménagement EDF.
- Plages de dépôt (volume utile 25 000 à 30 000 m^3).
- Pont canal réalisé en 1996 au dessus de l'autoroute A43.

2.5.1.4 Le torrent du Saint Julien

Il constitue l'un des torrents les plus redoutables de la vallée de la Maurienne par la violence et la soudaineté de ses crues. Il a été capable de repousser l'Arc de 170 m vers le sud en seulement un siècle et demi. La dernière grande crue du torrent date du 17 août 1987 avec trois laves successives en l'espace de 30 mn.

Le bassin versant du Saint Julien est le plus étendu de tous les torrents inscrits dans l'aire d'étude. Le torrent est alimenté en transport solide par la zone de glissement inscrite en rive droite dans les schistes, et par les matériaux d'éboulements du versant très abrupt de rive gauche. La grande taille du bassin de réception contribue, lors d'épisodes pluvieux intenses, à générer des débits liquides importants capables d'arracher et de mobiliser de grandes quantités de matériaux présents dans le lit et de les emporter vers l'aval.

Compte tenu de la forte exposition des habitations de Saint Julien et des cultures aux laves torrentielles, dès le 18ème siècle, des travaux de défense ont été réalisés, avec la mise en place de premières digues et des curages dans le lit.

Les principaux travaux réalisés ensuite au cours du 19ème puis du 20ème siècle sont :

- Acquisition par l'Etat en 1894 de 751 ha de terrains situés sur les rives du torrent.
- Mise en place de 12 km de drain permettant de capter les eaux infiltrées dans la zone de glissement de Montdenis en rive droite. Ces drains ont aujourd'hui partiellement disparu.
- Reboisement au début du 20ème siècle de 285 ha de terrain (13% du bassin versant).
- Dérivation du torrent dans une galerie souterraine au droit du glissement de Montdenis en 1896.
- Réalisation au début du 20ème siècle en aval du tunnel de dérivation, de 5 grands barrages de 8m de hauteur chacun et de 26 seuils pour stabiliser le lit et lutter contre l'incision.
- Réalisation d'un canal d'écoulement sur le cône de déjection en 1900.
- Réalisation pour la protection et le franchissement de l'autoroute A43, d'un pont canal dimensionné pour transiter sans débordement une crue trentennale et d'une plage de dépôt situé en amont du franchissement.

2.5.1.5 Le torrent du Bochet

Le bassin de réception se situe entièrement dans les schistes nummulitiques. Sa petite taille, limite les apports dans l'Arc. Néanmoins, le torrent peut produire des laves torrentielles du fait des glissements observés. Son cône de déjection témoigne de cette activité. Il est actuellement en phase de régression, sapé par les écoulements de l'Arc qui se trouvent repoussés par le torrent opposé du Saint Julien.

2.5.1.6 Le torrent du Rieubel

Le bassin de réception forme une combe ouverte au milieu des schistes marneux liasiques très affouillables.

Le torrent est susceptible de produire de violentes laves torrentielles comme en témoigne l'importance de son cône de déjection. Les chroniques de crue répertoriées par M.Mougin remontent au 15ème siècle.

Les principaux travaux de défense et de correction torrentielle visant à limiter l'importance des laves et protéger le hameau de Villargondran contre les crues sont :

- Avant le 19ème siècle :
  - simples travaux de curages du lit et de fascinage des berges.
- A partir du 19ème siècle :
  - acquisition de 160 ha de terrains sur les rives du torrent.
  - Réalisation de barrages et seuils pour lutter contre l'affouillement du lit.
  - Mise en place de drains.
  - Reboisement des terrains.
  - Rectification du lit sur son cône de déjection à partir de 1860. Le torrent a d'abord été canalisé dans la partie aval du cône de déjection lors de la construction de la voie ferrée France-Italie. Un canal à biefs affouillables prolongeant le canal RFF jusqu'à l'entrée des gorges a ensuite été réalisé par les services RTM entre 1962 et 1984. La largeur en crête des digues du canal (de l'ordre de 3.5 à 4.0 m) permet en cas de lave exceptionnelle de stocker localement ces dernières.
  - Aménagement après la crue de 1957, de la confluence Arc-Rieubel, afin de faciliter l'érosion du cône de déjection du torrent et d'éviter l'érosion de la rive droite, de l'ancienne RN6 et de la falaise de Villardclément comme ce fut le cas en juin 1957.

    L'aménagement comprend une digue crénelée submersible dont le but est de limiter l'emprise du cône en créant un chenal principal de l'Arc qui facilite son érosion par rétrécissement du lit. En cas d'apport très importants du Rieubel, ce chenal peut se combler. Le cône déborde alors en rive droite de l'Arc et emprunte un chenal secondaire limité par un perré bitumineux en pied de l'ancienne RN6. Ce chenal permet l'évacuation des matériaux fins du Rieubel, les pertuis de la digue crénelée autorisant une ouverture rapide du chenal principal.

2.5.2 Les plages de dépôts

Plusieurs plages de dépôts ont été aménagées à partir de 1987 afin de réduire les risques de débordements des torrents dans les secteurs habités et au droit des franchissements autoroutiers. Ces plages de dépôt ont pour objectif de stocker une partie du volume de laves torrentielles et de protéger les enjeux en aval.

2.5.2.1 Plages de dépôt du Saint Bernard

Deux plages de dépôts ont été réalisées, l'une à l'altitude 1000 m par les services RTM, d'un volume de 20 000 m^3 en 1987, l'autre à l'altitude 806 m d'un volume de 20 000 m^3 également en 1995 par la SFTRF.

La première plage de dépôt dispose d'une ouverture aval de type ouvrage fente munie initialement d'une grille filtrante, qui a ensuite été supprimée (grille détruite après le passage de la lave torrentielle de juillet 1993).

Le second ouvrage dispose également d'une ouverture aval de type fente sans grille.

Les deux plages fonctionnent en série, la première est destinée à arrêter le front de lave, la seconde permet de protéger les ouvrages SFTRF en aval contre tout risque de débordement dans le chenal et le pont canal situé en aval.

2.5.2.2 Plage du dépôt du Claret

L'ouvrage a été créé en 1991 à l'altitude 700 m au lieu dit « Clapotière ». Il se situe en amont du canal de dérivation EDF et sert à protéger les enjeux aval : canal EDF, RN6, Autoroute A43, voie ferrée, usine FERROPEM.

Elle a un volume utile de 25 000 à 30 000 m^3 et dispose de deux ouvertures de petites tailles (5x1m et 3x 1.5 m) qui ne laissent passer que de très faibles débits solides, les ouvertures se bouchant très facilement à chaque crue. Ce type d'ouvrage, très efficace en terme de rétention des matériaux, présente les inconvénients d'avoir un entretien coûteux et contraignant du fait de la fréquence des laves torrentielles et de ne rien apporter en matériaux solide pour recharger le lit de l'Arc qui présente un bilan sédimentaire déficitaire.

Les tableaux ci-dessous récapitulent pour les différentes plages de dépôt en service, les volumes de stockage disponibles et les volumes curés.

2.5.2.3 Plage de dépôt du Saint Julien

La plage de dépôt du Saint Julien a été réalisée en 1996 pour la protection de l'autoroute A43. D'un volume utile de 20 000 m^3, elle dispose d'une ouverture aval de type fente. Elle n'a encore pas vraiment fonctionné depuis sa création.

2.5.2.4 Travaux d'entretien des plages de dépôt

Le tableau ci après récapitule les principales caractéristiques des ouvrages et les volumes curés.

Caractéristiques des principales plages de dépôt dans le secteur d'étude

	année de construction	maître d'ouvrage	volume disponible (m3)	observations
Saint Bernard amont	1987	RTM	12 000	laves importantes stockées dans la plage en 1993 et 2005 (18 000 m^3)
Saint Bernard aval	1995	SFTRF	20 000	a peu fonctionné depuis sa création (2 500 m^3 curés après lave de juin 2005)
Claret	1991	RTM	25 à 30 000	fonctionnement fréquent nécessitant de nombreux curages
Saint Julien	1995	SFTRF	20 000	ne fonctionne pas
Rieubel	1992	RTM	5 000	deux ouvrages en série ayant fonctionné deux fois (1993 et 1996)

Volumes curés dans les plages de dépôts entre 1987 et 2008 (sources RTM)

Année	Saint Julien	LeClaret	Saint Bernard
1988			230
1992		1 100	450
1993		2 467	
1993		4 707	
1994		18 670	5 625
1995		18 000	
1998		532	
1999		27 500	
1999		6 400	
2001		1 000	
2003		20 650	
2004		950	
2005		237	11 520
2005			6 759
2006		7 960	
2007		10 100	
2008			9 000
Total	10 000	120 273	33 584

(*) Pour le Saint Julien volume estimé par la SFTRF depuis la création de la plage de dépôt

Les valeurs du tableau mettent en évidence les principaux éléments ci-après :

- Les volumes déposés dans la plage de dépôt du Claret sont de loin les plus importants et s'élèvent à environ 120 000 m^3 depuis sa création en 1991, représentant un volume moyen annuel de 6 600 m^3.

- La plage de dépôt du Saint Julien n'a pour l'instant pas ou peu fonctionné. Il faut cependant noter que la dernière grande crue du torrent date du 17 août 1987 avant la réalisation de l'ouvrage en 1996.
- Les volumes curés dans les deux plages du Saint Bernard sont bien inférieurs à ceux du Claret. Leur volume total est de 33 000 m^3 sur les 20 dernières années et représente donc un volume moyen de 1700 m^3/an.

2.5.3 Estimation des apports solide dans l'Arc en situation naturelle

L'estimation des apports solide se base sur l'observation des chroniques disponibles au service RTM, l'analyse du CEMAGREF réalisée en 1998, les synthèses réalisées par Hydratec et Marnezy en 1993 et 1999, et les analyses complémentaires réalisées dans le cadre de la présente étude.

Le Cemagref a procédé à une agrégation des données recueillies sur l'ensemble des torrents de Maurienne de façon à disposer d'un nombre suffisant d'évènement pour procéder à leur analyse statistique.

Il ressort de l'analyse menée par le Cemagref, que les torrents inscrits dans l'aire d'étude peuvent se scinder en deux groupes :

- **Le Claret et le Rieu Sec :** torrents présentant un pourcentage important de surface dénudée et donc très productifs en matériaux solides.
- **Le Saint Bernard, le Saint Julien, le Rieubel et le Bochet** : torrents présentant un pourcentage relativement moins important de surfaces érodables.

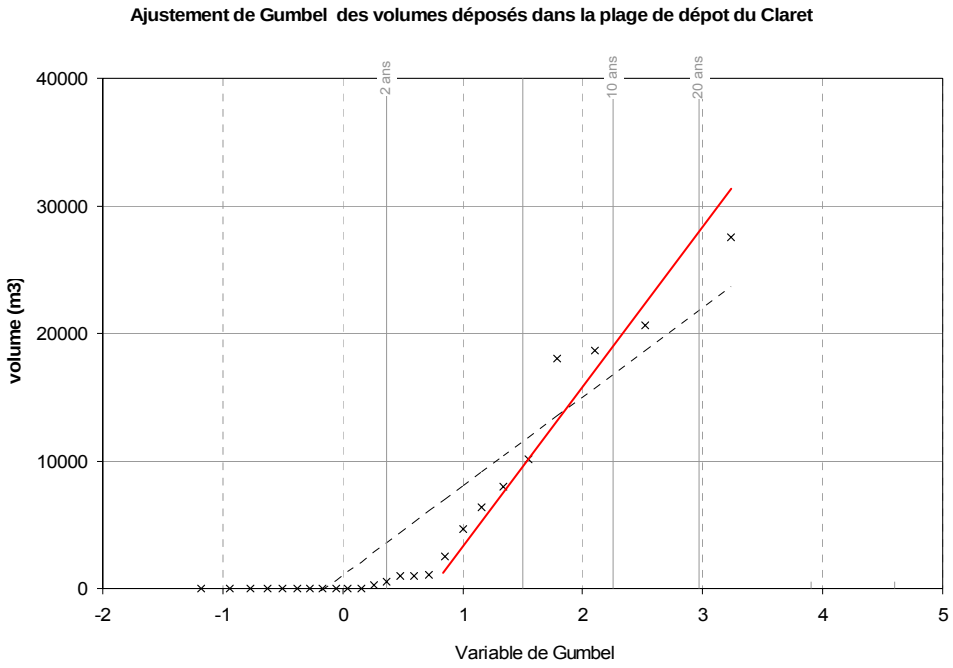
Le taux d'érosion et les volumes d'apport estimés par le Cemagref pour ces deux groupes de torrents, sont donnés dans le tableau ci-après.

			taux d'érosion m^3/km^2		volume d'apport m^3	
	Surface (km^2)	Goupe	10 ans .	100 ans	10 ans .	100 ans
Saint Bernard	18.13	2	700	3 500	13 000	65 000
Rieu Sec	0.87	1	2 000	11 000	1 500	10 000
Claret	2.74	1	2 000	11 000	6 000	30 000
Bochet	2.72	2	700	3 500	2 000	10 000
Saint Julien	19.77	2	700	3 500	15 000	70 000
Rieubel	2.59	2	700	3 500	2 000	10 000

Ces valeurs appellent de notre part les observations ci-après :

- Les apports du Rieu Sec sont sans doute sous estimés. En effet la crue de juin 1955 a apporté un volume de 40 000 m^3 de matériaux en 5 mn. Le volume d'apport centennal serait sans doute plus proche des 30 000 à 40 000 m^3 que de 10 000 m^3.
- On peut également faire la même remarque pour le Claret. La crue de juillet 1987 a apporté prés de 40 000 m^3 de matériaux et celle d'août 1993 prés de 35 000 m^3. On peut

considérer que sur la chronique d'observations disponible depuis la création du service RTM en 1882, cet événement présente une fréquence empirique sans doute inférieure à 100 ans. Par ailleurs, l'estimation d'apport décennal de 6000 m^3 n'est pas cohérente avec les volumes moyens annuels prélevés dans la plage de dépôt qui sont du même ordre. Nous avons procédé à une analyse statistique par ajustement de Gumbel des volumes curés dans la plage de dépôt. La figure ci-après illustre l'ajustement de Gumbel réalisé sur la chronique disponible depuis la création de la plage de dépôt. Il aboutit à une valeur d'occurrence 10 ans de 20 000 m^3 environ. Nous proposons donc de retenir en première approche cette la valeur qui correspond également à la valeur proposée par Alain Marnezy dans sa thèse de janvier 1999.



- Les valeurs établies par le Cemagref pour le torrent du Saint Bernard sont en conformité avec les observations faites. On sait en effet que la crue de 1877 a produit une lave considérable recouvrant la RN 6 sur une longueur de 500 m et que les crues d'août 1954 du 29 juin 1993 et du 6 juillet 1993 ont produit chacune des volumes de laves de 30 000 m^3 environ. On propose donc de retenir une fourchette de valeurs encadrant ces estimations.

- Concernant le torrent du Saint Julien, les valeurs obtenues surestiment sans doute les apports.

En définitive nous proposons de retenir les valeurs indiquées dans le tableau page suivante pour les apports solides des torrents.

Le volume d'apport annuel à l'Arc en situation naturelle serait donc globalement entre 20 000 et 36 000 m^3. On retiendra une valeur moyenne de 25 000 m^3 et **un volume de charriage de 12 500 à 17 000 m^3.** En effet si l'on considère les analyses granulométriques réalisées

sur les laves torrentielles après l'épisode de juin et juillet 1993 (voir figure ci-après), le volume des matériaux contribuant au transport par charriage de l'Arc correspond entre la moitié et les deux tiers du volume total des laves, les fines contribuant pour un bon tiers à ce volume.

Par ailleurs la fraction de blocs de diamètre supérieur à 200 mm et contribuant à la formation d'un pavage peut être estimée, d'après le fuseau granulométrique correspondant aux laves anciennes, à environ 20% du volume total soit environ 5000 m3.

Valeur des apports solides des affluents

Torrent	volume d'apport proposé m^3	
	10 ans .	100 ans
Saint Bernard	20 000	100 000
Rieu Sec	2 500	35 000
Claret	20 000	40 000
Bochet	2 000	10 000
Saint Julien	15 000	40 000
Rieubel	5 000	45 000

Estimation des apports annuels

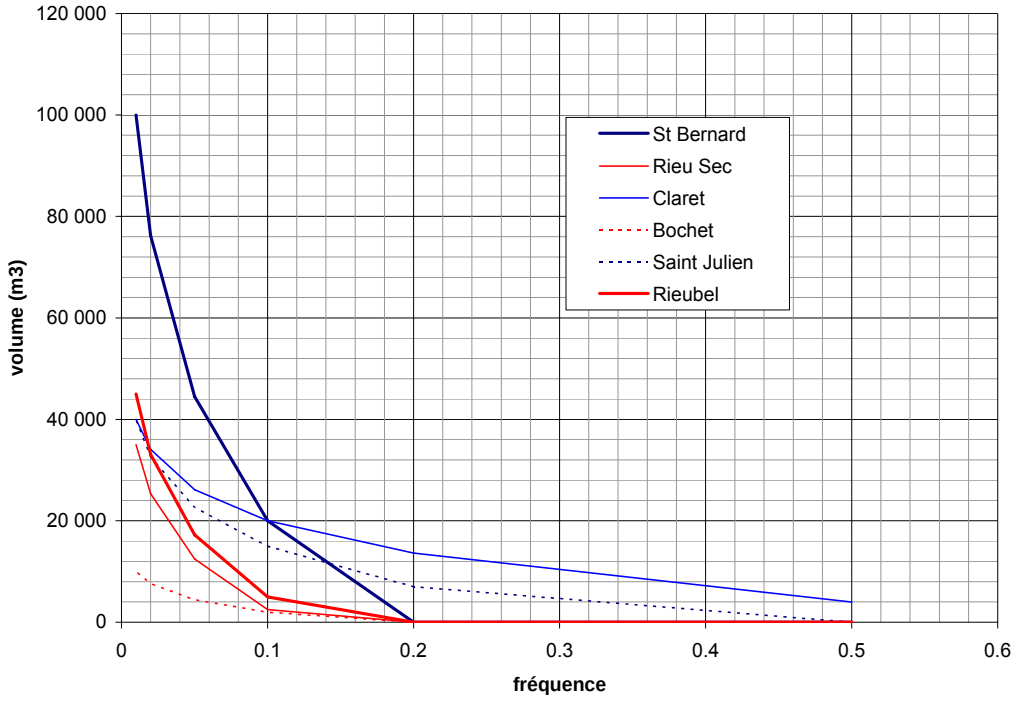
	St Bernard	Rieu Sec	Claret	Bochet	Saint Julien	Rieubel
Analyse fréquentielle (1)	5305	1368	6744	530	4286	1952
Marzori 1999	10000	3000	6000	3000	4000	4000
Hydratec 1993	15300	4000	7300		4000	5900
valeur retenue	**8000**	**3000**	**7000**	**1500**	**4200**	**3000**

(1) valeur obtenue par intégration de la courbe volume-fréquence

Apports transportés par charriage dans l'Arc
(hypothèse retenue : 50% du volume total d'apport)

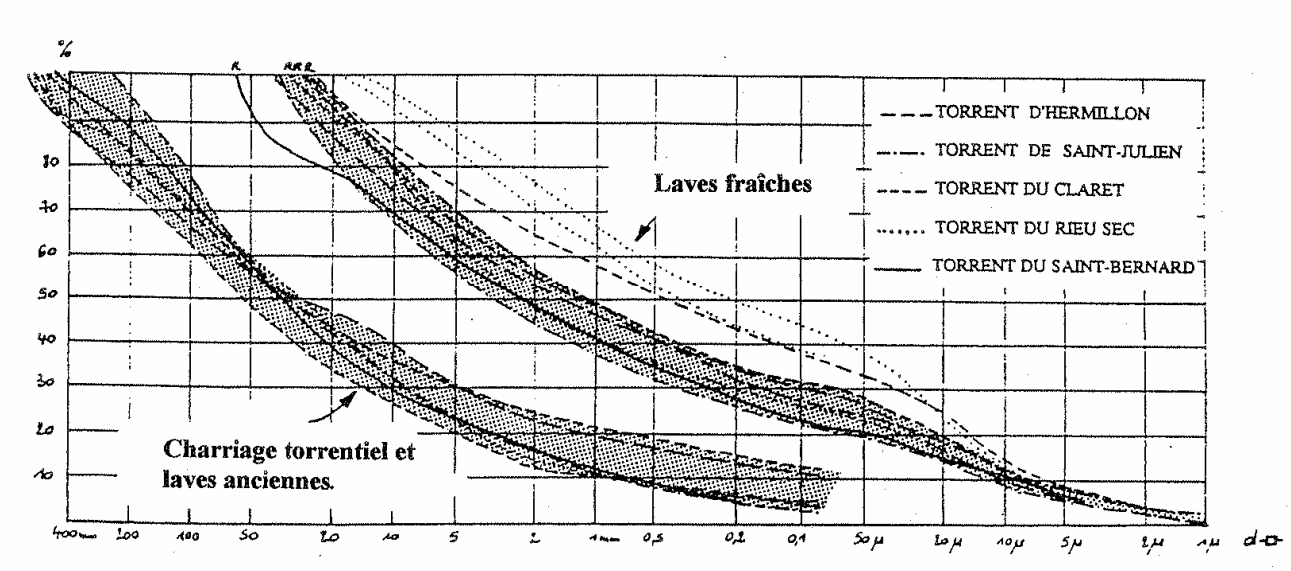
	St Bernard	Rieu Sec	Claret	Bochet	Saint Julien	Rieubel
Apports transportés par charriage dans l'Arc	**4000**	**1500**	**3500**	**750**	**2100**	**1500**
Gros blocs >200mm	**1600**	**600**	**1400**	**300**	**840**	**600**

(2) Analyse fréquentielle des apports solides des affluents (courbe volume-fréquence)



Courbes granulométriques des laves du torrent de l'Arc moyen

(Source Hydratec – analyses sur les laves de juillet 1993)



2.6 APPORTS SOLIDES PROVENANT DE L'AMONT

Les apports solides provenant de l'amont du secteur d'étude, correspondent aux alluvions de l'Arc transportées par charriage et provenant en partiet du secteur du Pousset, très productif en matériaux et de la Valloirette. Une méthode d'évaluation classique consiste à faire un bilan sédimentaire dans la retenue de Saint Martin la Porte en considérant que les matériaux transportés par charriage se déposent quasiment entièrement dans la retenue.

Après contact pris avec EDF, ce dernier ne dispose pas des éléments de bathymétrie avant et après les chasses permettant de réaliser un bilan sédimentaire dans la retenue de Saint Martin La Porte. Nous retiendrons néanmoins que les retenues de l'Arc moyen disposent chacune d'une capacité utile avant engravement de 120 000 à 150 000 m^3, et que EDF doit procéder tous les ans à leur dégravement.

Le volume utile de la retenue de Saint Martin La Porte est de 150 000 m^3. Le volume annuel de dépôt ne peut dépasser en aucun cas la capacité utile de la retenue. Il est donc au maximum de 150 000 m^3/an. En fait EDF procède au dégravement de la retenue bien avant son engravement complet. En admettant un taux de remplissage de 50%, le volume de matériaux déposés serait donc de 75 000 m^3 ; à ce chiffre il faut soustraire la fraction fine des matériaux transportés en suspension. EDF nous a signalé qu'un volume de 70 000 tonnes de matériaux a été curé dans la retenue de Saint Martin La Porte en 2008.

Le bilan des chasses réalisées au pont des Chèvres met en évidence un volume solide annuel relargué de 150 000 m^3 environ. Il est délicat cependant de procéder à une évaluation de la part transportée par charriage à partir de cette valeur. En effet ce chiffre reflète plus le transport solide transporté en suspension et évalué par EDF par prélèvement d'échantillon dans les écoulements.

Une autre approche consiste à évaluer le charriage naturel de l'Arc en situation naturelle dans le secteur d'étude et à considérer que le bilan sédimentaire était globalement équilibré avant les perturbations récentes (aménagements hydroélectriques, extractions de matériaux, aménagements sur les affluents).

Le volume de transport solide par charriage a été fait en considérant plusieurs formulations de transport solide (voir chapitre 3).

Les résultats de calcul obtenus en considérant que les caractéristiques granulométriques des matériaux mesurées en 1992 correspondaient à un état encore peu perturbé, aboutissent à une valeur de charriage annuel compris de l'ordre de 65 000 m^3/an. En soustrayant les volumes par charriage des apports latéraux estimés à environ 15 000 m3/an on obtiendrait un volume solide par charriage provenant de l'amont de l'ordre de 50 000 m3.

Ces deux approches convergent pour conclure sur un volume transporté par charriage en amont d'environ 50 000 m^3/an.

3 EVOLUTION MORPHOLOGIQUE DU LIT DE L'ARC

3.1 MORPHOLOGIE GENERALE DE L'ARC DANS LE SECTEUR D'ETUDE

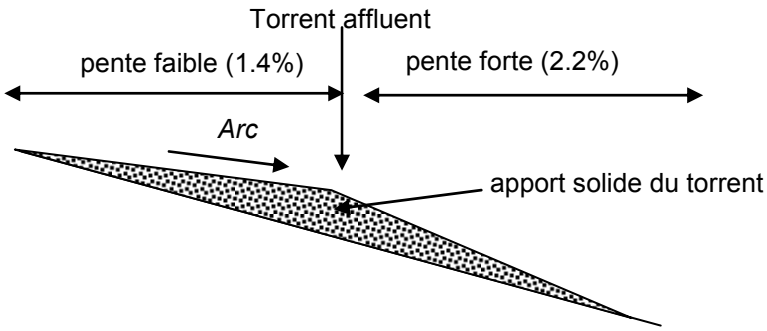
Le lit de l'Arc dans le secteur d'étude se situe dans le tronçon court-circuité de la dérivation EDF de Saint Martin La Porte. Il reçoit en aval du barrage des torrents très actifs qui ont façonné son lit jusqu'à maintenant.

On distingue ainsi les différents secteurs ci-après.

3.1.1 Le lit de l'Arc entre le barrage de Saint Martin la Porte et le viaduc des Resses.

Ce secteur reçoit les torrents affluents très actifs de rive droite. La pente de l'Arc est comprise entre 1.4% (tronçon s'inscrivant généralement en amont de la confluence des torrents) et 2.2% (tronçon s'inscrivant en aval de la confluence des torrents). Le graphique ci-après illustre la structure des pentes dans la zone de confluence des torrents. Cette structure s'accompagne d'une respiration du lit pouvant dépasser dans certains cas 10 m et par une certaine mobilité latérale (cours d'eau repoussé au fil du temps contre le versant de rive gauche par les déjections des torrents. Le lit a néanmoins progressivement été contraint par la construction de la voie ferrée et de l'ancienne RN6 d'abord puis par les nombreux remblais de décharge protégés plus ou moins efficacement par des protections en enrochements.

Structure des pentes au droit des confluences avec les torrents



Ce secteur peut se scinder en plusieurs tronçons :

- **Le tronçon entre le barrage de Saint Martin et le Pont des Anglais**. Il reçoit les torrents du Saint Bernard et du Rieu Sec et se caractérise par une relative stabilité de son profil en long (cela n'empêche pas une certaine respiration du lit au droit des confluences du Saint Bernard et du Rieu Sec). Cette stabilité relative est à mettre en

relation avec la présence encore importante de gros blocs tapissant le lit. Certains ouvrages permettent également de stabiliser le fond : seuil de l'ancienne centrale électrique de Saint Félix, radiers en béton des viaducs RFF en amont et en aval du Rieu Sec. On note cependant en quelques endroits des incisions du fond en particulier en aval du contre seuil de Saint Martin la Porte et entre l'ancien seuil de Saint Felix et le 1er viaduc RFF.

- **Le tronçon entre le pont des anglais et le seuil du Bochet**. Ce tronçon est sous l'influence des apports du Claret. Le lit est actuellement contraint entre le mur de soutènement de l'ancienne RN6 en rive droite et la protection de l'usine Ferropem en rive gauche. Son profil en long était contrôlé en aval par le seuil du Bochet qui a été détruit par la crue de mai 2008. La pente du lit était de l'ordre de 2.2 %. Elle est maintenant de 1.4%, suite au destokage sédimentaire du lit observé depuis 1987 (dernière lave torrentielle ayant fortement engravé le lit) et l'aménagement de la plage de dépôt en 1991.
- **Entre le seuil du Bochet et le viaduc des Resses.** Ce tronçon reçoit les apports torrentiels du Saint Julien et du Bochet et se caractérise donc par une respiration relativement importante et une divagation latérale du lit. Cette respiration peut atteindre 10 m. Les divagation de l'Arc au gré des dernières crues provoquent des désordres régulièrement sur les protections des remblais et les ouvrages RFF. Le lit est contraint latéralement par le mur déflecteur en rive droite en aval du seuil et qui a été complètement emporté durant la crue de mai 2008, par les protections rive droite des décharges existantes : Pechiney et Sirtomm, et par le mur en béton protégeant la falaise rive gauche du Bôchet.

3.1.2 Entre le viaduc des Resses et le Rieubel.

Ce tronçon constitue une zone de régulation du transport solide de l'Arc. Sa pente d'équilibre se situe autour de 2%. L'absence de contrainte latérale forte a permis le développement d'écoulements en tresse. Les dépôts puis reprise des alluvions par l'Arc se faisaient sans modification majeur du profil en long par simple mobilisation des bancs présents. On observait jusqu'en 1995-2000, la présence de gros blocs provenant des apports du Saint Julien et du Bochet. La configuration des écoulements en tresse a aujourd'hui quasiment disparu au profit d'un chenal unique. Cette évolution est à mette en relation avec les prélèvements réalisées dans le lit (contruction de la digue des Oudins, besoins SFTRF,…) et la diminution des apports solide provenant de l'amont.

3.1.3 Entre le Rieubel et pont d'Arc.

- Ce tronçon est sous l'influence des apports du Rieubel. La tendance actuelle est plutôt à l'érosion du lit suite notamment aux curages répétés dans ce tronçon.

3.2 EVOLUTION DU PROFIL EN LONG DU LIT

Le profil en long général de l'Arc est reporté en annexe. Sur ce profil en long[1] sont indiquées les cotes des fonds observés aux principales époques ci-après :

- 1908 et 1956, représentatifs de l'état du lit avant la grande crue de 1957 et avant la mise en service des aménagements EDF en amont du bassin versant.
- Novembre 1992, représentatif de l'état du lit avant la crue de septembre 1993.
- Octobre 1993, représentatif du lit après la crue de septembre 1993.
- Mars 2000, (aval du pont des Anglais uniquement), représentatif du lit après la crue de juin 1994 et avant la crue d'octobre 2000.
- Décembre 2002 (en aval du torrent du Saint Julien) et septembre 2004 (en amont du Saint Julien), représentatif du lit après la crue d'octobre 2000
- Avril 2009, représentatif de l'état du lit après la crue de mai 2008.

Ces observations mettent en évidence les principales évolutions ci-après.

- **Le fond du lit en 1992** correspondait à un niveau engravé de l'Arc. Cette période se situe 5 ans après l'épisode de laves torrentielles sur le Claret et le Saint Julien s'étant produit respectivement en juillet et en août 1987 et ayant amené plus de 40 000 m3 pour le Claret et sans doute prés de 60 000 m3 pour le Saint julien.
- **Le fond du lit en 1993** connait un début d'érosion au droit des confluences avec les torrents (Saint Bernard, Rieu Sec, Claret, Saint Julien). On note après la crue, le sapement des cônes du Saint bernard (après la lave de juillet 1993), du Rieu Sec (le cône a été sapé jusqu'aux culées de l'ouvrage de franchissement de l'ancienne RN6). Cependant on ne note pas de destockage sédimentaire importante, les érosions au droit des cônes alimentant le lit en matériaux grossiers.
- **Entre la crue de septembre 1993 et celle d'octobre 2000**, on observe un début de destockage sédimentaire de l'Arc sous l'effet des extractions dans le lit pour les besoins des travaux en cours (dont celui de l'autoroute A43) et des crues de juin 1994, de septembre 1994 et de juin 1998.
- **La crue d'octobre 2000** a eu des effets importants sur la morphologie du lit liés à l'importance des débits et à sa durée. On observe une incision généralisée de l'Arc sur l'ensemble du secteur d'étude entrainant des désordres plus ou moins importants sur les ouvrages en bordure du lit :

[1] La correspondance entre les PK de référence de l'Arc et les PK du modèle hydrauliques est donnée par l'expression PKArc + K modèle = 143.45

- Protection rive droite du mur en aval du pont des Anglais déchaussée (PK Arc 48.875),
- déchaussement des protections hydrauliques de la décharge Ferropem (PK Arc : 48.6 à 48),
- fosse d'érosion en aval du seuil du Bochet (PK Arc : 47.9),
- ruine de l'ancienne protection de l'exploitation de Granulat Lamier en amont du Saint Julien (PKArc : 47.8),
- affouillement de la semelle du mur BA de la falaise RG du cône du Bochet (PK Arc : 47.625),
- dégradation du talus de protection de la voie ferrée en amont du viaduc des Resses (PKArc : 47.0),
- incision importante du lit au droit de la travée RG du viaduc RFF des Resses (PK Arc 46.9). L'incision du lit atteint 4 m en amont du viaduc et 2 m en aval,
- mise à nu des fondations du mur de protection de l'ancienne RN6 (PK Arc 46.575),
- mise à nu et affouillement des protections de voie ferrée en amont et en aval du cône du Rieubel,
- mise à nu des fondations dans la partie aval du mur crénelé face au Rieubel (PKArc : 45.5),
- incision du lit contre le mur de protection construit en 1957 au droit de Pont d'Arc.

❑ **la crue de mai 2008** se produit sans que le lit n'ait pu se recharger en matériaux torrentiels et après prélèvements de blocs dans le secteur de Villargondran pour les besoins de la construction de la digue des Oudins réalisée par la commune. Les conséquences de la crue qui a été aussi forte que celle d'octobre 2000 en débit de pointe et en volume, sont très importantes. La description détaillée des désordres fait l'objet d'un chapitre spécifique (cf. §3.4) . Les principales évolutions constatées du profil en long du lit sont données ci-après :

- **Entre le barrage de Saint Martin et le Pont des Anglais :** la forte incision du lit en aval a pour conséquence une érosion régressive du fond qui remonte en amont du pont des Anglais. Le front de pavage observé se situe actuellement au PK Arc 49.25, 350 m en amont du pont.
- **Entre le pont des Anglais et le seuil du Bochet.** On note une incision continue du lit depuis 1987 qui dépasse actuellement 5 m en aval de la confluence du torrent. Cette incision est à mettre en relation avec la quasi suppression des apports solide du Claret retenus dans la plage de dépôt la destruction du seuil du Bochet, et le dépavage du secteur suite à l'utilisation des blocs dans le lit pour la réalisation des protections de berge. La forte incision constatée s'accompagne d'un phénomène d'érosion régressive. On note actuellement trois fronts d'érosion. Le premier se situe 350 m en amont du pont des Anglais, le second au PK Arc 48.6 au droit de la décharge Ferropem et le troisième au droit de l'ancien seuil du Bochet (PK Arc 47.85).

- **En aval immédiat du seuil du Bochet.** Le lit se caractérise par une forte pente de 8.9 % résultant de la destruction du seuil et correspondant au front d'érosion régressive du lit.
- **Entre le seuil du Bochet et le viaduc des Resses**. On ne note pas d'incision importante du fond suite à la crue
- **En aval du Pont des Resses**. On note une incision modérée du lit de 0.5 m environ. Le destockage sédimentaire est par contre important.

3.3 EVOLUTION EN PLAN DU LIT

L'Arc dispose d'une forte capacité de charriage en crue (voir § 4), se traduisant à chaque crue, par des érosions de berge importantes.

L'analyse des photographies de la **crue de juin 1957** (voir document en annexe) montre ainsi les divagations de l'Arc avec en particulier :

- les érosions du talus de la RN6 entre le Rieu Sec et le pont des Anglais,
- la destruction sur 600 m du mur de soutènement de l'ancienne RN6 sur 600 m,
- l'érosion du ballast RFF au droit du seuil du Bochet,
- l'érosion du cône du Bochet causant l'éboulement d'une partie du versant de rive gauche,
- l'attaque rive droite par les écoulements de site de l'actuelle décharge Pechiney de Saint Julien Montdenis,
- la brèche dans le mur RFF ayant causé l'inondation du hameau des Resses et la restitution dans l'Arc en amont du Rieubel avec coupure de la voie ferrée.

En 1993, la crue s'est écoulée dans un lit engravé occasionnant de nombreuses attaques latérales des berges :

- L'Arc avait débordé sur l'ancienne RN6 sur environ 200m en aval du torrent du Claret, inondant également le remblai de la voie ferrée.
- En rive gauche le crassier PEM (actuelle décharge Ferropem) avait été emporté sur toute sa longueur (recul de 15 à 20 m de la berge).
- En aval du seuil du Bôchet, la berge rive droite avait été érodée emportant le remblai de l'ancienne RN6 et menaçant d'inonder directement le tunnel RFF.
- Le cône du torrent du Bôchet avait été sapé sur toute sa longueur et sur une hauteur de 10 m environ ocasionnant un affouillement de la semelle du mur BA protégeant la falaise et des dépots de matériaux en amont du pont RFF des Resses.
- Une partie du talus et des protections de la décharge Pechiney de Saint Julien Montdenis avait été emportée

- En aval du pont des Resses, la berge de rive droite de la décharge du SIRTOMM avait été emportée.

En octobre 2000, malgré les travaux de reprise des protections entrepris après les crues de 1993 et 1994, on note le même type de désordres, à savoir :

- érosion du talus de la décharge Pechiney à Saint Julien Montdenis,
- érosion de berge et attaque de la digue des Oudins par les écoulements nécessitant sa reprise,
- brèche dans le mur de souténement de l'ancienne RN6 à Saint Julien MontDenis (PK Arc 46).

3.4 DESORDRES OCCASIONNES LORS DE LA CRUE DE MAI 2008

Les évolutions du profil en long et en plan du lit constatées lors de la crue de mai 2008 se traduisent par des désordres importants sur les infrastructures. Ces différents désordres sont localisés sur la vue en plan ci-après et illustrés par les photographies jointes.

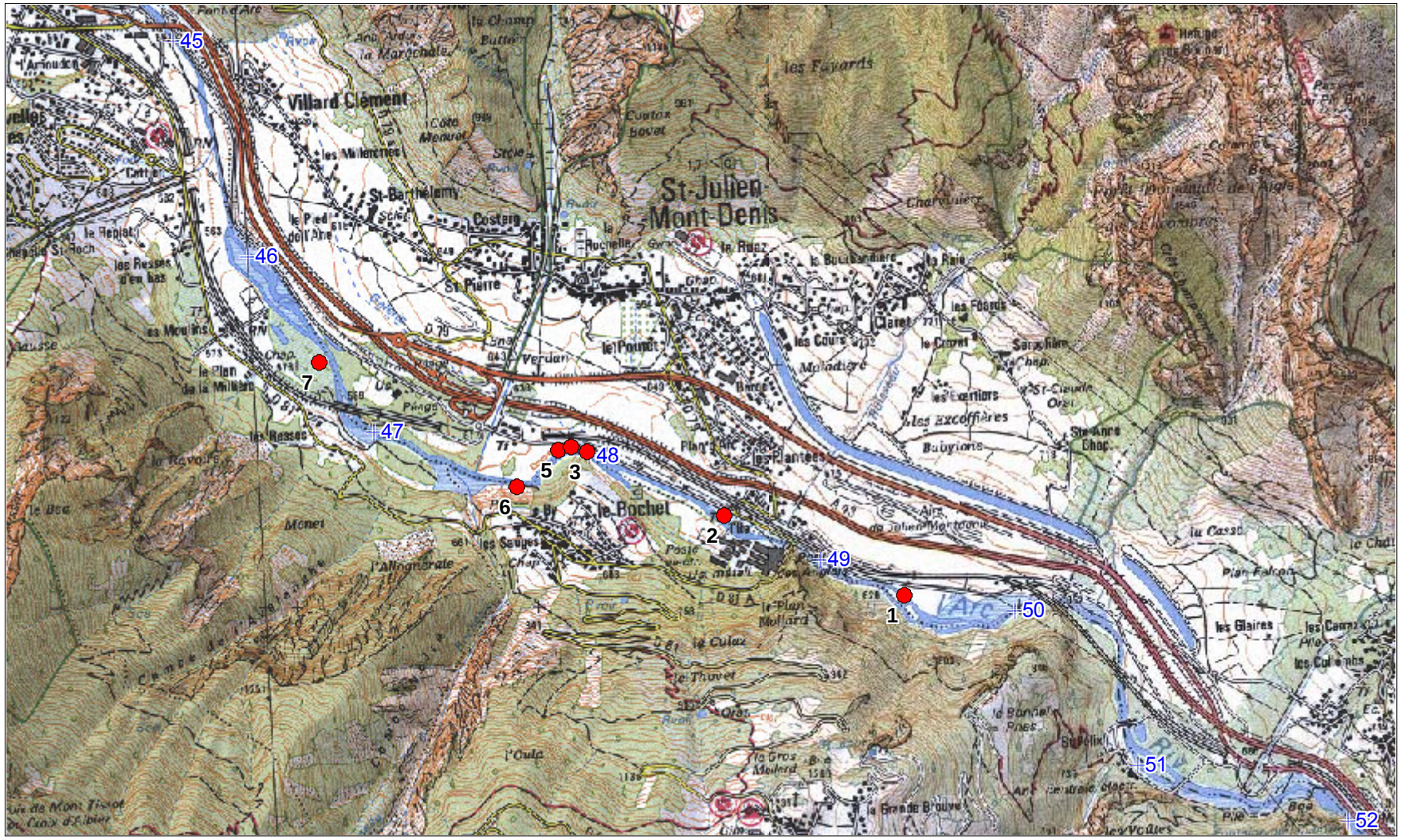
Il convient de noter que certains désordres recensés dans le mémoire de crue de mai 2008 (Rapport CIDEE – octobre 2008 pour la DDEA 73) étaient déjà présents avant la crue.

- déchaussement du mur de protection de l'ancienne RN6 en amont du Rieu Sec,
- démantèlement du radier du viaduc RFF en aval du Rieu Sec,
- érosions de berge et dégats sur les protections existantes construites après 1957 en amont du pont des Anglais.

Description des désordres causés par la crue de mai 2008

site	PK Arc	description	Enjeux concernés
1	49.35	Erosion du talus et du mur de protection de l'ancienne RN6 entre le viaduc RFF de l'Illaz et le Rieu Sec, mise à nu des réseaux existants (télécom, Edf)	Risque de désordre à terme sur la voie ferrée et le pylone RTE. Travaux en cours par la RFF (reconstitution d'une protection de berge en gabions fondée sur semelle en enrochements liés au béton).
2	48.0-48.9	Démantèlement des protections en enrochement et de la maçonnerie du mur de l'ancienne RN6 en aval du pont des Anglais ayant nécessité des travaux de confortement en urgence par le CG73 (mise en place d'un épaulement en enrochements cyclopéen et injection de béton dans le mur).	Ancienne RN6 – voie ferrée – réseau AEP et réseaux secs.
3	48.0	Brèche dans le mur de l'ancienne RN6 en amont du seuil du Bochet – conduite AEP arrachée sur 300 m	Voie ferrée – conduite AEP - réseau électrique HTA 20kv (SOREA)
4	47.9	Destruction complète du seuil du Bochet.	Ensemble des enjeux situés en amont :Mur de l'ancienne RN6 voie ferrée, pont des Anglais, protection de l'usine Ferropem.
5	47.8-47.9	Destruction du mur de l'ancienne RN 6 et des protections associées en aval du seuil avec pour conséquence l'érosion d'une grande partie du merlon protégeant le tunnel ferroviaire et le dévoiement des réseaux existants (AEP, Télécom).	Tunnel ferroviaire et plateforme de stockage de matériaux
6	47.6	La poursuite du déchaussement de la semelle du mur BA de protection de la falaise du Bochet.	Habitations du village du Bochet
7	46.6-46.7	Affouillement localisé de la digue des Oudins	Plan d'eau et voie ferrée
8	45.0	Affouillement du lit au droit du mur de Pont d'Arc	

Plan de situation des désordres occasionnés par la crue de mai 2008



4 EVALUATION DU TRANSPORT SOLIDE PAR CHARRIAGE

4.1 GRANULOMETRIE DES MATERIAUX DE L'ARC

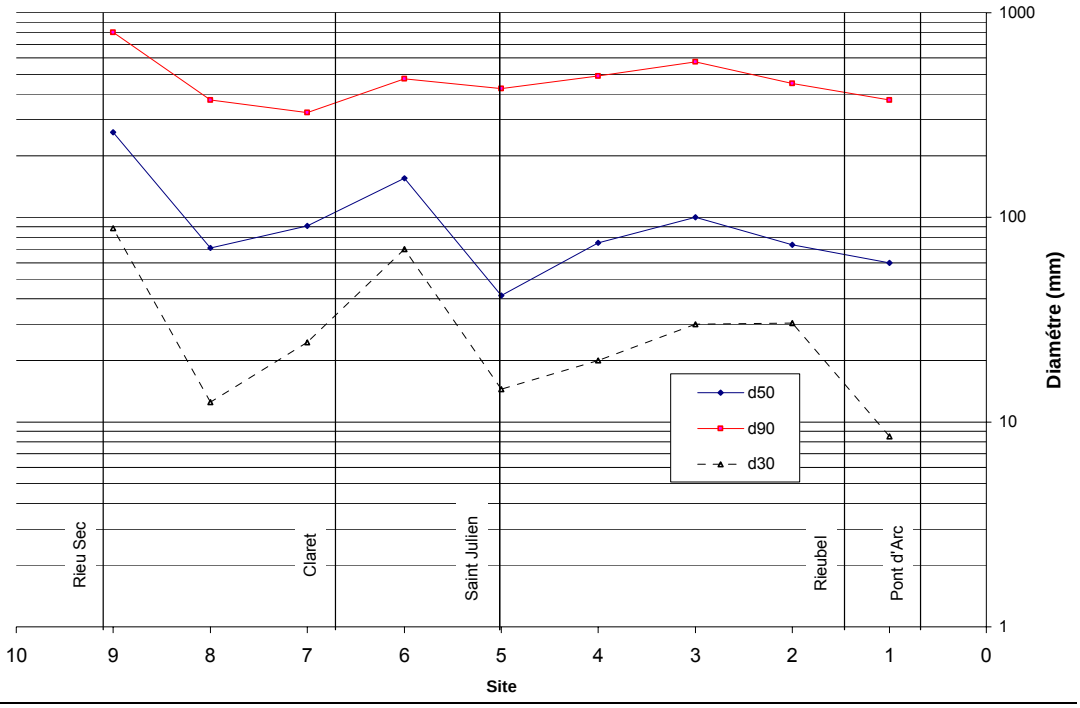
4.1.1 Granulométrie de 1992

Les analyses granulométriques effectuées sur les prélèvements d'échantillons conduisent aux résultats ci-après

Résultats des analyses (2 échantillons par site)

secteur	N° de site	**d30**	**d50**	**d70**	**d90**	**dmoy**
Amont pont d'Arc	16	7-10	40-80	125-220	200-550	93-223
Aval viaduc des Resses	17	19-42	42-105	130-200	400-500	
Aval viaduc des Resses	18	10-50	55-150	300-350	500-650	205-301
aval Saint Julien	19	10-30	35-115	85-300	180-800	
Saint Julien	20	12-17	38-45	90-130	300-550	110-196
aval seuil du Bochet	21	60-80	150-160	230-235	400-550	192-233
Aval Claret	22	17-32	80-102	180-220	250-400	119-281
aval Rieusec	23-1	10-15	42-100	125-180	300-450	134-195
Cône Rieusec	24	17-160	170-350	400-700	700-900	295-475
moyenne		**33**	**103**	**233**	**477**	**210**

Evolution des diamètres des alluvions le long du cours d'eau



Le plan de situation des sites de prélèvements est reporté en annexe.

Les caractéristiques granulométriques obtenues appellent les principaux commentaires ci-après :

- Le diamètre moyen (d50) des alluvions est compris entre 35 et 350 mm avec une valeur moyenne égale à 103 mm. La dispersion importante de ces valeurs (écarts de 1 à 10 entre les sites) témoigne de l'importance des apports de matériaux en provenance des torrents affluents et de leur transport progressif vers l'aval. Il convient en effet de rappeler les crues importantes de 1987 sur les torrents à laves ayant contribué à recharger le lit.
- Le diamètre d90 est compris entre 180 et 900 mm avec une valeur moyenne de 477 mm. On ne note pas d'écart significatif de ces valeurs au droit des confluences des torrents, mais la présence de gros blocs en quantités importantes sur tout le linéaire constituant un armurage du lit
- Le diamètre moyen des alluvions est de l'ordre de 210 mm. Il s'inscrit entre le D60 et le D70.

Les alluvions de l'Arc sur le secteur d'étude se caractérisent donc, à cette époque, par une matrice de matériaux à granulométrie relativement étendue avec présence de nombreux gros blocs. La ségrégation des matériaux vers l'aval est peu marquée, l'ensemble des affluents torrentiels contribuant au rechargement du lit en matériaux grossiers.

4.1.2 Granulométrie de 2009

Nous avons réalisé des granulométries dans l'Arc selon les deux méthodologies ci-après :

- **Méthode du transect**. Elle a consisté à relever, selon un pas d'espace de 0.1 m, le long d'un axe matérialisé par une règle et sur une distance de 2 m, le diamètre des alluvions et de procéder à leur classement. Il s'agit donc d'une méthode simplifiée permettant d'établir les granulométries de surface des alluvions des bancs présents dans le lit, en excluant en particulier les blocs importants. Elle permet de caractériser préférentiellement la granulométrie des bancs meubles.
- **Méthode par prélèvement dans la masse**. Des échantillons de 200 l de matériaux ont été prélevés dans le lit entre 0.5 et 1.0 m de profondeur. La courbe granulométrique a été réalisée par tamisage et pesée des tamisats. La pesée de la fraction grossière (400 mm, 200 mm, 100 mm, 50 mm) a été réalisée sur place, la fraction plus fine (<50 mm) a été analysée en laboratoire.

  Les résultats des analyses granulométriques réalisées sur les d'échantillons prélevés le 7 avril 2009 sont indiqués dans le tableau et sur les figures ci-après.

Les résultats obtenus appellent les principales observations ci-après :

- Les résultats différent sensiblement d'une méthode à l'autre. Ces différences ne sont pas surprenantes, la granulométrie de surface mesurée par transect étant représentative des bancs mobiles se déposant en fin de crue tandis que celle obtenue par prélèvement dans la masse des alluvions correspondent plus aux matériaux représentatifs du charriage généralisé après mise en mouvement de l'ensemble des matériaux. Nous considérons par la suite les résultats obtenus par pesée dans la masse plus représentatif du fonctionnement de l'Arc en crue et permettant une analyse comparative avec les résultats de 1992.

- Le diamètre moyen des 5 échantillons prélevés dans la masse est de 70 mm, sensiblement plus faible que la valeur obtenue en 1992. Il convient toutefois d'être prudent dans l'interprétation des chiffres, compte tenu des tailles différentes des échantillons.

- Le diamètre des matériaux les plus grossiers (d90) se situe autour de 300 mm contre 477 mm en 1992. C'est principalement dans le secteur situé entre le viaduc des Resses et le Rieubel, que l'écart est le plus marqué. Sur ce secteur la courbe granulométrique réalisée (voir figure ci-après – courbe 4, et courbes granulométriques reportées en annexe) met en évidence une faible proportion de matériaux grossiers. Ce résultat est à mettre en relation avec les extractions de matériaux réalisées dans ce secteur suites aux dernières crues de 2000 et de 2008 et durant les travaux de l'autoroute.

- Le diamètre moyen des matériaux est de l'ordre de 138 mm contre 210 mm en 1992. Il s'inscrit également entre le D60 et le D70.

- On constate une ségrégation des matériaux vers l'aval, avec en particulier une diminution sensible des matériaux assurant l'armure du lit entre le pont du Bochet et la confluence du Rieubel.

- Le prélèvement de matériaux réalisé en aval du torrent du Claret (site 21) a mis en évidence la présence à faible profondeur d'un horizon marron/gris argileux pouvant témoigner de cargneules provenant du Claret. Les quelques sondages récupérés dans le secteur pour la mise en place des piézomètres de suivi de la décharge Ferropem montrent que la couche de matériaux quaternaire dépasse une épaisseur de 10 m dans cette zone sous le niveau de l'Arc. On peut donc estimer, en considérant une incision du lit de l'ordre de 5 m depuis la réalisation des piézomètres, que l'épaisseur de matériaux quaternaires soit encore au moins de 5 m.

4.1.3 Synthèses des évolutions granulométriques observées dans le secteur d'étude

On retiendra donc pour la suite de l'étude les conclusions ci-après.

- Les caractéristiques granulométriques des matériaux de l'Arc entre le barrage de Saint Martin la Porte et l'aval du Rieu Sec ne semblent pas avoir évoluées de façon notable. On note en particulier que les matériaux grossiers sont restés présents dans le lit et que ce dernier n'a d'ailleurs pas subi d'incision significative depuis 20 ans.

- Le lit de l'Arc entre le pont des Anglais et le viaduc RFF des Resses se caractérise par une diminution sensible de matériaux moyens et grossiers. Le diamètre d'armurage du lit qui peut être représenté par le d70 des alluvions était de 205 mm en 1992 et se situe autour de 90 mm en 2009. Cette évolution est à mettre en relation avec l'incision du lit observée depuis 1993 consécutives aux crues de 1993, 1994, 2000 et 2008.

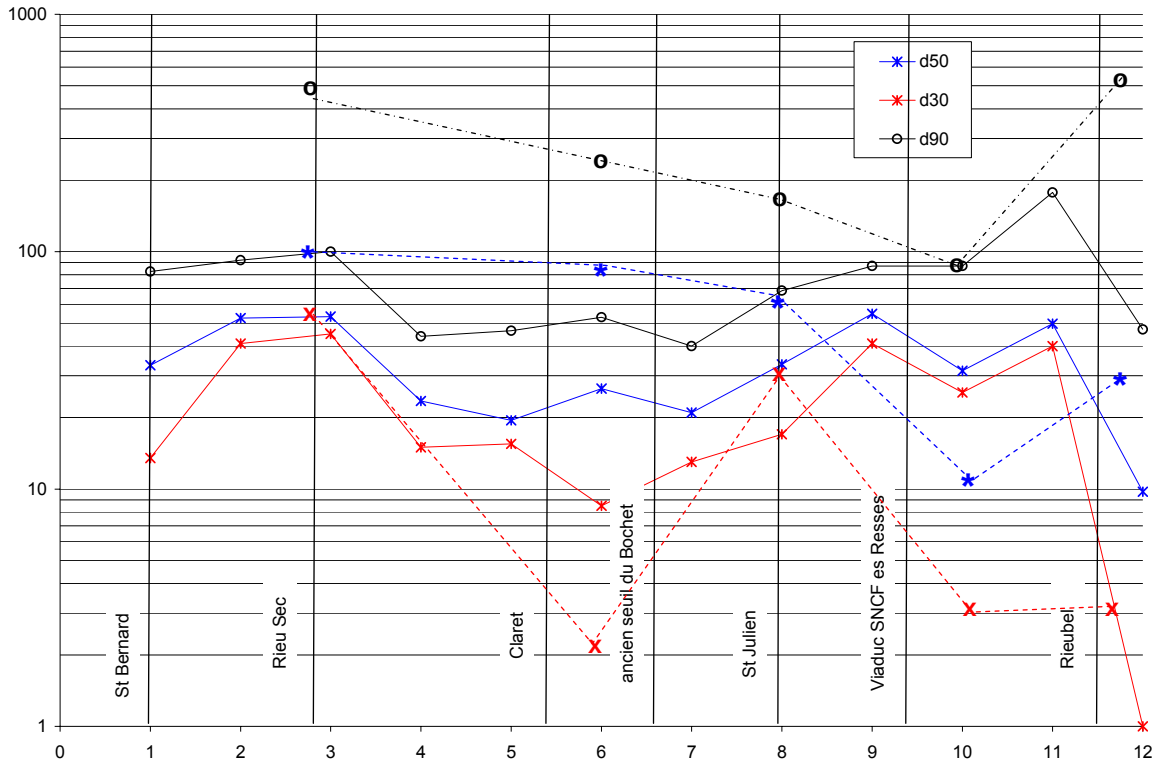
- Le secteur situé en aval du viaduc RFF des Resses, et constituant une zone de régulation du transport solide (élargissement de la bande active du lit, et zone de tressage historique de l'Arc), se caractérise également par une diminution sensible de la fraction grossière des alluvions, les blocs de diamètre supérieur à 300 mm ayant pratiquement disparus suites aux dernières extractions.

Résultats des analyses d'échantillons prélevés dans la masse (1 échantillon par site)

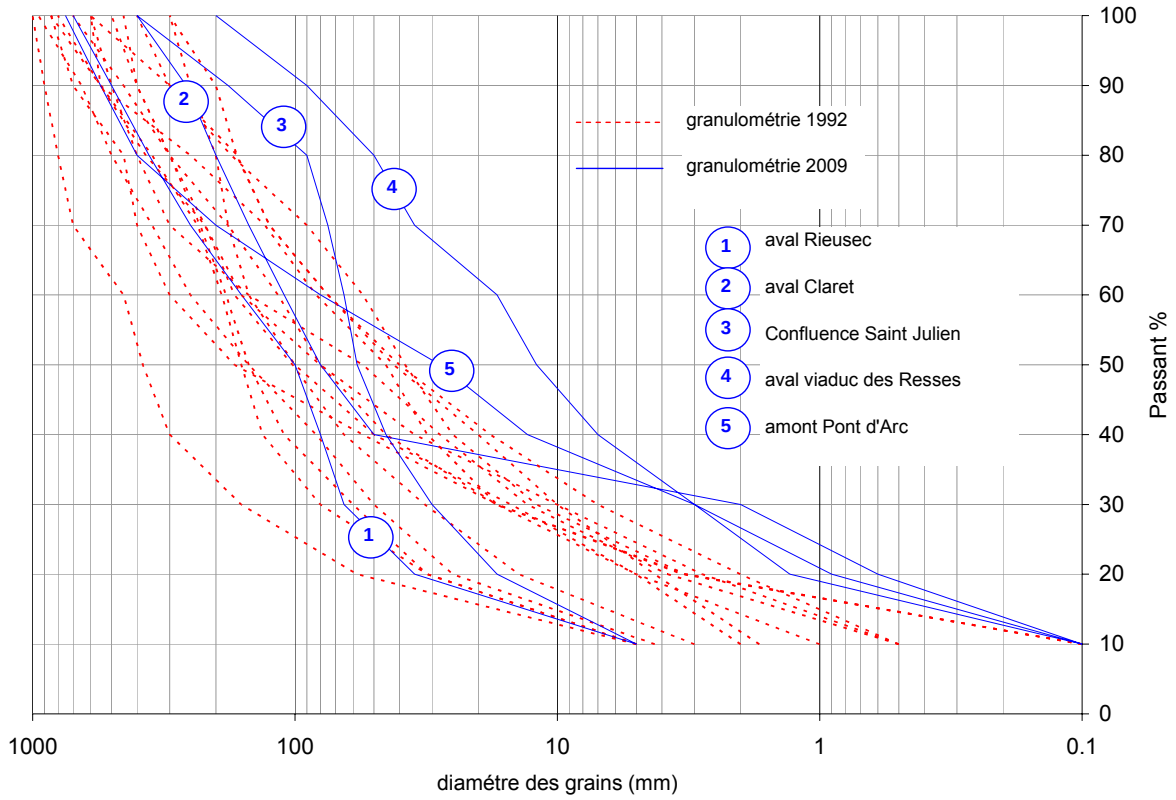
tronçon	site	D30	D50	D70	D90	Dmoyen
St Martin la Porte -Rieu Sec	23	65	100	250	500	225
Rieu Sec - seuil du Bochet	22	2	80	150	260	125
Seuil du Bochet - Viaduc Resses	20	30	58	75	180	97
Viaduc des Resses - Rieubel	18	3	12	35	90	42
Rieubel-Pont d'Arc	16	3	28	200	550	202
moyenne	**20**	**20.6**	**55.6**	**142**	**316**	**138.2**

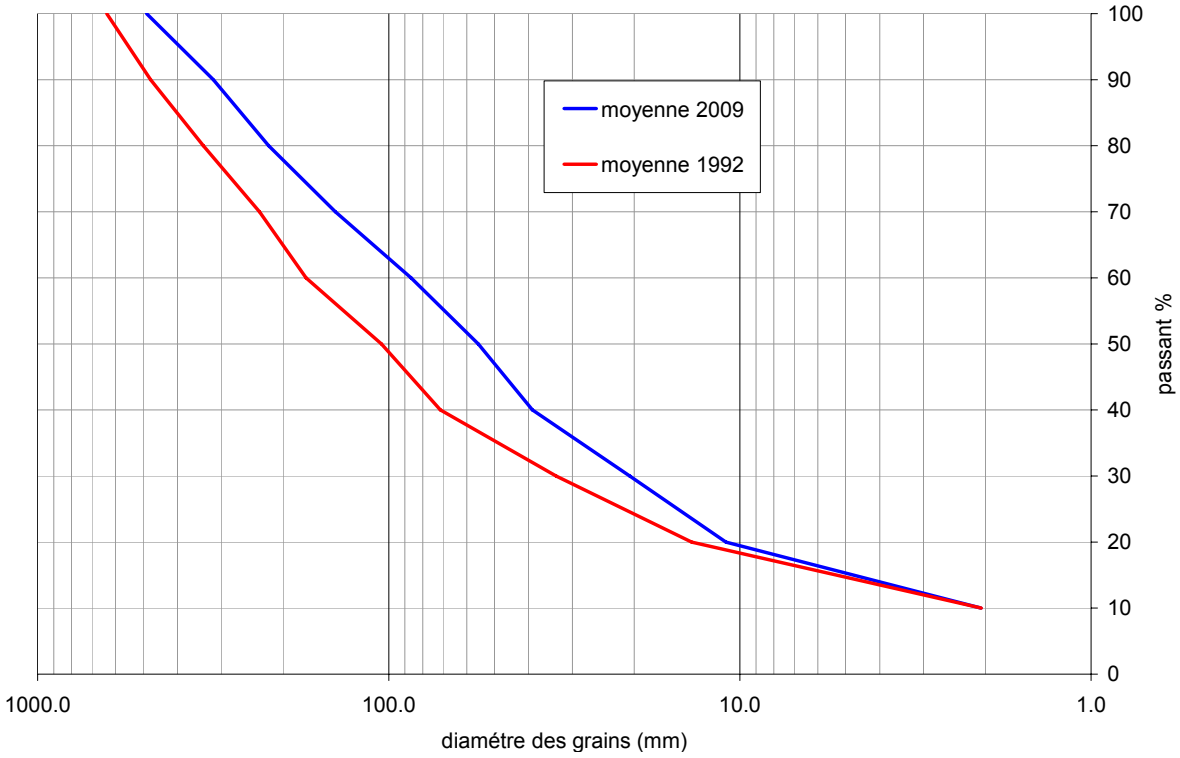
Evolution le long du cours d'eau des diamètres caractéristiques des alluvions

(Méthodes par prélèvement dans la masse et par transect)



Synthèse granulométrique des prélèvements dans l'Arc réalisés en 1992 et 2009





4.2 CALCUL DU TRANSPORT SOLIDE PAR CHARRIAGE

4.2.1 Structure des pentes

Suite aux évolutions importantes du lit, on distingue les deux états ci-après :

- Lit en 1992 représentatif du lit peu perturbé
- Lit en 2009 représentatif d'un déficit sédimentaire

Le tableau et le profil en long ci-après présentent la structure des pentes pour ces deux configurations (voir également §3.2).

tronçon	PK [2]Amont	PK Aval	Pente (%) 1992	Pente (%) 2009
Bge S Martin – Pont RFF N°1	91.78	92.81	2.18	2.2
Pont RFF N°1- pont RFF N°2	92.81	93.4	Cône du Rieusec	
Pont RFF N°2 – Claret	93.4	94.1	1.44	1.44
	94.1	94.6		2.2
Tor du Claret - amont seuil du Bochet	94.6	94.9	2.24	
	94.9	95.2		1.4
Amont seuil du Bochet – seuil du Bochet	95.2	95.55	1.4	
Seuil du Bochet – torr St Julien	95.55	95.65		8.9
	95.65	95.95	1.56	1.8
Torr St Julien – Viaduc des Resses	95.95	96.6	2.32	
	96.6	96.9	1.9	2.54
Viaduc des Resses - Rieubel	96.9	97.8		1.74

Ces valeurs appellent les principales observations ci-après :

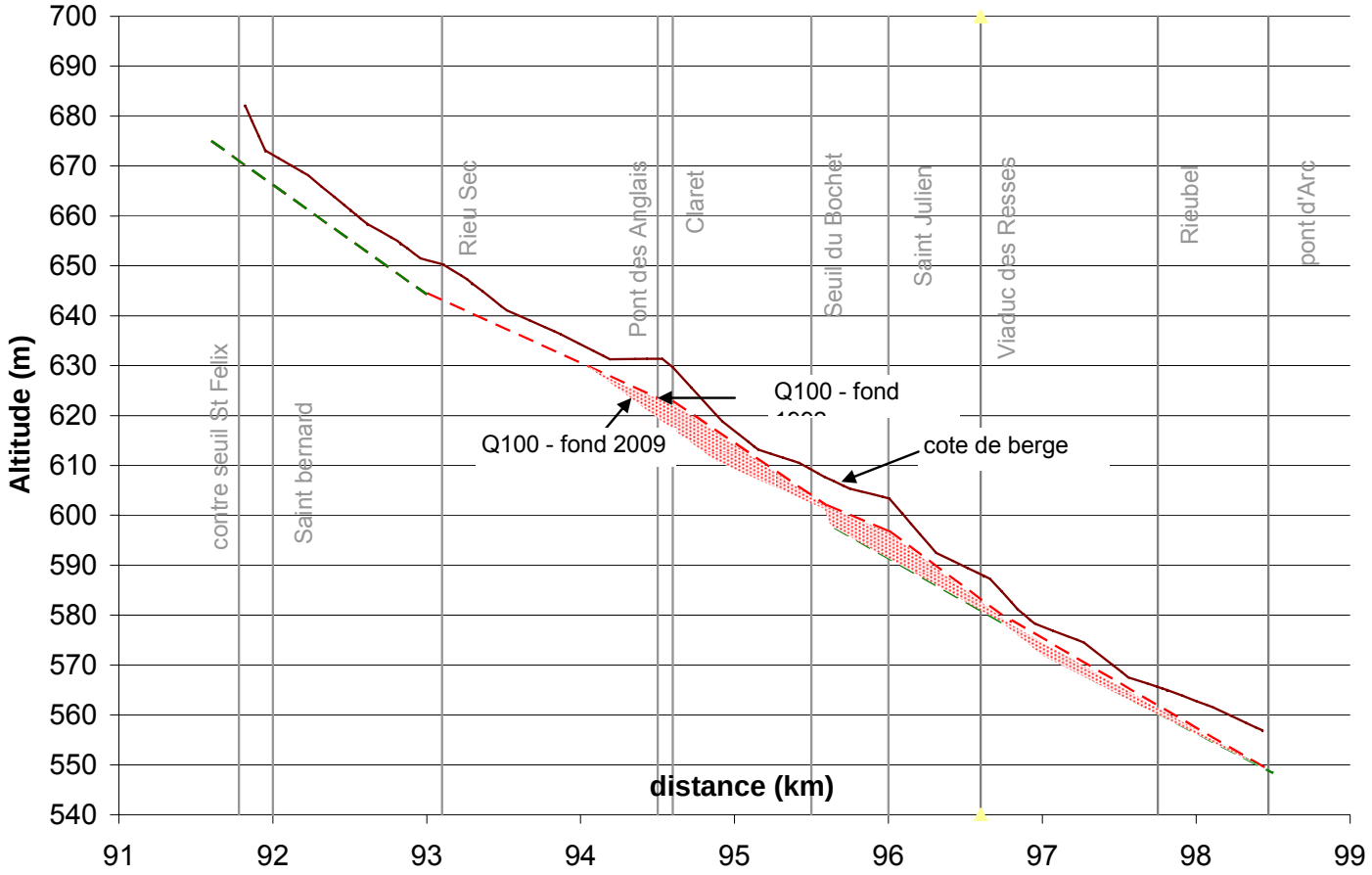
- Les pentes du lit en 1992 présentent une structure classique de lit torrentiel alimenté par des apports latéraux conséquents, avec des pentes de lit modérées en amont des

[2] Pk Modèle (PK modèle + PK Arc = 143.45)

confluences et des pentes plus élevées en aval pour permettre la reprise de la charge alluviale déposée par les affluents. Ces pentes sont respectivement de 1.4% en amont des affluents et supérieurs à 2% en aval.

- La pente du lit en amont du pont des Anglais n'a pas évolué de façon significative depuis 1992.
- Le secteur de confluence du Rieu Sec constitue un secteur d'engravement n'ayant pas évolué depuis 1992 (voir profil en long reporté en annexe). Deux raisons peuvent être avancées
  - Les apports solides du torrent continuent d'arriver jusqu'à l'Arc
  - Le pavage du lit sur ce secteur assure une protection efficace du lit et limite les possibilités d'incision du fond.
- Le secteur entre le pont des Anglais et le seuil du Bochet a subi de profondes évolutions dans la structure des pentes. La destruction du seuil a accentué l'incision du lit déjà observé avant la crue de 2008. On note ainsi trois fronts d'érosion régressive respectivement aux PK47.85 (seuil du Bochet), 48.6 (crassier Ferropem) et 49.3 situé 350 m en amont du pont des Anglais. Ces trois fronts correspondent à des linéaires de lit de 100 à 200 m à forte pente proche de 10%.

Profil en long du fond de l'Arc et évolution de la structure des pentes entre 1992 et 2009



4.2.2 Formulations du transport solide

Nous avons procédé au calcul de la capacité de charriage de l'Arc entre le barrage de Saint Martin la Porte et Pont d'Arc en considérant les deux formulations ci-après :

- **Formulation de Lefort.** Cette formulation a été calée sur de nombreuses données et appliquée par Philippe Lefort sur de nombreux cours d'eau en région Rhône-Alpes. Elle présente l'avantage de faire intervenir un nombre limité de paramètres, de couvrir une large gamme de pente, d'être relativement robuste. Elle est donnée ci-après.
  - débit de début d'entraînement des matériaux par charriage sur le fond :

$$Q_0 = 0{,}295.\sqrt{g.d_m^5}.i^{-13/6}.(1-1{,}2.i)^{8/3}$$

Avec :
***dm** : diamètre moyen des grains en pris égal au d70 (voir chapitre précèdent)*
***i** : pente du lit en m/m*
***g :** accélération de la pesanteur*

- volumes solides susceptibles d'être mobilisés:

$$\frac{Qs}{Q} = 4{,}45\left(\frac{d_{90}}{d_{30}}\right)^{0,2}\frac{i^{1,5}}{S-1}\left(1-\left(\frac{Q_0}{Q}\right)^{0,375}\right)$$

Avec :
Qs : débit solide en m3/s
Q : débit liquide en m3/s
S - 1 : densité apparente des matériaux
i : pente en m/m
d : diamètre des matériaux

- **Formulation de Meyer Peter.**

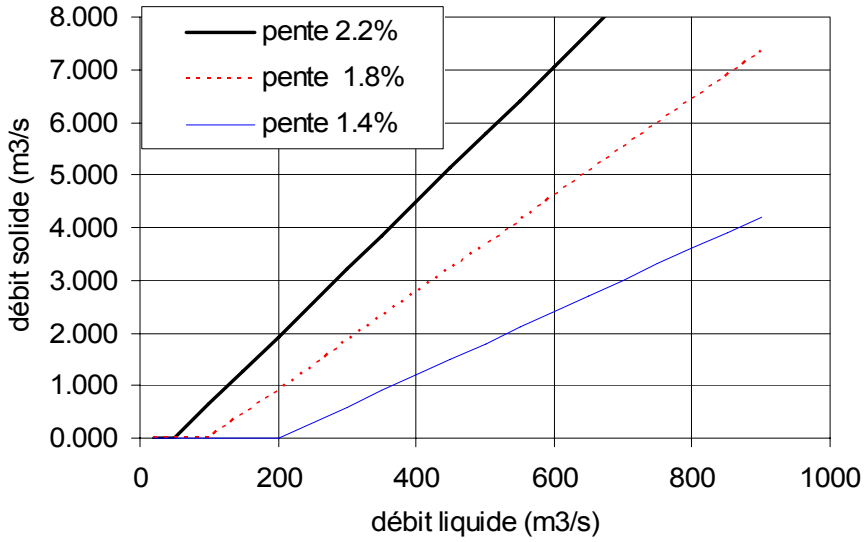
$$Q_s = 8.B\sqrt{\left((\frac{\gamma s-\gamma w}{\gamma w}).g.d_{50}^3\right)}.(\alpha.\sigma'-\sigma_c)^{3/2}$$

Avec :
Qs : débit solide en m3/s
γs : poids volumique des grains
γw : poids volumique de l'eau
B : largeur du lit actif
α : coeffiicient de correction
d_{50} : diamètre moyen des grains
g : accélération de la pesanteur
σ' : paramètre de Shield
σ_c : contrainte critique comprise entre 0.047 et 0.138

et :

- $\sigma' = \dfrac{Rh.i}{(\dfrac{\gamma s - \gamma w}{\gamma w})d_{50}}$
- $\alpha = \left(\dfrac{Kf}{K_{grain}}\right)^{3/2}$
- $K_{grain} = \dfrac{21}{\sqrt[6]{d_{50}}}$

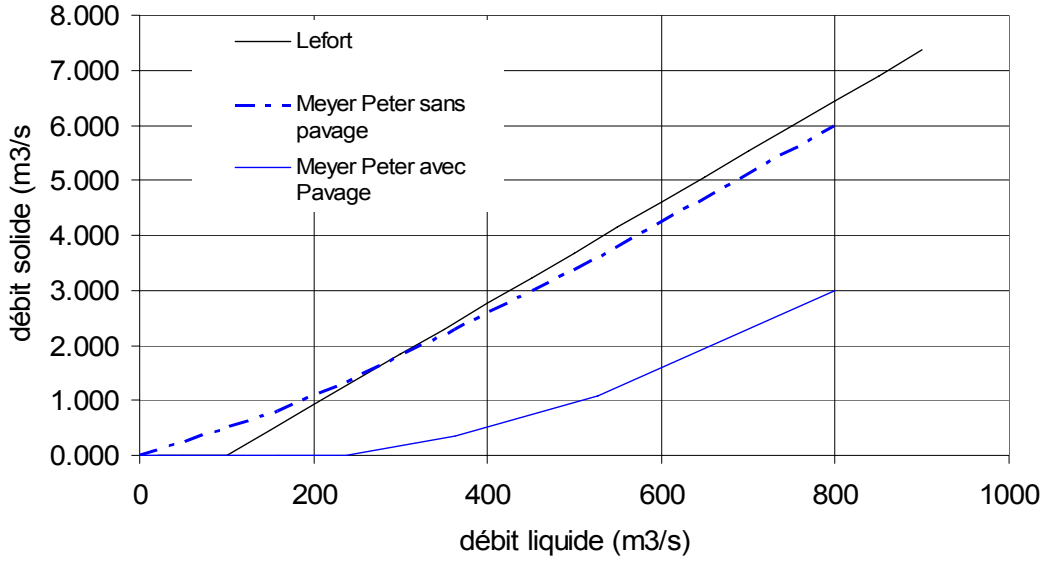
loi de transport solide pour différentes pentes du lit



Pour la formulation de Meyer Peter, Parker (1982) estime que pour les rivières à gravier à granulométrie étendue avec pavage du lit, la couche pavée est détruite et le mouvement des matériaux se produit lorsque σ_c >0.138 (au lieu de 0.047).

La figure ci-après décrit les lois de transport solide de Lefort et de Meyer Pete pour une pente moyenne de 1.8% et une granulométrie moyenne de l'Arc correspondant à celle observé en 1992.

Loi de transport solide- Fomulation de Meyer Peter et de Lefort



La figure met en évidence des résultats comparables entre la formulation de Meyer Peter et celle de Lefort. Par contre la formulation de Meyer Peter avec prise en compte du pavage conduit à une sous estimation du débit solide. En effet, la valeur de 0.138 conduit à un transport par charriage quasi nul pour un débit inférieur à 300 m3/s , ce qui n'est évidemment pas le cas sur l'Arc

On retiendra pour la suite des études la formulation de Lefort plus facile d'utilisation et sans doute plus robuste dans le cas présent que celle de Meyer Peter, compte tenu du nombre réduit de paramètres à prendre en compte.

On note que le débit de charriage dans l'Arc se produit pour un débit de l'ordre de 100 à 200 m3/s. Cette valeur rejoint les observations faites lors des chasses EDF.

4.2.3 Evolution de la capacité de charriage annuel

Avant toute chose, les valeurs indiquées ci-après sont à considérer comme des ordres de grandeur à prendre avec la plus grande prudence.

Elles donnent des indications sur les variations dans le temps et dans l'espace de la capacité de charriage de l'Arc et permettent d'évaluer les tendances à long terme de l'évolution de l'Arc.

Les calculs ont été réalisés pour les différentes situations ci-après :

- Lit de 1992 avec régime hydrologique naturel non influencé par les aménagements EDF.
- Lit de 1992 avec régime hydrologique influencé par les aménagements EDF du bassin supérieur.
- Lit de 1992 avec régime hydrologique actuel influencé par les aménagements EDF du bassin supérieur et la dérivation des débits au barrage de Saint Martin la Porte.
- Lit et régime hydrologique actuels (situation 2009)

Les valeurs indiquées dans les tableaux page suivante appellent les principaux commentaires ci-après :

- La capacité de charriage de l'Arc varie de façon importante d'un secteur à l'autre. Elle est très forte en aval des cônes de déjection des torrents affluents liée à la pente élevée de l'Arc (2.2%). Cette forte pente permet plus ou moins rapidement en fonction de l'hydraulicité de l'Arc, la reprise de la charge solide par les écoulements
- Cette forte variabilité de la capacité de charriage d'un secteur à l'autre explique le réajustement de l'Arc à chaque crue et les changements qui l'accompagnent de la morphologie de l'Arc.
- L'influence des aménagements EDF se fait très nettement sentir sur la capacité de charriage. On note dés la mise en service des aménagements EDF sur le bassin supérieur, une baisse très sensible du charriage lié à la rétention des débits de hautes eaux printannières dans les retenues d'altitude. Après la mise en service du barrage de Saint Martin la Place, la dérivation de la quasi totalité des débits entraine une diminution supplémentaire du charriage, de dernier ne se produisant que lors des crues de l'Arc dépassant 200 m3/s.
- Les évolutions constatées de la granulométrie des matériaux dans l'Arc (diminution de la fraction grossière des alluvions) entrainerait une augmentation de la capacité de charriage du torrent. On peut ainsi noter qu'entre le pont des Anglais et le viaduc des Resses, la capacité de charriage annuelle était sans doute de l'ordre de 5 000 m3 en 1992 (avec néanmoins de grandes variations en fonction des secteurs). Elle se situe sans doute actuellement autour de 20 000 m3/an. Cette valeur ne prend néanmoins pas en totalement compte l'effet des gros blocs qui sur certains secteurs limitent fortement les volumes de matériaux mis en mouvement.

On retiendra, de cette analyse, les principales conclusions ci-après :

- Capacité moyenne annuelle de transport par charriage en situation naturelle sans doute de l'ordre de 50 000 à 100 000 m3
- Baisse d'un facteur 10 à 15 de la capacité de charriage de l'Arc due aux aménagements EDF.
- Augmentation vraisemblable de la capacité de charriage entre 1992 et 2008 du fait de la disparition de la fraction grossière des matériaux dans l'Arc. Celle-ci peut être évaluée entre 15 000 à 20 000 m3/an en 2008.
- Pente moyenne de l'Arc égale à 1.8 % sur le secteur d'étude et sans doute proche d'une situation d'équilibre global du lit. En effet, en considérant un apport solide par charriage de 15 000 m3 de matériaux par les torrents affluents (voir §2.5.3) et un volume solide amont de l'ordre de 50 000 m3 (voir §2.6), les apports de matériaux rentrant dans le système seraient de 65 000 m3/an. Ils correspondent grosso modo à la capacité de charriage naturelle de l'Arc sur ce secteur avant les aménagements hydroélectriques.

Lit de l'Arc engravé – configuration 1993 – Capacités annuelles de transport par charriage – régime hydrologique naturel et influencé par les aménagements hydroélectriques.

N°	Tronçons	Pente (%)	d30 (mm)	d50 (mm)	d70 (mm)	d90 (mm)	avant 1970 (m3/an)	après 1970 sans dérivationEDF (m3)	après 1970 avec dérivation EDF (m3)
I	Bge St Martin - Rieu Sec	2.18	50	165	350	590	6 000	5 000	2 000
II	Rieu Sec - Claret	1.44	19	81	177	350	110 000	20 000	4 500
III	Claret - amont seuil Bochet	2.24	25	91	200	325	1 900 000(*)	80 0000(*)	20 000
IV	Amont seuil Bochet	1.40	70	155	230	475	3 000	2 000	1 000
V	Seuil Bochet - Saint Julien	1.56	17	58	151	460	1 000 000(*)	350 000	10 000
VI	Saint Julien - Viaduc Resses	2.32	17	58	151	460	6 500 000 (*)	550 0000(*)	60 000
VII	Viaduc Resses- Pont d'Arc	1.90	23	79	220	467	230 000	35 000	10 000
	Capacité de charriage avec paramètes moyens	**1.80**	**33**	**103**	**233**	**477**	**63 000**	**13 500**	**5 000**

(*) secteur à forte capacité de charriage et correspondant aux tronçons situés en aval des cônes de déjection du Claret et du Saint Julien. La valeur très forte est à considérer à beaucoup de prudence

Lit de l'Arc incisé – configuration 2009 – Capacités annuelles de transport par charriage - régime hydrologique influencé par les aménagements hydro électriques.

N°	Tronçons	Pente (%)	d30 (mm)	d50 (mm)	d70 (mm)	d90 (mm)	après 1970 avec dérivation EDF (m3)
I	Bge St Martin - Rieu Sec	2.20	65	100	250	500	8 000
II	Rieu Sec - Claret	1.44	30	80	150	260	6 000
III	Claret - amont seuil Bochet	2.20	30	80	150	260	35 000
IV	Amont seuil Bochet	1.40	30	80	150	260	6 000
V	Seuil Bochet - Viaduc des Resses	1.80	30	58	75	180	55 000
VI	aval Viaduc des Resses	2.54	30	58	75	180	115 000
VII	Viaduc Resses- Pont d'Arc	1.74	65	100	250	500	3 000
	Capacité de charriage avec paramètes moyens	**1.80**	**33**	**70**	**152**	**306**	**17 000**

4.2.4 Le transport par charriage durant les dernières crues

Nous avons procédé au calcul du volume de charriage pour les deux crues de 1993 et de 2008.

Les résultats sont indiqués ci-après

4.2.4.1 Crue de 1993

L'évolution par secteur des volumes de charriage est donnée dans le tableau ci-dessous.

N°	Tronçons	Pente (%)	d30 (mm)	d50 (mm)	d70 (mm)	d90 (mm)	volume solide crue de 1993 (m3)
I	Bge St Martin - Rieu Sec	2.18	50	165	350	590	55 000
II	Rieu Sec - Claret	1.44	19	81	177	350	90 000
III	Claret - amont seuil Bochet	2.24	25	91	200	325	22 500
IV	Amont seuil Bochet	1.40	70	155	230	475	22 000
V	Seuil Bochet - Saint Julien	1.56	17	58	151	460	155 000
VI	Saint Julien - Viaduc Resses	2.32	17	58	151	460	306 000
VII	Viaduc Resses- Pont d'Arc	1.90	23	79	220	467	145 000
	Capacité de charriage avec paramètes moyens	**1.80**	**33**	**103**	**233**	**477**	**116 000**

Ces valeurs mettent en évidence les principaux éléments ci-après :

- Le volume de charriage calculé en considérant les paramètres moyens (pente et granulomètrie) est d'environ 100 000 m3.
- Ce volumes est trois fois supérieur au volume de destockage sédimentaire estimée pour cette même crue (voir bilan sédimentaire réalisé dans le §4.3.2) et met sans doute en évidence l'effet du pavage par les gros blocs présents en grande quantité à cette période.(ces gros blocs (d>1m) constituant un pavage naturel du lit ne sont pas pris en compte dans la formulation du transport solide)

4.2.4.2 Crue de 2008

L'évolution par secteur des volumes de charriage est donnée dans le tableau ci-dessous.

N°	Tronçons	Pente (%)	d30 (mm)	d50 (mm)	d70 (mm)	d90 (mm)	volume solide crue de 2008 (m3)
I	Bge St Martin - Rieu Sec	2.20	65	100	250	500	350 000
II	Rieu Sec - Claret	1.44	30	80	150	260	250 000
III	Claret - amont seuil Bochet	2.20	30	80	150	260	750 000
IV	Amont seuil Bochet	1.40	30	80	150	260	250 000
V	Seuil Bochet - Viaduc des Resses	1.80	30	58	75	180	600 000
VI	aval Viaduc des Resses	2.54	30	58	75	180	1 000 000
VII	Viaduc Resses- Pont d'Arc	1.74	65	100	250	500	125 000
	Capacité de charriage avec paramètes moyens	**1.80**	**33**	**70**	**152**	**306**	**490 000**

Ces valeurs mettent en évidence les principaux éléments ci-après :

- Les volumes charriés sont quatre fois supérieurs à ceux de la crue de 1993
- Ils sont compris entre 125 000 et 600 000 m3 en fonction des secteurs. Le volume de charriage le plus important se situe entre le seuil du Bochet et le viaduc des Resses, secteur ou l'incision du lit a été la plus forte.
- La baisse sensible du volume de charriage en aval devrait se traduire par des dépôts de matériaux en aval du viaduc des Resses. L'analyse des profils en travers (voir § suivant) met au contraire en évidence un destockage alluvial sur ce secteur. Il convient cependant d'être prudent dans l'interprétation du bilan réalisé à partir de ces profils. En effet ces derniers ont été réalisés pratiquement 1 an après la crue et donc après les curages qui ont été réalisés dans le lit.

4.3 EVALUATION DU BILAN SEDIMENTAIRE DE L'ARC

4.3.1 Méthodologie

Un bilan sédimentaire dans l'Arc a été tenté par analyse comparative des profils réalisés avant et après la crue. Nous avons retenu les profils levés systématiquement aux mêmes stations afin d'avoir une évaluation la plus juste possible. le bilan volumique sur l'ensemble du secteur, est obtenu en multipliant les valeurs moyennes des bilans surfaciques calculés sur deux profils successifs par la distance les séparant mesuré le long de l'axe principal de la vallée, suivant la formule

$$V = \sum_{i=1}^{n} \left(l_i . (S_i + S_{i+1}) / 2 \right)$$

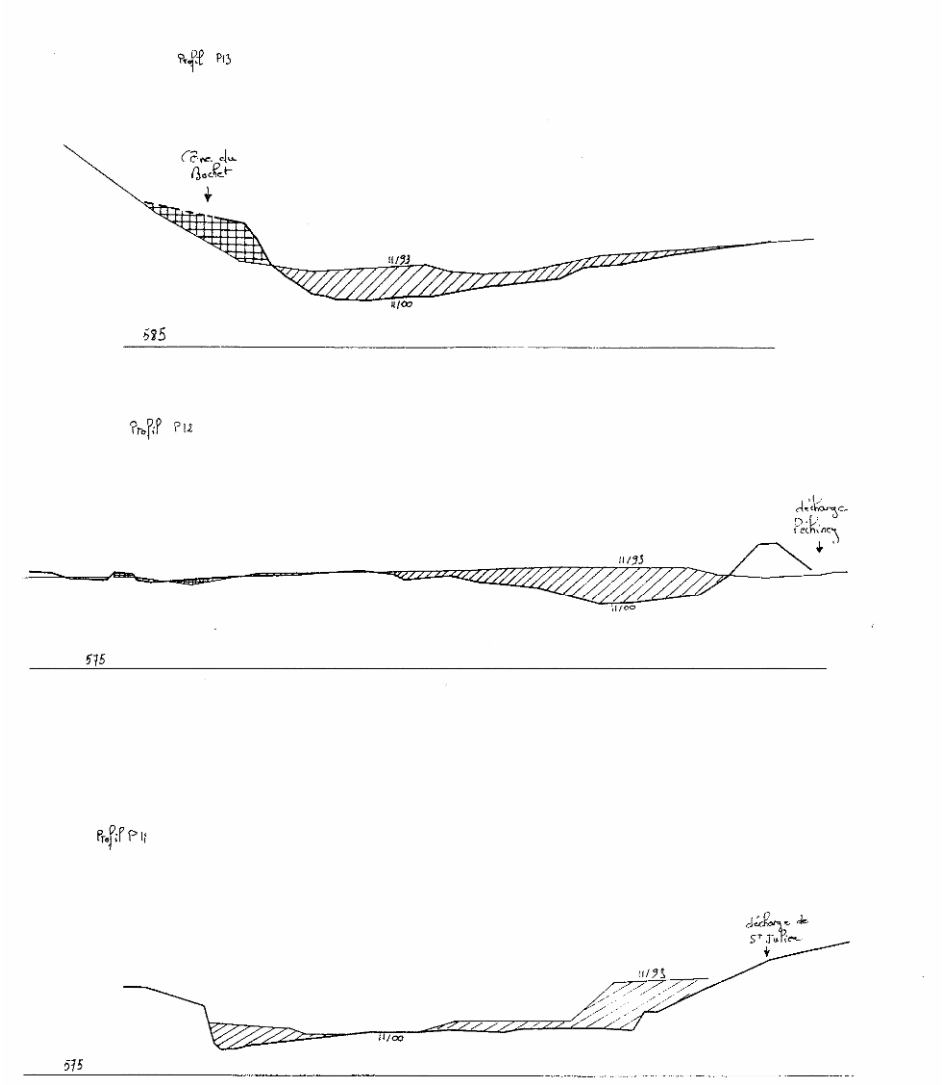
Avec :

- V : volume solide (m3)
- S_i : volume surfacique d'érosion ou de dépôt calculé sur la section i
- S_{i+1} : volume surfacique d'érosion ou de dépôt calculé sur la section i+1
- l_i : distance entre les deux profils i et i+1

Les principaux profils traités figurent en annexe du rapport.

Les figures ci-après illustrent la méthode mise en œuvre pour la crue d'octobre 2000 sur le secteur situé entre le torrent du Saint Julien et le Rieubel.

Bilan sédimentaire dans l'Arc entre fin1993/début 1994 et novembre 2000 – secteur Torrent du Saint julien – viaduc des Resses



4.3.2 Crue de 1993

La crue de 1993 a entrainé un « ramonage » du lit sans provoquer d'incision importante. On observe

- un déstockage sédimentaire du lit entre le barrage de Sait Martin la Porte jusqu'à l'ancien seuil du Bochet. Le volume de matériaux déstocké est estimé à environ 75 000 m3. Il correspond au « curage » par la crue des apports des affluents torrentiels (laves du Claret de 1987, Rieu Sec, laves du Saint Bernard de juillet 1993)
- Un dépôt de matériaux entre l'ancien seuil du Bochet et le viaduc des Resses de 40 000 m3 environ. Ces dépôts résultent essentiellement des érosions de berge (aval du seuil du Bochet et décharge de Saint Julien) et du sapement du cône du Bochet sur toute sa longueur.
- Un bilan neutre en aval du Viaduc RFF des Resses qui correspond néanmoins à un remaniement important du lit. On observe en effet après la crue des dépôts en grande quantité et des érosions de berges de rive droite et gauche. La rive gauche a par exemple été emportée à la hauteur du terrain de football d Villargondran et légèrement en aval sur une largeur de 50 à 100 m et une longueur de 500 m.

Globalement la quantité de matériaux réellement exportée en aval du secteur peut être estimée à environ 10 000 à 30 000 m3.

4.3.3 Crue de 2000

Entre la crue de septembre 1993 et la crue d'octobre 2000 on observe un déstockage alluvionnaire supérieur à 300 000 m3. Une tentative de décomposition des volumes de matériaux est donnée ci-après. Elle résulte de l'analyse de l'ensemble des profils en travers disponibles sur le secteur d'étude en particulier en aval du seuil du Bochet

Bilan sédimentaire de la crue d'octobre 2000

secteur	PK amont – PK aval	Volume estimé
Amont Pont des anglais	91.9 à 94.5	Les quelques données topographiques indiquent une tendance à la poursuite du desctokage
Pont de Anglais – Seuil du Bochet	94.5 à 95.5	Incision généralisée du lit sur ce secteur. Volume de destockage de l'ordre de 30 000 m3
Seuil du Bochet - Pont d'Arc	95.5 à 98.6	-50 000 à -100 000 m3

Sur le secteur compris entre le torrent du Bochet et Pont d'Arc, les nombreux profils existants permettent une analyse plus fine du bilan sédimentaire et de différentier ses différentes origines entre la crue elle-même et les extractions dans le lit.

Le bilan sédimentaire du secteur est donné ci-après.

Designation	Volume estimé (m3)
Curage lié au réaménagement de la décharge du Sirtomm et du confortement de la digue des Resses (1995-1997)	-60 000 à - 80 000
Extractions SFTRF : réalisation de la digue du ""trou à truite" – emprunt de Villargondran (1996-1997)	- 100 000 à – 150 000
extractions SCMS	- 50 000 (?)
apports latéraux entre 1993 et 2000 (Bochet, St Julien)	+ 20 000 à + 30 000
destockage alluvial durant la crue d'oct. 2000	**- 50 000 à - 100 000**
Bilan net	**-250 000 à -300 000**

Ces chiffres sont évidemment à prendre avec beaucoup de précautions. Néanmoins ils semblent montrer que la crue d'octobre 2000 a eu un fort pouvoir érosif, lié à sa durée relativement longue et aux faibles volumes d'apports solide provenant des torrents affluents (Saint Julien, Claret, Bochet, Rieubel).

4.3.4 Crue de 2008

Nous ne disposons pas des profils en travers sur tout le périmètre de l'étude, aussi n'est-il possible de ne procéder qu'à un bilan sur les deux secteurs ci-après :

- **Entre le Claret et l'ancien seuil du Bochet.** L'incision du lit sur ce secteur se traduit par un déstockage de prés de 100 000 m3 de matériaux. Cette valeur est à mettre en relation avec le volume de charriage nettement plus élevé calculé sur le même secteur.
- **Entre le torrent du Saint Julien et le Rieubel**. Le destockage alluvionnaire atteindrait environ 400 000 m3. Il convient de rappeler que ce secteur a fait l'objet de curage juste après la crue. Ils sont donc comptabilisés dans ce bilan.

4.3.5 Bilan sédimentaire entre 1993 et 2008

Le tableau ci-après récapitule le bilan sédimentaire réalisé pour les trois crues de 1993, 2000 et 2008.

Tronçon	1993	2000	2008 (*)
Bge St Martin - Claret	-50 000		-150 000
Claret - seuil Bochet	-25 000	-30 000	
seuil du Bochet - Saint Julien	5 000		
Saint Julien - Viaduc des resses	39 000	-100 000	-400 000
Viaduc Resses- Pont d'Arc	3 000		
total	**-28 000**	**-130 000**	**-550 000**

Capacité deCharriage - pente 1.8%	**116 000**	**300 000**	**490 000**

(*) volume englobant les curages post crue.

Les valeurs indiquées pour la crue de 2008 intègrent les volumes curées après la crue et sont donc difficilement comparables avec les autres chiffres. Néanmoins si l'on considère que ces curages représentent la moitié du volume global de déstockage (valeur sécuritaire qui est sans doute inférieure dans la réalité), ces valeurs mettent en évidence des volumes croissants de déstockage au fil des crues. En particulier pour les deux dernières qui présentent des similitudes hydrologiques fortes. Par ailleurs, il apparait que la capacité de charriage calculée en considérant les paramètres moyens de pente et de granulométrie sur le secteur d'étude, est nettement supérieure au déstockage observé.

Plusieurs raisons peuvent expliquer cet écart

- Les calculs de transport par charriage mettant en œuvre la formulation de Lefort ne prennent pas en compte l'effet des très gros blocs dans la tenue du lit. De ce fait la capacité de charriage peut être globalement surestimée.
- L'incertitude sur les volumes érodés en particulier sur les berges.

Le bilan global a été effectué entre 1992 (état du lit avant la crue de septembre 1993) et 2009 (après la crue de mai 2008) à partir des bilans intermédiaires de 1993, 2000 et 2009.

Il met en évidence un volume de destokage sédimentaire de l'Arc sur le périmètre d'étude supérieur à 600 000 m3. Ce volume se répartie comme suit :

Bilan sédimentaire de l'Arc entre 1992 et 2009 – secteur compris entre le torrent du Saint Bernard et Pont d'Arc

Tronçon	Bilan volumique (m3)
Bge St Martin - Claret	-50 000
Claret - seuil Bochet	-150 000
seuil du Bochet - Saint Julien	(+40 000)
Saint Julien - Viaduc des resses	-220 000
Viaduc Resses- Pont d'Arc	-220 000
aval Viaduc des Resses	
Viaduc Resses- Pont d'Arc	
total	**-600 000**

Ce volume destocké, réparti sur les 6500 m de linéaire de cours d'eau entre le torrent du Saint bernard et Pont d'Arc et sur une largeur active de 40 m, correspond à une incision moyenne du lit de 2.30 m.

4.4 CONSEQUENCE DE L'EVOLUTION DU TRANSPORT SOLIDE DE L'ARC SUR LES EVOLUTIONS FUTURES DU LIT

4.4.1 Evolution de la capacité de charriage annuelle

On retiendra, à partir de l'analyse réalisée au § 4.2.3, les résultats ci-après :

- Capacité de charriage annuelle passant de 65 000 m3/an avant les aménagements EDF à environ 15 000 m3/an actuellement (situation après mise en service du barrage de Saint Martin la Porte).
- Volumes de charriage potentiel durant les fortes crues inchangés du fait de la transparence des barrages pour les forts débits. Ces volumes sont estimés dans le tableau ci-après en retenant deux hypothèses de granulométrie de l'Arc (1992 et 2009) et la pente générale de l'Arc égale à 1.8 %
-

	V 10 ans (m3)	V 50 ans (m3)	V 100 ans (m3)	Vol annuel (m3) *
Hypothèse basse	50 000	236 000	325 000	5 000
Hypothèse haute	110 000	303 000	390 000	17 000

(*) valeur intégrant l'ensemble des crues de période de retour inférieure à 100 ans.

4.4.2 Evolution des apports solides à l'Arc

Les apports solides à l'Arc ont diminué progressivement. Les causes principales sont :

- Les aménagements de correction torrentielle réalisés sur les bassins de réception. On retiendra en particulier les aménagements réalisés dans le bassin versant du Saint Julien (création d'un tunnel de dérivation au droit du glissement de Montdenis et des barrages de stabilisation du lit en aval), du Saint Bernard et du Claret (réalisation de barrages et seuils de stabilisation du lit). Ces aménagements ont réduit l'apport de gros blocs dans l'Arc.
- Les plages de dépôts réalisés entre 1987 et 1995. Elles ont pour conséquence de supprimer la quasi-totalité des blocs arrivant autrefois dans l'Arc. On pouvait estimer cette quantité à environ 5000 m3/an (voir §2.5.3)
- Les curages mécaniques réalisés entre deux chasses de dégravement dans la retenue de Saint Martin la Porte.

Le tableau ci-après précise les évolutions probables des apports solides.

		Apport amont	St Bernard-Rieu Sec	Claret	Saint Julien - Bochet	Rieubel
(1)	Vol (m3)	50 000	5 500	3 500	2 800	1500
	Vol cumulé (m3)	50 000	55 500	59 000	61 800	63 300
(2)	Vol (m3)	25 000 (*)	1500 (*)	-	1800(*)	750 (*)
	Vol cumulé (m3)	25 000	26 500	26 500	28 300	29 000

(1) situation naturelle

(2) situation actuelle

(*) Hypothèses prises : stockage total dans les plages de dépôt du Saint Bernard et du Claret et de 50% dans celles du Saint Julien et du Rieubel. Volume restant piégé dans la retenue estimé à 50% des apports annuels amont.

Les valeurs du tableau mettent en évidence une diminution probable d'un facteur 2 des apports solides à l'Arc. Ces derniers représenteraient actuellement un volume annuel de l'ordre de 30 000m3.

4.4.3 Conséquence sur l'évolution du profil en long de l'Arc

Pour permettre de transiter ce volume de 30 000 m3 de matériaux, la pente d'équilibre de l'Arc devrait être de 2.3 % en considérant la granulométrie moyenne des matériaux relevée en 2009 et l'hydrologie influencé par les aménagements EDF. En fait on observe actuellement le contraire, c'est-à-dire une baisse sensible de la pente du lit liée à son incision. Cela traduit essentiellement l'effet conjugué des fortes crues qui se sont succédé depuis 1993 et des extractions de matériaux.

En faisant l'hypothèse d'un arrêt total des extractions, et d'un apport solide annuel de 30 000 m3 environ, le lit de l'Arc devrait progressivement retrouver une pente moyenne de l'ordre de 2.3% et donc se ré engraver progressivement.

Dans la réalité, si les crues répétées de l'Arc observées durant les 15 dernières années se poursuivent, la recharge alluviale théoriquement apportée par les affluents ne permettra pas de compenser l'effet de « pilonnage » du fond qu'elles provoquent.

Les risques d'évolution à court et moyen terme sont donc une poursuite de l'enfoncement du lit avec progression vers l'amont des fronts d'érosion observés.

Le tableau ci-après récapitule les évolutions probables du lit pour le long terme et pour le court terme

Synthèse des évolutions futures du lit de l'Arc entre le barrage de Saint Martin et Pont d'Arc

Secteur	Evolution à long terme (> 50 ans)	Evolution à court terme (10-50 ans)
Bge St Martin la Porte Rieu Sec	Engravement très progressif du lit (apport du Rieu Sec)	Respiration liée aux apports du Rieu Sec. Incisions locales néanmoins possibles
Rieu Sec Pont des Anglais	Stabilité du lit (pavage encore existant)	Début d'incision du lit pouvant progresser plus ou moins rapidement vers l'amont en fonction des crues.
Pont des Anglais- seuil du Bochet	Retour très progressif vers un équilibre avec rechargement alluvial du lit en aval du Claret	Forte incision avec risque réel de la poursuite du phénomène par progression vers l'amont des fronts d'érosion régressive
Seuil du Bochet – Viaduc des Resses	Retour vers une situation d'équilibre correspondant à une respiration naturelle du lit liés aux apports du Saint Julien et du Bochet	Recharge possible du lit en cas d'activité torrentielle du Bochet et du Saint Julien.
Viaduc des Resses- Pont d'Arc	Engravement très progressif du lit sans pour autant revenir vers le style en tresse antérieur	Si arrêt total des extractions, stabilité du profil en long.

5 ANALYSE DES CONDITIONS D'ECOULEMENT DES CRUES

5.1 MODELISATION MATHEMATIQUE DES ECOULEMENTS

5.1.1 Logiciel utilisé

La simulation des écoulements de crue de l'Arc repose sur la mise en œuvre d'un modèle mathématique unidimensionnel des écoulements en régime permanent.

Le modèle utilisé est le code HYDRARIV développé par Hydratec, qui permet de résoudre les équations complètes de l'hydraulique à surface libre (équations de Barré de Saint Venant). Nous avons utilisé une modélisation filaire, structuré en biefs parcourus longitudinalement par des écoulements suivant une direction privilégiée.

5.1.2 Données topographiques

Pour construire le modèle de simulation des crues, Hydratec s'est appuyé sur :

- les profils en travers de l'arc (lit mineur et lit majeur) levés par un géomètre en novembre 1992
- les profils en travers de l'arc levés par un géomètre en avril 2009.

5.1.3 Structure générale du modèle

Le modèle s'étend de l'aval du barrage de Saint-Martin-la Porte au droit de Pont d'Arc, soit sur 6.5 kilomètres environ.

Il simule deux états différents du lit de l'Arc :

- l'état 1992 correspondant au fond du lit avant le passage de la crue de septembre 1993
- l'état 2009 correspondant au fond du lit après le passage de la crue de mai 2009

5.2 SIMULATION DES DIFFERENTS ETATS DU LIT

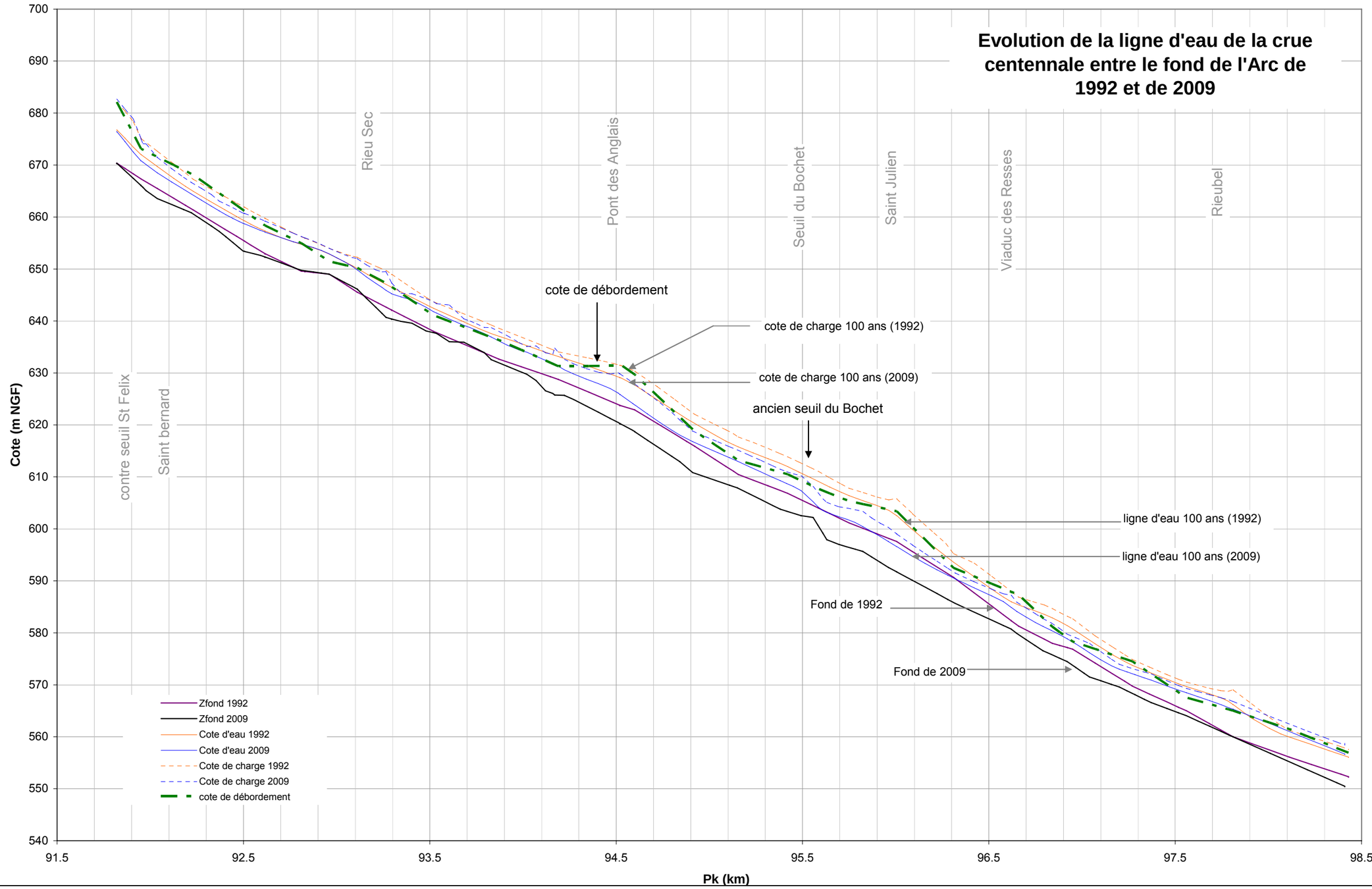
L'objet des simulations réalisées porte sur la caractérisation de l'évolution de la ligne d'eau entre l'état de 1992 et celui de 2009 et le calcul des paramètres rentrant dans la formulation de transport solide de Meyer Peter (voir §4).

Les simulations ont été réalisées pour 3 débits de crues différents : crue décennale, crue cinquantennale et crue centennale. Les listings de résultats sont joints en annexe.

Les principales caractéristiques de l'Arc en crue centennale pour les deux états du lit sont les suivantes :

Pk (km)	Fond de 1992				Fond de 2009			
	Cote de fond (m NGF)	Z100 (m NGF)	H100 (m NGF)	V100 (m/s)	Cote de fond (m NGF)	Z100 (m NGF)	H100 (m NGF)	V100 (m/s)
91.82	670.37	676.77	682.09	9.33	670.35	676.45	682.71	10.12
91.92	668.05	673.05	677.42	8.45	667.05	672.02	678.43	10.23
92.02	665.86	670.19	673.15	6.96	664.01	668.96	672.22	7.30
92.12	663.73	667.60	670.38	6.74	662.32	666.62	669.17	6.45
92.22	661.58	665.17	667.55	6.23	660.82	664.43	666.64	6.01
92.32	659.41	663.06	665.49	6.31	658.44	662.25	664.49	6.05
92.42	657.22	660.98	663.55	6.48	655.76	660.18	662.19	5.74
92.52	655.03	658.99	661.59	6.53	653.26	658.48	660.51	5.76
92.619	652.87	657.25	659.67	6.29	652.25	657.04	659.15	5.87
92.719	651.14	655.81	657.73	5.61	650.94	655.80	657.60	5.42
92.819	649.54	654.63	656.06	4.85	649.70	654.72	656.11	4.78
92.919	649.16	653.50	654.60	4.24	649.20	653.54	654.66	4.28
93.019	647.62	651.78	653.18	4.78	647.85	651.80	653.07	4.55
93.119	645.35	649.90	652.07	5.96	645.79	649.59	651.75	5.95
93.219	643.49	647.89	650.36	6.35	642.27	647.01	649.59	6.49
93.319	641.65	646.03	648.37	6.18	640.15	644.92	645.61	3.35
93.419	639.82	644.24	645.95	5.29	639.25	643.74	644.94	4.42
93.519	638.00	642.44	643.68	4.50	637.74	641.78	643.70	5.61
93.619	636.47	640.83	642.25	4.83	635.98	640.13	642.83	6.64
93.719	634.95	639.22	640.83	5.13	635.22	638.65	639.91	4.53
93.819	633.42	637.70	639.36	5.20	632.91	637.10	638.71	5.14
93.919	632.04	636.47	637.90	4.83	631.23	635.28	637.08	5.42
94.019	630.83	635.26	636.48	4.46	629.75	634.00	635.08	4.20
94.119	629.61	634.00	634.97	4.00	626.58	632.42	633.87	4.88
94.219	628.31	632.81	634.05	4.50	625.68	630.66	632.70	5.79
94.319	626.80	631.65	633.12	4.90	624.00	629.10	631.09	5.70
94.419	625.29	630.42	632.35	5.62	622.16	627.71	630.04	6.17
94.519	623.78	629.12	631.48	6.22	620.29	625.90	629.81	8.00
94.619	622.45	627.19	629.83	6.57	618.22	623.34	627.34	8.09
94.719	620.27	624.84	627.35	6.41	615.84	620.83	624.68	7.93
94.819	618.11	622.53	624.72	5.98	613.44	618.51	621.68	7.19
94.919	615.93	620.32	622.05	5.33	610.71	616.62	618.65	5.77
95.019	613.60	618.26	620.25	5.70	609.48	615.06	617.12	5.80
95.119	611.29	616.34	618.48	5.91	608.25	613.52	615.62	5.87
95.219	609.58	614.84	616.83	5.71	606.63	611.88	614.06	5.97
95.319	608.21	613.44	615.38	5.63	604.86	610.25	612.46	6.02
95.419	606.83	611.97	613.87	5.58	603.34	608.66	610.94	6.11
95.519	605.11	610.25	612.16	5.60	602.39	606.44	609.36	6.91
95.619	603.39	608.49	610.34	5.50	598.50	603.36	605.42	5.81
95.719	601.67	606.85	608.38	5.01	596.73	602.05	604.11	5.80

Pk (km)	Fond de 1992				Fond de 2009			
	Cote de fond (m NGF)	Z100 (m NGF)	H100 (m NGF)	V100 (m/s)	Cote de fond (m NGF)	Z100 (m NGF)	H100 (m NGF)	V100 (m/s)
95.819	600.16	605.46	607.02	5.05	595.69	600.51	603.39	6.86
95.919	598.75	604.18	605.94	5.36	593.50	598.45	601.03	6.49
96.019	597.21	602.10	605.28	7.22	591.44	596.29	598.63	6.19
96.119	594.96	598.97	601.93	6.96	589.51	594.14	596.15	5.74
96.219	592.71	596.11	598.75	6.58	587.58	592.14	593.80	5.20
96.319	590.40	593.35	595.06	5.29	585.64	590.38	591.49	4.25
96.419	587.71	590.81	593.42	6.53	584.00	588.66	589.82	4.37
96.519	585.03	588.28	590.73	6.34	582.36	587.02	588.32	4.61
96.619	582.33	585.96	587.96	5.72	580.71	584.88	587.24	6.21
96.719	580.17	584.59	586.19	5.10	578.21	582.61	584.32	5.30
96.819	578.36	583.19	585.00	5.44	576.06	580.72	582.17	4.87
96.919	577.16	581.40	583.19	5.42	574.47	578.84	579.74	3.83
97.019	575.29	579.07	580.77	5.29	572.00	576.64	578.17	5.01
97.119	573.08	576.75	578.27	4.98	570.53	574.40	575.66	4.53
97.219	570.85	574.64	575.99	4.69	569.21	572.74	573.69	3.93
97.319	568.92	572.99	574.07	4.20	567.45	571.51	572.58	4.17
97.419	567.28	571.56	572.51	3.94	565.91	570.23	571.31	4.21
97.519	565.64	570.16	571.02	3.77	564.58	568.93	569.83	3.84
97.619	563.79	568.99	569.94	3.94	563.06	567.75	568.71	3.96
97.719	561.80	567.81	569.05	4.50	561.44	566.48	567.74	4.53
97.819	559.87	565.96	568.75	6.75	559.82	565.17	566.63	4.90
97.919	558.57	563.37	566.08	6.65	558.23	563.77	565.19	4.81
98.019	557.27	561.35	563.35	5.71	556.65	562.37	563.74	4.74
98.119	555.98	559.83	561.14	4.61	555.06	560.90	562.34	4.85
98.219	554.79	558.63	560.04	4.80	553.48	559.44	560.95	4.97
98.319	553.61	557.40	558.91	4.96	551.90	558.00	559.60	5.13
98.419	552.42	556.20	557.70	4.96	550.47	556.67	558.42	5.34


Evolution de la ligne d'eau de la crue centennale entre le fond de l'Arc de 1992 et de 2009
Cote (m NGF)
Pk (km)
Rieu Sec
Pont des Anglais
Seuil du Bochet
Saint Julien
Viaduc des Resses
Rieubel
contre seuil St Felix
Saint bernard
cote de débordement
cote de charge 100 ans (1992)
cote de charge 100 ans (2009)
ancien seuil du Bochet
ligne d'eau 100 ans (1992)
ligne d'eau 100 ans (2009)
Fond de 1992
Fond de 2009
Zfond 1992
Zfond 2009
Cote d'eau 1992
Cote d'eau 2009
Cote de charge 1992
Cote de charge 2009
cote de débordement

L'analyse des résultats des simulations met en évidence :

- Un abaissement de la ligne d'eau généralisé sur l'ensemble du secteur. Ce phénomène est dû à la forte incision du lit de l'Arc entre 1992 et 2009 suite aux crues d'octobre 2000 et mai 2008.
- Ce phénomène d'abaissement de la ligne d'eau concerne en particulier le secteur entre le pont des Anglais (pk=94.5) et le secteur du Rieubel (Pk=97.75). Le lit en amont du Pont des Anglais ayant subi une moins forte incision, principalement grâce à la présence de gros blocs assurant une certaine tenue du lit, l'abaissement des lignes d'eau reste inférieur à 1 m. Entre le Pont des Anglais et l'ancien seuil du Bochet (Pk=95.5) la ligne d'eau a subi un abaissement de l'ordre de 3,5 m, pouvant atteindre à certains endroits 4 m. Le secteur en aval du seuil du Bochet et en amont du viaduc des Resses (Pk=96.6) est celui où la ligne d'eau s'est le plus affaissée : en moyenne 4 m en-dessous jusqu'à 6 m en aval immédiat du seuil. Le secteur en aval du viaduc des Resses, siège d'une zone de régulation du transport solide est sujet à une moins forte incision du lit et par conséquence un abaissement moins important de la ligne d'eau (- 2 m environ).
- Sur certains secteurs, la ligne d'eau de la crue centennale avec le fond de l'Arc de 2009 se retrouve quasiment au même niveau que le fond du lit de 1992. C'est effectivement le cas sur le secteur entre le Pont des Anglais et l'ancien du Bochet, ainsi qu'en amont du Viaduc des Resses.

5.3 IMPACTS DES APPORTS SOLIDES DES AFFLUENTS

Afin d'évaluer la sensibilité des lignes d'eau suite à une exondation du fond du lit de l'Arc par les torrents, des apports torrentiels correspondants à une période de retour de 100 ans ont été simulés en modifiant la géométrie du lit de l'Arc dans le modèle correspondant à l'état 2009.

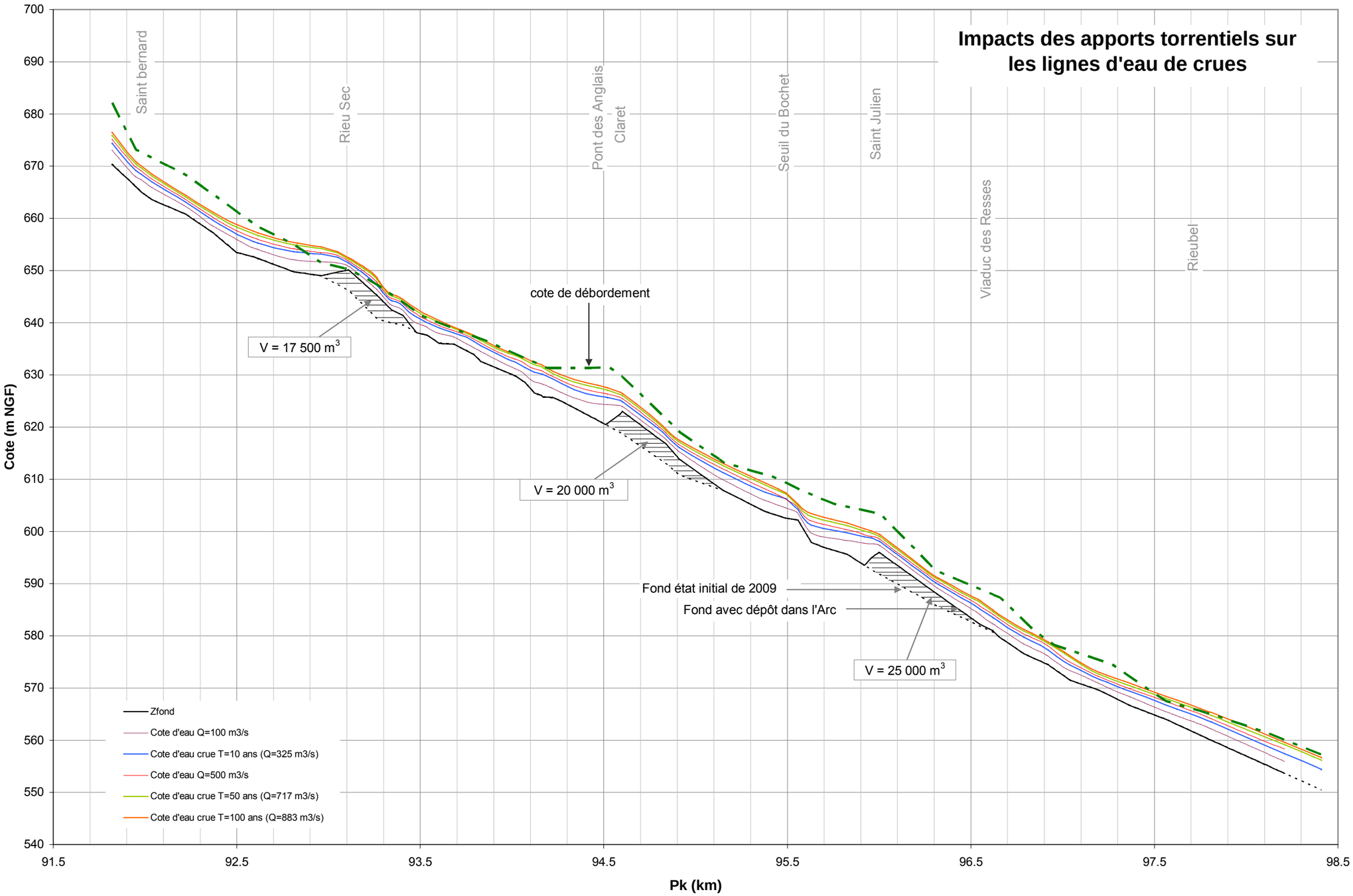
Nous faisons l'hypothèse que seule la moitié des volumes des apports torrentiels encombre le lit de l'Arc, l'autre moitié étant charriée par l'arc.

Les volumes stockés dans l'Arc retenus sont:

- Pour le Rieu Sec : 17 500 m^3
- Pour le Claret : 20 000 m^3
- Pour le Saint Julien et le Bochet : 25 000 m^3

Un scenario "catastrophe" a été réalisé en considérant la concomitance des coulées de laves torrentielles exceptionnelles. Plusieurs débits de crue ont été simulés : 100 m^3/s et 500 m^3/s, ainsi que les crues de période de retour 10 ans, 50 ans, 100 ans.

Les résultats des simulations sont présentés sur le profil en long suivant:


Impacts des apports torrentiels sur les lignes d'eau de crues
Saint bernard
Rieu Sec
Pont des Anglais
Claret
Seuil du Bochet
Saint Julien
Viaduc des Resses
Rieubel
cote de débordement
V = 17 500 m3
V = 20 000 m3
Fond état initial de 2009
Fond avec dépôt dans l'Arc
V = 25 000 m3
Zfond
Cote d'eau Q=100 m3/s
Cote d'eau crue T=10 ans (Q=325 m3/s)
Cote d'eau Q=500 m3/s
Cote d'eau crue T=50 ans (Q=717 m3/s)
Cote d'eau crue T=100 ans (Q=883 m3/s)
Cote (m NGF)
700
690
680
670
660
650
640
630
620
610
600
590
580
570
560
550
540
91.5
92.5
93.5
94.5
95.5
96.5
97.5
98.5
Pk (km)

La surélévation de la ligne d'eau au droit de chaque torrent (Rieu Sec, Claret et St-Julien – Bochet) se répercute jusqu'à 400 m en amont environ.

Les dépôts provoquant un abaissement de la pente hydraulique, les vitesses d'écoulement sont plus faibles en amont des torrents.

Dès 100 m^3/s, on a des débordements notamment au droit du Rieu Sec. Les débordements sont plus importants en aval du Rieu Sec à partir de l'évènement d'occurrence cinquantennale. La ligne d'eau pour un débit de l'ordre de 325 m^3/s correspondant à un évènement d'occurrence 10 ans, est parfois supérieure (environ 1 m) à la ligne d'eau centennale sans les dépôts.

Etude réalisée avec la participation financière de











