

---

# SIVU de la Rivière des Galets

**ILE DE LA REUNION**

**RIVIERE DES GALETS**

**ETUDE MORPHOLOGIQUE**



Vue aérienne de la Rivière des Galets Cyclone Gamède 2007 photo DDE



Compagnie Nationale du Rhône

**Compagnie Nationale du Rhône**

Département Laboratoire d'essais Mesures – Contrôles

4, rue Chalon sur Saône 69007 LYON - France

Tél.33(0)4 78 61 60 00 - Fax : 33(0)4 78 58 69 38

cnr.laboratoire@cnr.tm.fr – [www.cnr.tm.fr](http://www.cnr.tm.fr)

**Juillet 2007**

00131.001-DPFI-PF

Labo-248.07.doc

## ETUDE MORPHOLOGIQUE DE LA RIVIERE DES GALETS

Client	Nom : SIVU de la rivière des Galets Adresse : SIVU de la rivière des Galets BP 2004 97420 le Port Cedex
Interlocuteur	Christian Séraphine Chef des Services Techniques du Port, pour le SIVU
Références du contrat	Lettre n°2 DT-CS/NL n°06113418 du 3/1/2007

Unité réalisatrice	Compagnie Nationale du Rhône Direction de la production pôle fluvial-Laboratoire CNR DPFI-PFLabo Port Édouard Herriot 4 Rue de Chalon sur Saône 69007 Lyon
Référence du rapport	00131.001-DPFI-PF Labo-248.07.doc
date	Juillet 2007
Rapport	<input type="checkbox"/> provisoire <span style="float: right;"><input type="checkbox"/> définitif</span>

### Contrôle qualité :

	Nom	Date	Signature
Réalisé par	S. REYNAUD		
Vérifié par	F FRUCHART		
Approuvé par	M SCOTTI		

### Historique du document :

Indice	Date	Désignation de la révision

### Annexes

N°	Désignation

# SOMMAIRE

<b>1</b>	<b>SYNTHESE .....</b>	<b>5</b>
1.1	Rappel des faits.....	5
1.2	Conclusion de l'étude .....	6
1.2.1	Une constatation: un enfoncement anormal du lit de la RdG: .....	6
1.2.2	Causes de l'enfoncement du lit.....	9
1.2.3	Evolution morphologique - Conséquences pour les ouvrages .....	12
1.2.4	Recommandations.....	18
1.2.5	Aspect surveillance - prévision .....	19
1.2.6	Aspect sécurité.....	20
<b>2</b>	<b>HISTORIQUE ET BUT DE L'ETUDE .....</b>	<b>21</b>
<b>3</b>	<b>DESCRIPTION DES OUVRAGES DE PROTECTION.....</b>	<b>25</b>
3.1	Les ouvrages de protection.....	25
3.2	Epis.....	26
3.3	Protection de la digue du piton BATARD.....	29
3.4	Endiguement aval .....	29
3.5	Epaulement de sécurité .....	31
<b>4</b>	<b>DESORDRES OBSERVES SUR LES OUVRAGES.....</b>	<b>32</b>
<b>5</b>	<b>GENERALITES RIVIERES TORRENTIELLES REUNIONAISES.....</b>	<b>37</b>
5.1	Comportement morphologique de la rivière.....	37
5.1.1	Crue faible (Q2).....	37
5.1.2	Crue moyenne (Q10).....	39
5.1.3	Crue très forte (Q100).....	41
5.1.4	Synthèse .....	42
5.2	Equilibre morphologique .....	42
5.3	Effet des extractions de matériaux.....	43
<b>6</b>	<b>DONNEES DE BASE .....</b>	<b>44</b>
6.1	Visites de terrain .....	44
6.2	Analyse bibliographique .....	44
6.2.1	Apports solides du bassin versant.....	44
6.2.2	Données générales concernant la RdG.....	45

6.2.3	Impact de l'aménagement sur le littoral [20] .....	55
6.2.4	Prélèvements de matériaux .....	56
6.2.5	Evolution des fonds de la RdG entre 1966 et 1996 [41].....	58
6.3	Photos aériennes .....	58
6.4	Pluviométrie.....	59
6.5	Hydrologie.....	60
<b>7</b>	<b>LES RESULTATS DES MODELES PHYSIQUES REALISES .....</b>	<b>61</b>
7.1	Modèle physique Sogreah de 1968.....	61
7.2	Modèle physique Sogreah de 1986/1987 .....	62
7.2.1	Phase I : Réglage et étalonnage du modèle [12].....	62
7.2.2	Phase II : Impact des aménagements sur la morphologie [13] ....	64
7.2.3	Phase III : étude de différents type d'ouvrages.....	69
7.2.4	Phase IV : Phasage de construction de l'ouvrage[22].....	75
7.3	Modèle physique CNR de 1994[37] .....	78
<b>8</b>	<b>EVOLUTION MORPHOLOGIQUE DE LA RDG .....</b>	<b>83</b>
8.1	Evolution morphologique de la RdG entre 1996 et 2006 .....	83
8.2	Evolution morphologique due au Cyclone Gamède (fév 2007) .....	89
8.3	Bilan global.....	89
8.4	Causes de l'enfoncement du lit.....	91
<b>9</b>	<b>CONSEQUENCES POUR LES OUVRAGES.....</b>	<b>97</b>
<b>10</b>	<b>RECOMMANDATIONS.....</b>	<b>103</b>
<b>11</b>	<b>ASPECT SURVEILLANCE - PREVISION.....</b>	<b>106</b>
<b>12</b>	<b>ASPECT SECURITE .....</b>	<b>107</b>

La présente notice est associée à un dossier d'annexes et un plan.

# 1 SYNTHÈSE

## 1.1 Rappel des faits

Les ouvrages de protection contre les crues de la Rivière des Galets (appelé RdG par la suite) se composent à l'aval d'un endiguement mis en service en 1995, à l'amont de 9 épis en rive droite, mis en service en deux tranches, en 1995 et 2000.



Le Sivu de la RdG (Syndicat intercommunal - communes du Port et de Saint Paul) est propriétaire des ouvrages.

La partie endiguée a été l'objet de dégâts causés par les crues dans les dernières années, ayant nécessité des travaux de confortement en 2003 puis en 2006. De nouveau en 2007 pendant le cyclone Gamède, la digue rive droite entre les épis 4 et 5 s'est affaissée ainsi qu'un tronçon de l'endiguement à l'aval de l'axe mixte en rive gauche, comme le montrent les photos suivantes. Ces dégâts en cours de réparation.



Les dégâts semblent se multiplier depuis quelques années, pourtant les ouvrages sont assez récents et les débits de crue sont restés modestes depuis leur mise en service : depuis 1995, le débit maximum a été de 1300m<sup>3</sup>/s (crue quinquennale) en mars 2006 avec des ouvrages dimensionnés pour 3000m<sup>3</sup>/s.

Les dégâts observés restent pour le moment relativement modérés et n'ont pas générés de risques pour les riverains. Le maître d'ouvrage s'inquiète cependant de la fréquence des désordres observés et du coût des réparations. Il souhaite connaître les causes des désordres et savoir si cette situation va perdurer, s'améliorer ou empirer.

La présente étude analyse et explique les modifications morphologiques observées de la RdG depuis la mise en service des ouvrages, détermine les causes de dégâts observés et propose des solutions pour éviter une aggravation des problèmes.

Cette étude s'appuie sur une analyse :

- de la bibliographie de 49 rapports d'étude, élaborés depuis la conception des ouvrages jusqu'à aujourd'hui,
- de l'expérience d'entretien et de surveillance des ouvrages de la RdG Galets, réalisés par la DDE service SEECL avec l'appui de la CNR.

## **1.2 Conclusion de l'étude**

---

### ***1.2.1 Une constatation: un enfoncement anomal du lit de la RdG:***

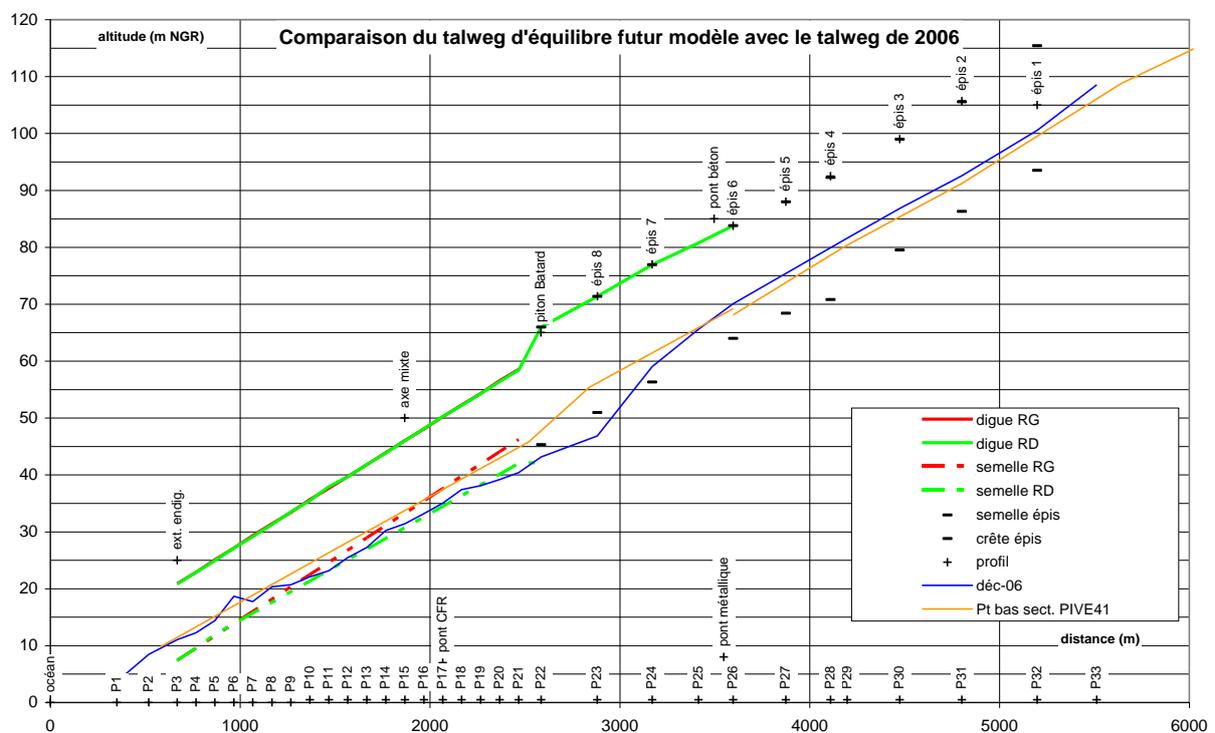
Le lit de la RdG s'est notablement enfoncé depuis la mise en service des ouvrages, ce qui est manifestement la cause des dégâts observés.

Cet enfoncement conduit des attaques en pied des fondations des ouvrages (endiguement, épis et piles des ponts) par les bras de la RdG en crue, sous-cavant les fondations, qui est le type d'attaque hydraulique connue pour être la plus dangereuse.

L'enfoncement du lit s'effectue par un processus classique d'érosion régressive, c'est à dire qui se développe depuis la partie aval de la rivière et progresse vers l'amont au gré des crues.

L'étude a mis en évidence les évolutions des fonds au cours du temps au gré ses cyclones en fonction des différents relevés topographiques effectués. La comparaison finale entre les fonds prévus par les études et les fonds constatés en 2006, est donnée par le graphique suivant :

- fond prévu par le modèle physique Sogreah en orange
- fond observé en 2006 avant Gamède en bleu



NB Il s'agit du point le plus bas du profil en travers et non du fond moyen.

- On constate un enfoncement important qui met en péril actuellement l'endiguement RG et les épis les plus à l'aval. L'enfoncement du lit est maximum (10 m) au droit de l'épi n° 8 un peu à l'amont du pilon Batard.

Jusqu'à cyclone Gamède, l'enfoncement du lit a eu lieu à l'aval des ponts de la RN1, soit dans la partie aval endiguée ainsi qu'un peu à l'amont du pilon Batard. L'enfoncement n'a pas encore vraiment affecté le lit vers les deux ponts de la

RN1 ni plus à l'amont, mais ceci ne saurait durer comme le laisse augurer l'action du cyclone Gamède.

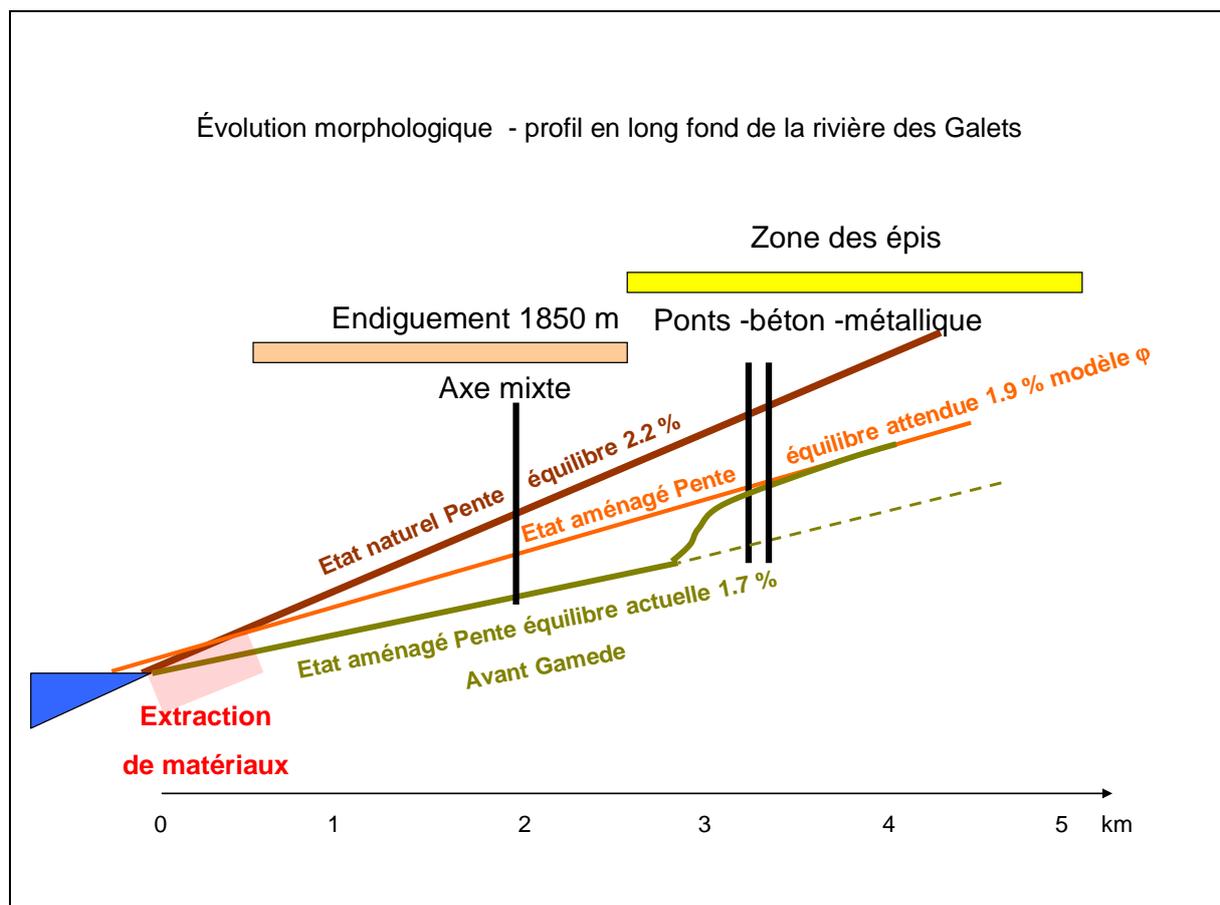
L'enfoncement du lit avait bien été observé sur le modèle physique réalisé par le bureau d'études Sogreah lors de la conception des ouvrages, dont les fondations des endiguements et épis avaient bien été dimensionnés en conséquence.

Le problème est l'enfoncement actuellement constaté de la RdG pour la partie endiguée dépasse très largement l'enfoncement prévu par le modèle :

- Pente naturelle avant aménagement 2.2%
- Pente après aménagement prévu par le modèle 1.9%
- Pente constatée en 2006 après aménagement 1.7 %

(0.2% de pente supplémentaire= 2m /km, soit 5 m au piton Batard et potentiellement 7 m au niveau des ponts de la RN)

Le schéma suivant situe les ouvrages principaux par rapport à ces différentes pentes.



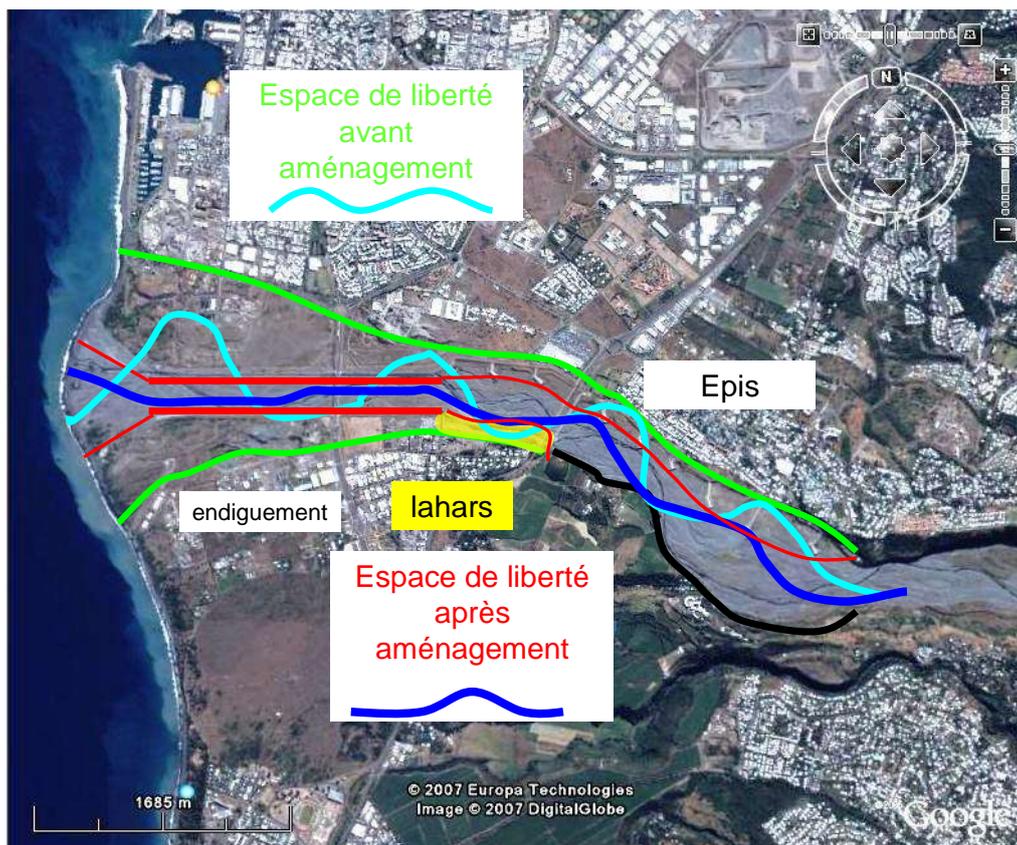
L'enfoncement du lit de la RdG est donc quasi le double de ce qui était prévu, que l'on ne peut attribuer à une simple respiration de fonds.

Les ouvrages, endiguement et épis, sortent donc bel et bien de la bande passante pour laquelle ils ont été conçus.

### **1.2.2 Causes de l'enfoncement du lit**

L'origine de cet enfoncement du lit de la RdG est multiple :

Une des causes principales est la perte d'espace de liberté produit par l'endiguement et dans une moindre mesure par les épis, comme indiqué par le graphique suivant :



Les bras vifs de la RdG en crue n'ont plus la possibilité de divaguer comme à l'état naturel, ce qui se traduit par un parcours plus court jusqu'à la mer, par conséquent des vitesses supérieures et un enfoncement du lit en réaction.

Par ailleurs, la partie endiguée constituée de blocs de basalte percolés au béton est trop lisse et fait que les bras de la RdG en crue collent à l'endiguement avec pour effet une augmentation des vitesses et un parcours plus court à la mer.

L'enfoncement du lit a provoqué la découverte de lahars (coulées boueuses) en RG entre les ponts de la RN et le piton Batard, zone auparavant recouverte d'alluvions, ce qui a encore restreint l'espace de liberté de la RdG.



Lahars en 2007

Le modèle physique à fond mobile Sogreah réalisé en 1986-1987, qui a conduit au dimensionnement des ouvrages, est un moyen d'étude reconnu comme fiable. Même si le modèle a pu introduire quelques biais, il y a d'autres facteurs qui sont intervenus dans le processus anormal d'enfoncement des fonds.

Une autre cause de l'enfoncement du lit de la RdG est les extractions de matériaux effectuées dans le lit de la RdG :

- <sup>1</sup> Extraction par les carriers dans le lit dans la partie aval du cône de déjection jusqu'en 1992, à fin de production de matériaux de construction, facteur non pris en compte par le modèle physique car antérieur à ces extractions. Ces extractions peuvent expliquer en partie les dégâts subis par l'endiguement en RG à l'aval de l'axe mixte
- <sup>2</sup> extraction de gros blocs dans la souille le long de l'endiguement et au pied des épis pendant la construction des ouvrages, à fin de récupération de blocs de basalte pour la construction de la carapace de l'endiguement et des digues reliant la tête des épis à la berge, facteur non pris en compte par le modèle physique.

Cette souille a été rebouchée après travaux avec des matériaux remaniés exempts de gros blocs, constituant donc des zones plus facilement érodables.

Associé à une carapace assez lisse, il n'est donc pas surprenant de voir les bras vifs couler systématiquement le long de l'endiguement (voir photo ci après), et être une cause majeure de l'incision du lit dans le secteur.

---

<sup>1</sup> Il aurait fallu en compensation des extractions abaisser les semelles de l'endiguement de 2 à 4m. Compte tenu du surcoût, le projet a été conservé dans sa version originale, avec confortement si nécessaire pendant une période transitoire jusqu'au retour à l'équilibre du lit.

<sup>2</sup> Le modèle physique CNR réalisé en 1994 et destiné à dimensionner un épaulement de sécurité, trouvait une pente d'équilibre de 1.8% proche de la pente actuelle. Or, les matériaux les plus gros du lit n'avaient pas été représentés sur le modèle pour se placer dans le sens de la sécurité, ce qui simulait assez bien l'enlèvement des gros blocs pour la construction de la carapace de l'endiguement. Les différents essais avaient par ailleurs montré que le souscavement de la semelle représentait le risque le plus important. Les enseignements de ce modèle corroborent les hypothèses déjà proposées.



Cyclone Gamède - RdG vers le pont axe mixte

Une hypothèse parfois évoquée pouvant expliquer une partie de l'enfoncement du lit, est un déficit provisoire d'apports solides venant du bassin. Rien ne permet actuellement de valider cette théorie, les quelques données disponibles tendraient plutôt à l'invalider.

En conclusion, l'incision anormale constatée du lit de la RdG résulte donc d'un cumul de causes différentes qui se sont agrégées. Cette incision du lit explique tous les dégâts déjà constatés, qui résultent d'une attaque des fondations par sous-cavement.

### ***1.2.3 Evolution morphologique - Conséquences pour les ouvrages***

L'évolution du lit de la RdG peut s'envisager comme suit :

#### ***a) Partie endiguée***

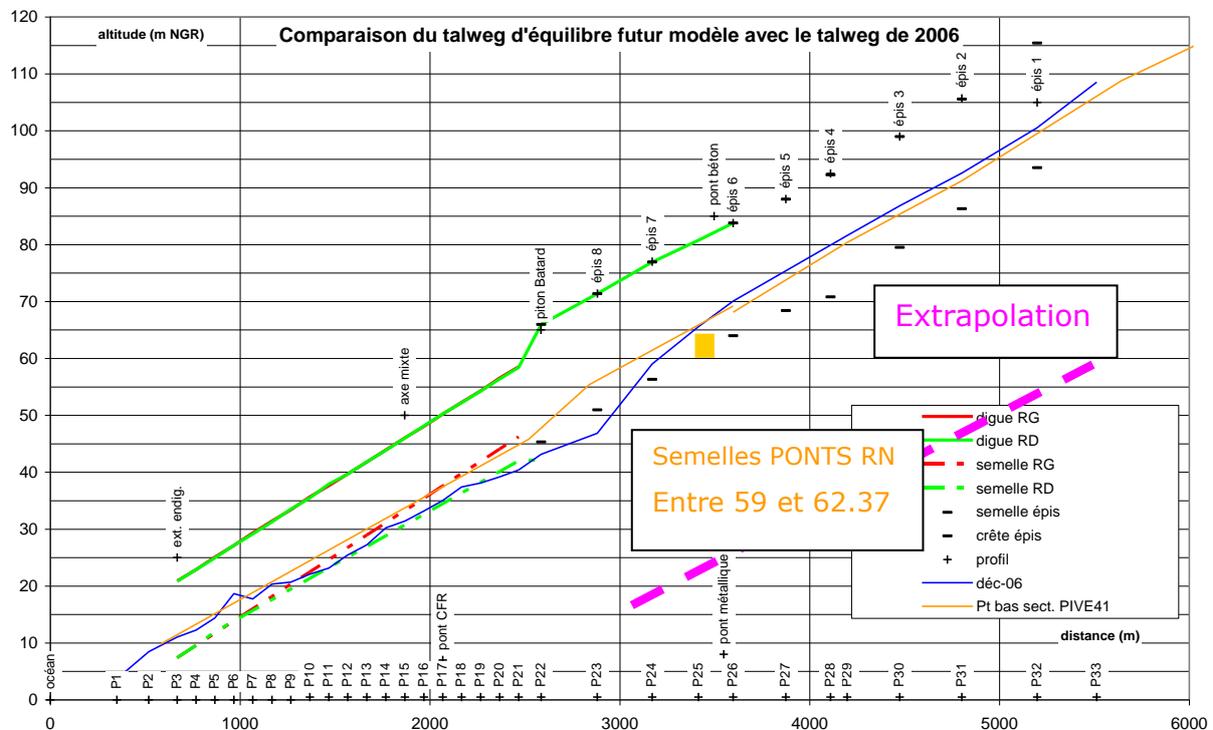
L'effet des extractions effectuées commence à se dissiper. Au gré des crues, les fosses d'extraction aval commencent à se combler, la RdG ramène de gros blocs le long de l'endiguement. Lors du cyclone Gamède Le lit semble pour la première fois avoir évolué favorablement dans cette zone.

Des dégâts limités tels ceux déjà observés sont encore possibles pour les prochaines crues, mais il est peu probable que l'on y observe des dégâts majeurs le long de l'endiguement, sauf si un méandre attaque la RG entre le piton Batard et l'axe mixte ou la semelle est plus haute que le fond des bras vifs.

## b) Epis

L'érosion régressive va inexorablement se poursuivre et atteindre la zone des ponts RN1 puis la zone plus à l'amont. Le cyclone Gamède a d'ailleurs commencé à éroder le lit sous les ponts.

Le **trait en violet** donne l'extrapolation approximative des fonds à partir des fonds aval 2006 pour les prochaines crues, qu'il conviendra de préciser.



Il en résulte que tous les épis sont menacés de dégâts ou même de destruction par l'enfoncement du lit, si un bras vif se déplace vers ceux ci :

- n°9 et 8 déjà menacés avant le cyclone Gamède,
- n°7 probablement menacé depuis Gamède,
- menacés par les futures crues : dans l'ordre n° 7, 6, 5, 4, 3, 2 et 1. Les épis 5 à 1 sont fondés sur les lahars, ce qui n'est pas vraiment un gage de meilleure stabilité.

La destruction de la digue par souscavement entre les épis 4 et 5 pendant le cyclone Gamède est la preuve que l'érosion régressive commence à atteindre ces épis.

### **c) Ponts**

On notera que les deux ponts de la RN1 antérieurs aux ouvrages d'endiguement et épis, n'ont pas vraiment été prévus pour l'enfoncement prévu généré par les ouvrages, et encore moins pour le sur-enfoncement apparus après mise en service. Certaines piles du pont béton ont cependant été approfondies.

On notera aussi que le pont métallique ancien et obsolète devait être remplacé par un ouvrage neuf, le projet axe mixte s'étant semble-t-il substitué au projet.

#### **• Pont métallique RN1**

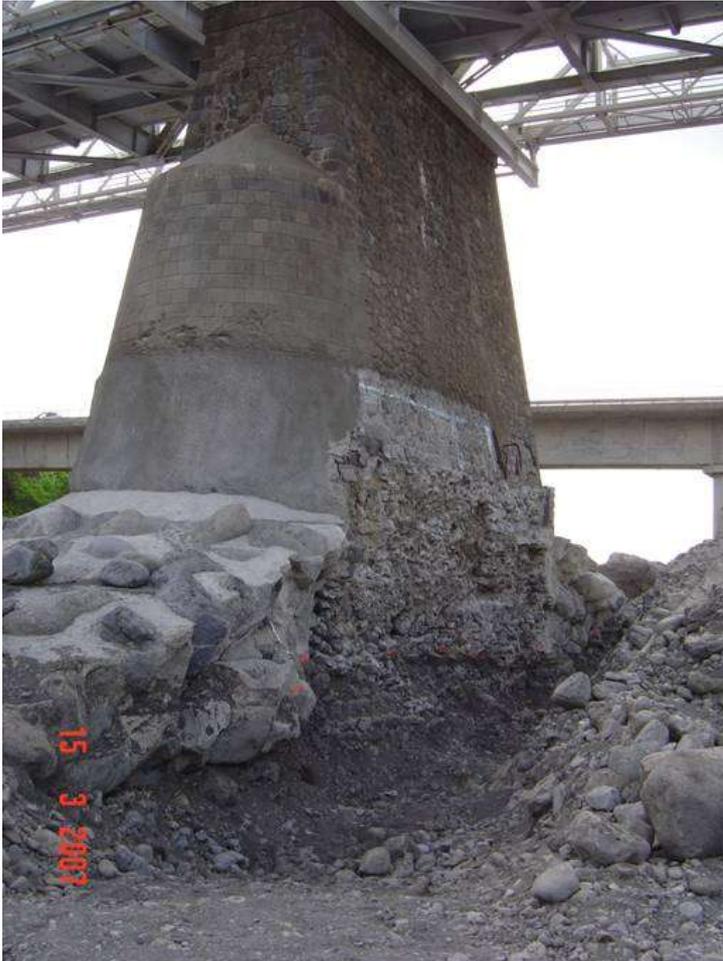
Les cotes des fondations des piles sont les suivantes :

Culée RD	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	Culée RG
66.57	66.7	62.45	62.99	62.37	62.88	62.95	62.77	63.15

#### *Situation actuelle*

Dans la partie alluvionnaire, les fonds mesurés sous le pont post Gamède sont actuellement à la cote (66.8) entre P5 et P6. Les bras se rebouchant en décrue, le fond pendant Gamède était probablement à la cote (64). Le fond pour une crue décennale descendra à la cote (62) environ. On en déduit que :

- Les fondations de la culée RD et la pile P1 sont perchées. La pile P1 serait immédiatement détruite en cas de déplacement du bras vif en crue vers la RD.
- Les piles P2 à P5 sont à la limite de stabilité, le fond du bras vif atteignant pratiquement la cote des fondations.



Post Gamède  
pile du pont métallique  
photo DDE

Photo : les blocs percolés ont cédés pendant le cyclone Gamède. La pile n'a manifestement plus de réserve de fondation.

Les piles P7, P6, P5 et P4 du pont métallique ont été renforcées post Gamède par la DDE en mars 2007 sur conseil du CETE Méditerranée. De gros blocs de basalte de rivière ont été déposés autour des piles.

Ces dispositions peuvent sauver provisoirement les piles de la destruction à condition que le bras vif soit assez perpendiculaire au tablier et passe bien entre les piles. Si un bras à méandre (Q2-Q5) attaque une pile de biais, elle ne pourra probablement pas résister car sa forme rectangulaire constitue un facteur défavorable.

### *Situation future*

Les prochaines crues vont déclencher une érosion régressive qui atteindra les deux ponts. La durée nécessaire pour atteindre cette situation n'est pas prévisible car elle dépend du nombre de cyclones qui toucheront la Réunion dans les prochaines années et de leur intensité.

La cote extrapolée des fonds se situe alors vers (55) selon le graphique précédent. Aucune des piles ne pourra résister même avec les travaux d'urgence effectués.

Il est à noter qu'une conduite d'eau potable alimentant une partir du Port emprunte ce pont.

#### • **Pont béton RN1**

Les cotes des fondations des piles sont les suivantes :

RD	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8-RG
Initial	63	63	63	63	63	63	67	64.67
Après renforcement	63	63	59	59	59	59	65	62.64

### *Situation actuelle*

Les fonds mesurés du bras vif post Gamède sont actuellement à la cote (66) environ dans la partie alluvionnaire (même remarque que pour le pont métallique, les bras se rebouchent en décrue, les fonds en crue sont plus bas : 62 à 63 environ)

- Les piles P1 et P2 pourraient être détruites en cas de déplacement du bras vif en crue vers la RD
- Toutes les autres piles P3 à P6 ont pour le moment une petite marge de sécurité

### *Situation future*

- La cote extrapolée des fonds lors des prochaines crues se situe vers (55) selon le graphique précédent. Dans ce cas, même les piles à fondation(59) résisteront difficilement sauf si le bras vif passe bien entre les piles.

La pile P5 a été renforcée post Gamède par la DDE en mars 2007 sur conseil du CETE Méditerranée. Des gros blocs de basalte de rivière ont été déposés autour des piles.

- *Cas des piles P7 et P8 du pont béton ancrées sur les Lahars*



Aval ponts juste avant



et juste après le cyclone Gamède

Les piles sont fondées sur des lahars résistant très mal à l'érosion. Pendant le cyclone Gamède ; la chute situé à l'aval du pont béton s'est amplifiée et a régressée pour se situer entre les piles P7 et P8 du pont béton.

En l'état, les fondations des piles P7 et P8 résisteront difficilement à une nouvelle crue ainsi que la culée et la pile P7 du pont métallique situées juste à l'amont et aussi fondées sur les lahars.

Les écoulements transversaux dans ce secteur sont aussi très dangereux pour la stabilité des fondations des piles.

- **Pont axe mixte**

Ce pont n'est a priori pas en danger

## **1.2.4 Recommandations**

### **a) Partie endiguée**

- Il conviendra de réparer rapidement de manière préventive et curative si nécessaire tout nouvel affouillement qui se produirait en pied d'endiguement. La technique employée par la DDE-SEECL consistant à mettre des gros blocs en pied de semelle, employée en 2001 et 2003, semble efficace et pourra être reconduite,
- L'idéal serait de rendre la carapace de l'endiguement plus rugueuse sans la rendre plus vulnérable,
- L'endiguement RG aval piton Batard est vulnérable et il convient d'en tenir compte en cas de projet construction derrière l'endiguement.

### **b) Epis**

Les épis sont en danger comme il a été démonté. Il est proposé :

- de renforcer rapidement les épis n° 9, 8, 7 par la technique de blocs en pied déjà utilisée pour l'endiguement,
- de préciser la limite de stabilité des épis en cas d'affouillement en pied ainsi que les conséquences d'une rupture d'épi, d'étudier les possibilités de renforcer plus notablement les épis par travaux en sous œuvre.

### **c) Ponts RN**

Le confortement des piles des deux ponts RN est en cours à la DDE service SGT et n'est pas l'objet de ce rapport. Cependant des conseils de différents ordres peuvent être émis à la lumière de l'évolution morphologique de la RdG.

- *Pont métallique*

Le pont métallique semble condamné à moyen terme même avec le confortement provisoire effectué en mars 2007.

- *Conduite AEP passant sur le pont métallique*

Compte tenu du risque de destruction du pont métallique, il paraît souhaitable de construire un by-pass par le pont béton. Au minimum, les études devraient être effectuées pour démarrage immédiat des travaux en cas d'effondrement du pont métallique.

- *Pont béton*

Seuls des travaux lourds et exécutés rapidement de reprise en sous œuvre de toutes les piles sur une profondeur d'une dizaine de mètres permettra de sauver l'ouvrage, y compris les piles P7 et P8 fondées sur les lahars.

Il est nécessaire :

- de ne pas boucher le cañon qui constitue par son débit en crue un frein à l'érosion régressive dans le lit alluvionnaire parallèle. Boucher le cañon et supprimer sa débitance pourraient signer prématurément l'arrêt de mort des deux ponts,
- d'effectuer seulement un confortement localisé de la chute située au droit des piles P7 et P8, pour éviter leur ruine et celle de la pile P7 du pont métallique,
- de surveiller la régression de l'érosion des lahars dans le cañon
- d'effectuer des carottages dans les lahars et de mesurer leur résistance à l'abrasion (déjà proposé à la DDEE-SGT et au CETE)
- à long terme de laisser les lahars se désagréger complètement pour retrouver un meilleur espace de liberté à la RdG, favorable à tous les ouvrages.

- *Nouveau pont*

On ne peut que conseiller la programmation la plus rapide possible d'un nouvel ouvrage de franchissement, avec des piles fondées profondément, toutes à la même cote même dans les lahars, et doté impérativement de piles circulaires.

### **1.2.5 Aspect surveillance - prévision**

La surveillance des épis devra être renforcée ainsi que l'évolution du lit dans le secteur des épis et des ponts de la RN.

Il paraît nécessaire de mieux prévoir l'évolution morphologique de la RdG. Pour cela, il est proposé :

- d'étudier la régression du fond du lit de la RdG en fonction du temps, afin d'en apprécier l'ampleur et la vitesse d'évolution, pour mieux anticiper les risques et programmer les travaux éventuels,

- De surveiller l'évolution du lit à l'amont dans le bassin versant par le levé de quelques profils en travers, après chaque grosse crue, pour apprécier les fluctuations du transport solide arrivant,
- d'avoir une meilleure vision du comportement géomorphologique à long terme du bassin versant de la RdG, ce qui nécessitait une étude fondamentale et l'organisation d'un suivi à long terme.

### **1.2.6 Aspect sécurité**

- *Sécurité endiguement*

Il est souhaitable d'interdire en crue l'accès de l'endiguement au public.

- *Sécurité épis*

Il est souhaitable :

- d'interdire en crue l'accès des épis et berges au public,
- De bien appliquer la réglementation de non construction dans une bande de 50m le long de la berge (village Rivière des Galets en particulier).

- *Sécurité ponts*

Plusieurs piles (et culées) RD des deux ponts RN sont déjà perchées c'est à dire que les fondations sont plus hautes que le lit actuel. Un déplacement du bras vif en RD suffira donc à détruire la pile et le pont.

- Il paraît donc nécessaire de bien surveiller en crue toute évolution des bras vifs en rive droite, possible en particulier pour les petites cures
- De surveiller particulièrement les attaques en biais des piles du pont métallique qui sont rectangulaires (attaque typique des petites crues)
- de ne pas hésiter à fermer à la circulation les deux ponts amont même pour des petites crues dans les deux cas précédents, surtout hors période cyclonique (circulation non arrêtée) avec déviation par le pont axe mixte qui ne présente a priori pas de risque.

## 2 HISTORIQUE ET BUT DE L'ETUDE

La RdG concentre le réseau hydrographique d'un des trois grands cirques d'érosion de l'île : le cirque de MAFATE. Le bassin versant est de 105 km<sup>2</sup>. La RdG débouche dans l'océan Indien entre les communes du PORT en rive droite et de St PAUL en rive gauche. En 1966, le cyclone DENISE a provoqué de nombreux dégâts le long de son cône de déjection : destruction du pont du chemin de fer (CFR), coupure de l'ancienne Route Nationale 1 en rive gauche.

Une première série d'études réalisées par le bureau d'études SOGREAH entre 1967 et 1968 a permis de dimensionner un ouvrage de protection contre les érosions. Un modèle physique au 1/200<sup>ème</sup> avait été réalisé à l'époque.

Ce projet a été relancé par les désordres provoqués par le cyclone HYACINTHE en 1980 (Boulevard de la MARINE emporté, berge le long du village Rivière des Galets érodée...).

Une deuxième série d'études a été réalisée par le bureau d'études SOGREAH. Ces études s'appuyaient sur un modèle physique au 1/125<sup>ème</sup> réalisé sur l'Ile, représentant la RdG de la sortie des gorges à la mer, soit un linéaire de 6 km. Ces études se sont conclues à la fin des années 1980 par la définition de :

- 9 épis implantés en rive droite entre la sortie des gorges et le piton Batard, soit sur un linéaire de 3 km ;
- Un endiguement de deux kilomètres de long qui s'achève à 650 m de l'océan.

Pour un montant de plus de 330 millions de Francs (valeur 1987), les travaux d'aménagement ont été réalisés par les entreprises DUMEZ et GTM :

- d'avril 1992 à mars 1995 pour la tranche aval (épi n°6 à épi n°9 et endiguement) ;
- de 1998 à 2000 pour la tranche amont (épi n° 1 à épi n° 5).

Pour cette deuxième tranche de travaux, les études ont été actualisées par le bureau d'études BRL mi 1996.

La maîtrise d'œuvre des travaux a été réalisée par la DDE service SEECL.

En 1994, La CNR a effectué pour le compte du SIVU RdG un modèle physique partiel de la partie endiguée de la RdG destiné à dimensionner un épaulement de sécurité sur la partie extérieure de l'endiguement.

Cet épaulement était destiné à renforcer l'endiguement pour ensuite pouvoir construire derrière ceux-ci avec plus de sécurité. Cette étude comprenait une analyse des risques de rupture de l'endiguement et des épis et a mis en évidence le danger induit par le souscavement de la semelle de l'endiguement.

Le nouveau pont axe mixte a été construit dans les années 2000, traversant la RdG dans la partie aval, se substituant à un projet de remplacement du pont métallique de la RN1.

En 2002 la CNR a réalisé une étude de l'aménagement des terrains situés derrière l'endiguement pour le SIVU RdG, ayant servi de base au PLU. Cette étude a proposé de se limiter dans le cadre de la notion de risque accepté, à des constructions derrière l'endiguement ne conduisant ni à des pertes humaines ni à des sur-catastrophes, même en cas de rupture d'une partie de l'endiguement. De plus, des bandes inconstructibles ont été définies le long de l'endiguement. Derrière les épis, le même principe a été adopté avec une bande de sécurité de 50 m le long de la digue longeant les épis au droit du village Rivière des Galets : 10 m inconstructible, puis 40 m soumis à réglementation: terrain de sport permis... mais aucune construction de valeur ou habitations.

La surveillance des ouvrages est assurée par la DDE service SEECL. La CNR a une mission d'appui confiée par le SIVU RdG concernant la surveillance des ouvrages, pour 2003-2005, mission reconduite pour 2006-2009. La DDE est aussi chargée de la maîtrise d'œuvre pour le compte du Sivu des réparations effectuées.

Des campagnes topographiques régulières du lit de la RdG ont été réalisées. Leur analyse a permis de montrer que le lit s'enfonce régulièrement.

Des désordres aux ouvrages ont été observés depuis la mise en service:

- en 2002 à l'amont RD de l'endiguement, le pied de la semelle de fondation a été découvert, suivi de travaux de confortement en 2003,
- Entre les ponts de la RN1 et le piton Batard, les lahars en rive gauche se sont progressivement découverts depuis la mise en service des ouvrages, aggravant l'enfoncement de la RdG,
- en 2006, la semelle de l'endiguement s'est découverte en RD à l'amont du confortement et en RG à l'aval de l'axe mixte, avec confortement aux deux endroits,
- en février 2007 pendant le cyclone Gamède, la carapace de l'endiguement RG s'est affaissée à l'amont du confortement réalisé en 2006. A l'amont du pont métallique de la Route nationale 1, en rive droite, la digue comprise entre l'épi n°4 et l'épi n°5 a été partiellement détruite. Les travaux de confortement sont programmés par le Sivu.

Le cañon situé dans les lahars a régressé entre les piles P7et P8 du pont béton, qui se trouvent maintenant perchées, ainsi que les piles P1 et P2. Des dégâts ont été occasionnés aux embases des piles du pont métallique, les fondations de toutes les piles atteignant un niveau critique. Les deux ponts de la RN1 ont dû être fermés à la circulation pendant une partie du cyclone. Le pont axe mixte s'est bien comporté et est resté ouvert.

- en mars 2007, des travaux d'urgence de confortement des piles ont été réalisés par la DDE,

Objectif de la présente étude :

Suite à ces désordres et à l'enfoncement alarmant des fonds de la RdG, le SIVU a demandé à la CNR de réaliser une expertise fluviomorphologique.

**L'objectif de l'étude est de comprendre le fonctionnement morphologique de la rivière et d'expliquer les modifications observées depuis la mise en service des ouvrages.**

**Un autre objectif est de tenter de prévoir l'évolution morphologique future de la rivière en évaluant l'impact et les risques sur les ouvrages existants, endiguement, épis et ponts.**

Une visite du site par un expert en fluviomorphologie et une consultation des nombreuses archives de la DDE, qui était le maître d'œuvre des travaux, ont été réalisées en février 2007.

### 3 DESCRIPTION DES OUVRAGES DE PROTECTION

#### 3.1 Les ouvrages de protection

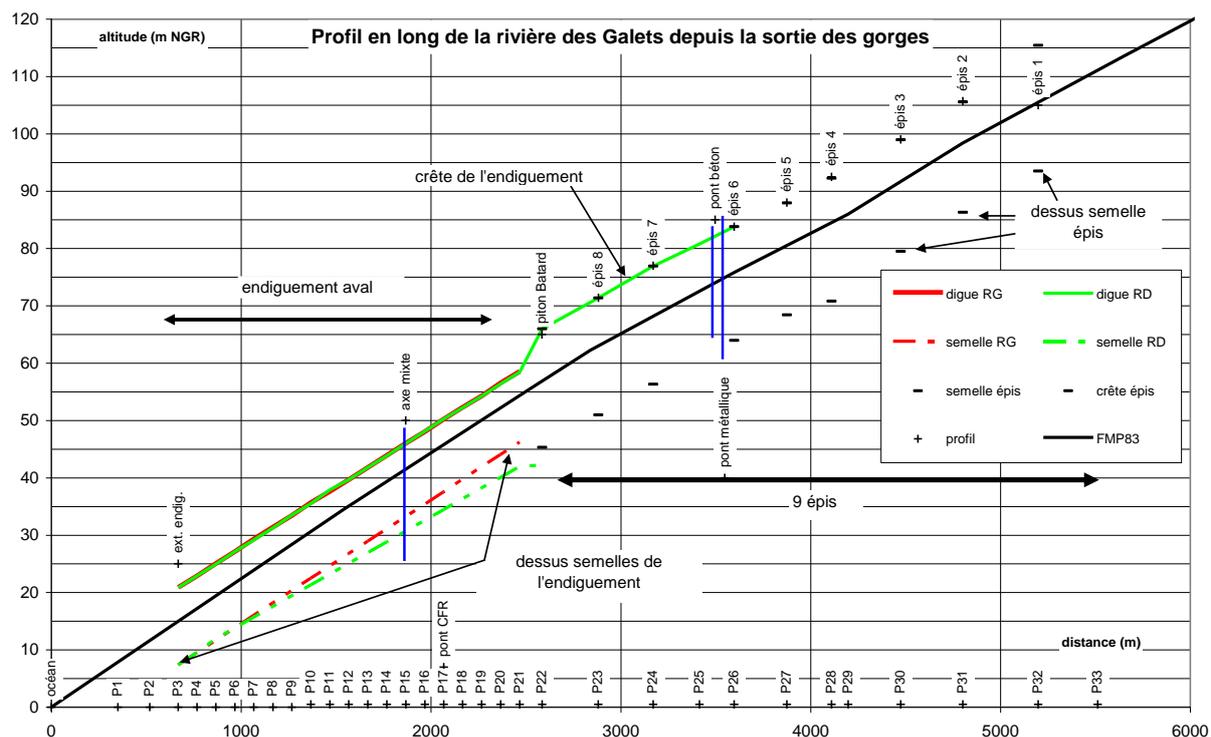
Les protections des berges de la RdG sont constituées de plusieurs ouvrages. De l'amont vers l'aval on trouve :

- 9 épis en rive droite, fondés en profondeur, reliés entre eux par une digue 'amont' fondée superficiellement sur le terrain naturel,
- La digue de fermeture du piton Batard,
- Un endiguement 'aval' fondé profondément dans les alluvions de la RdG.

Les plans et profils en long ci-après permettent de situer les ouvrages.



Extrait photo satellite de 2007 – Google



La courbe noire représente le fond moyen d'équilibre de 1983 avant ouvrages et extraction de matériaux aval.

Les courbes vertes représentent la crête et la semelle de l'endiguement RD.

Les courbes rouges représentent la crête et la semelle de l'endiguement RG.

La différence entre le fond moyen et la cote de la semelle représente la profondeur maximum des bras vifs déterminée sur modèle physique Sogreah au 1/125.

La semelle endiguement amont RD est plus profonde du fait du bras vif surcreusé produit par le virage au droit du piton Batard.

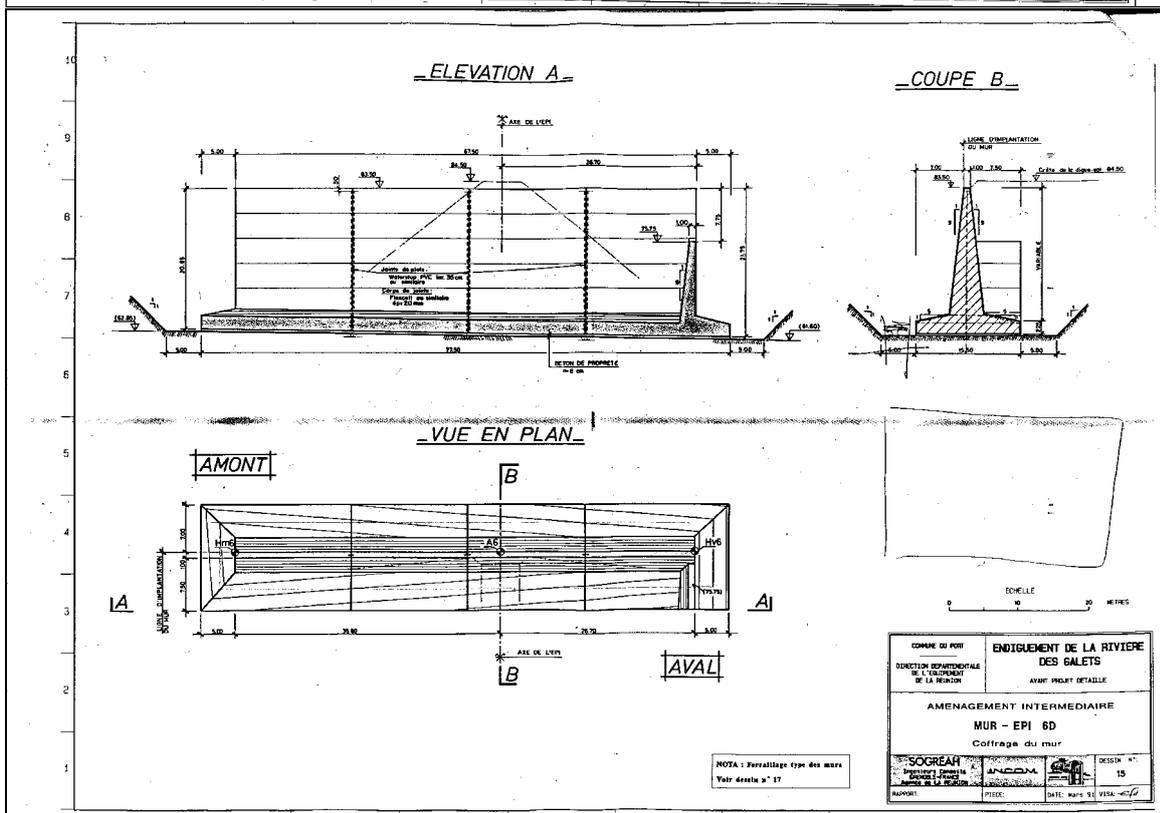
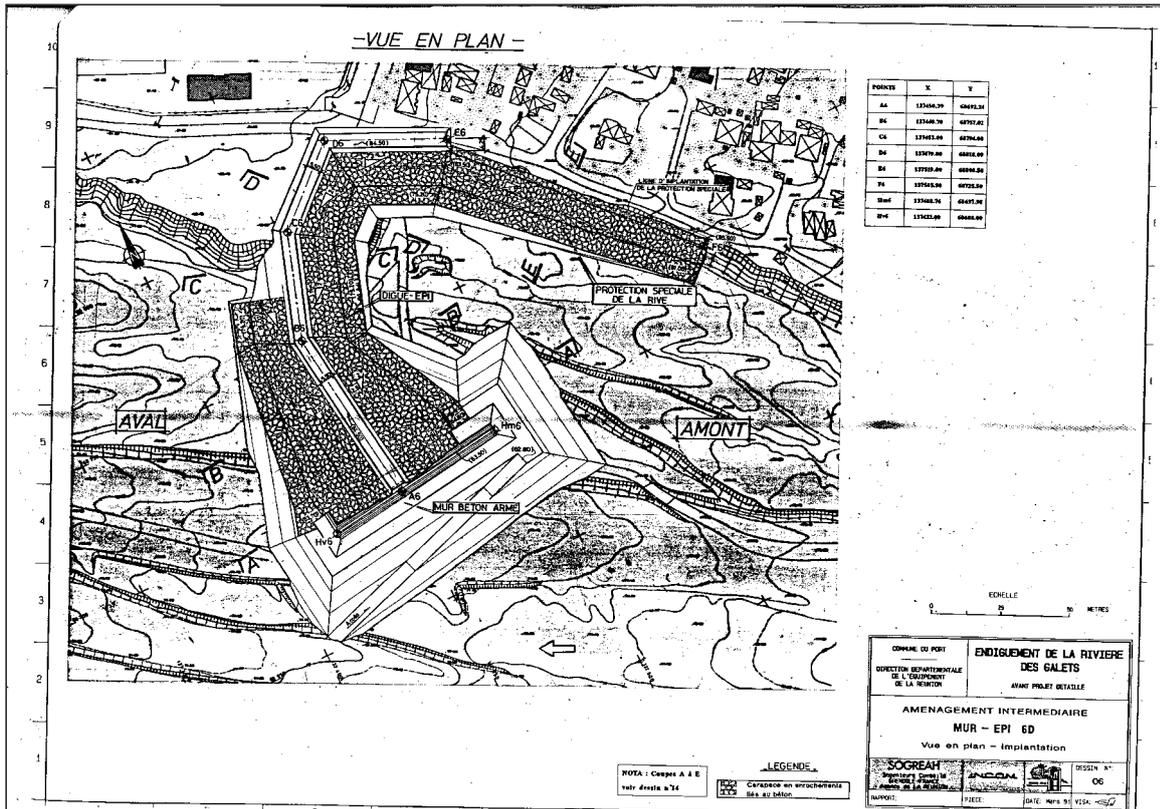
Les tirets noirs représentent la crête et la semelle des épis

Les traits bleus représentent les trois ponts franchissant la RdG

### 3.2 Epis

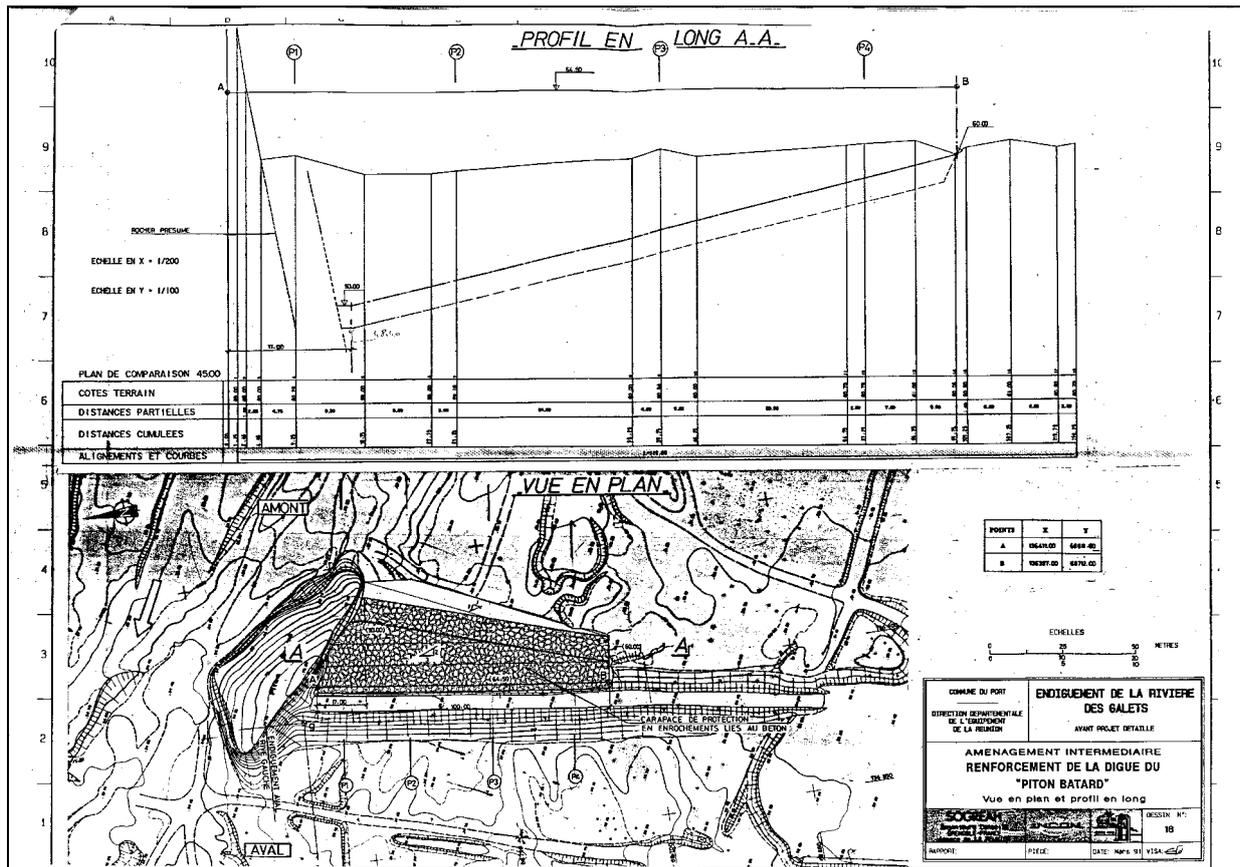
Les épis n°6 à n°9 ont été réalisés entre 1992 et 1994 ; les épis n°1 à n°5 dans un deuxième temps entre 1998 et 2000. La semelle des épis 1 à 5 est ancrée dans les lahars. Nous n'avons pas trouvé d'informations sur la nature des fondations des épis n° 6 à n°9, mais il est vraisemblable qu'ils reposent sur les

alluvions de la RdG. Des extraits du dossier d'avant projet détaillé (APD) sont joints ci-après [33]. Les cotes des semelles des épis sont jointes en annexe n°1.



### 3.3 Protection de la digue du piton BATARD

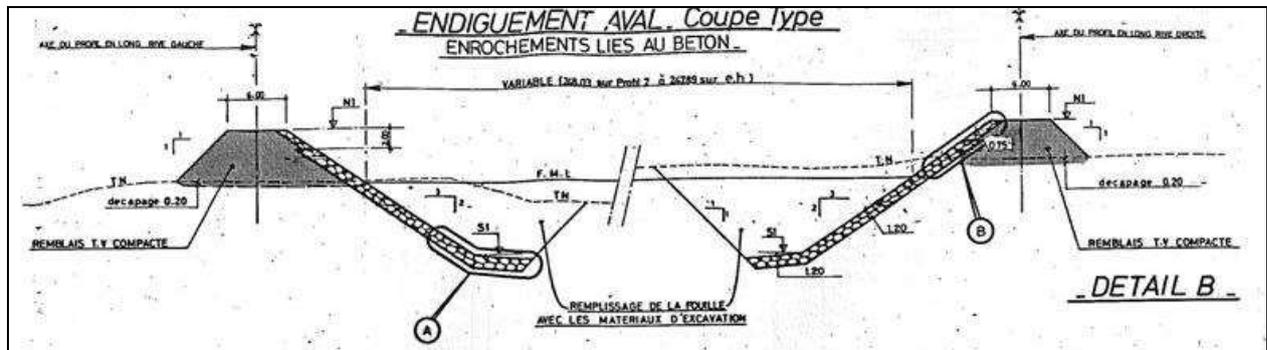
Cette digue transversale construite après le cyclone Denise en 1966 a été renforcée lors des grands travaux d'aménagement des années 1990. D'après les plans de l'APD [33] joint ci-après, la carapace de protection est fondée entre 48.40m NGR au pied du piton Batard et 58.40m NGR sur la terrasse rive gauche.



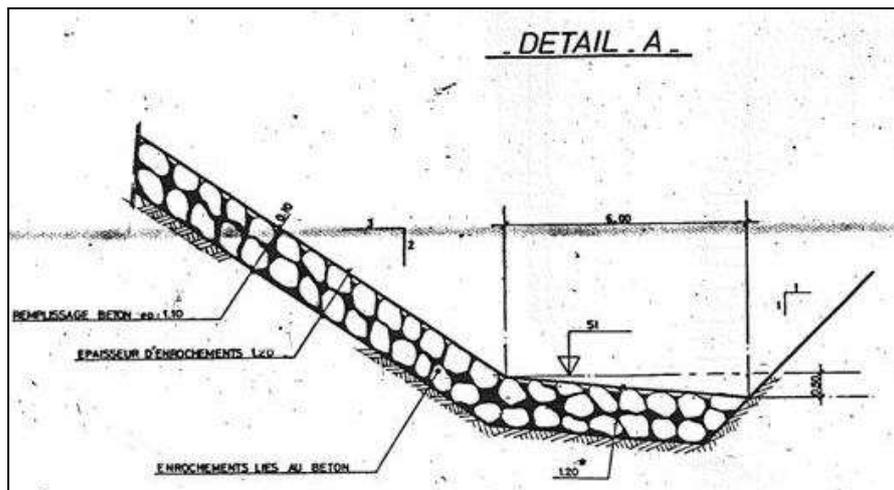
### 3.4 Endiguement aval

La largeur du lit entre digues est de 248m. Côté rivière, l'endiguement est constitué d'un remblai compacté de fruit 3H/2V protégé par une carapace de 1,20m d'épaisseur en enrochements liés au béton, pris dans la fraction 300-900mm des blocs présents dans le lit de la RdG. La carapace se prolonge en pied pour former une semelle.

Les plans suivants sont extraits de l'APD [33]. Les cotes des semelles sont jointes en annexe n°1.

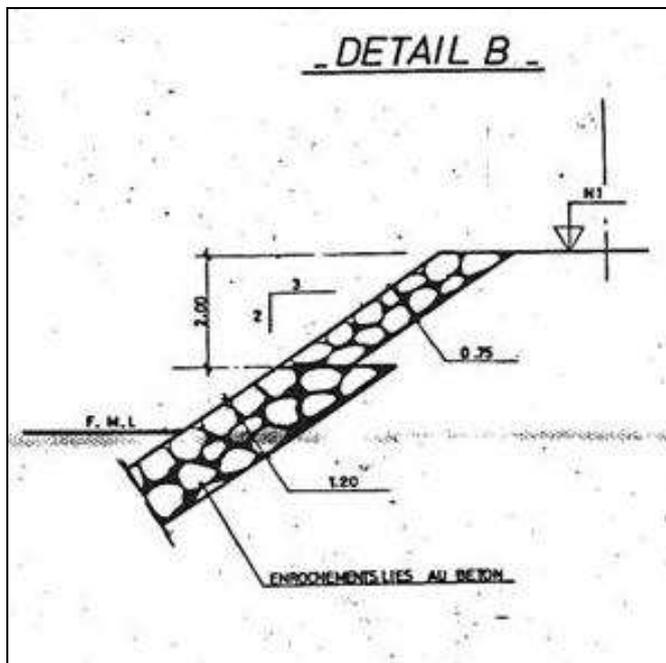


La réalisation de la carapace a été effectuée sur le principe de deux couches de 0,60m, le bétonnage étant réalisé à la pompe avec des reprises par tranches de 1,20m verticalement. Cette protection est enracinée sous le niveau du fond moyen d'équilibre futur (établi sur modèle physique) de 4.3 à 6.9m en rive gauche et de 4.3m à 8.5m en rive droite.



Le dimensionnement de la carapace de l'endiguement est décrit dans le rapport [29]. Une épaisseur de 1.5m est nécessaire pour résister aux fluctuations de niveaux de 3 à 4 m mesurés sur le modèle physique. Une variante avec un système de drainage complexe permettait de réduire cette épaisseur à 0.75m. Ce dispositif s'est avéré plus coûteux que la solution de base et a été abandonné. Pour des raisons d'économie d'investissement, l'épaisseur de la carapace est réduite à 1,2 m. Le document [33] justifie ce choix du maître d'ouvrage en indiquant que « l'on admet que des désordres soient possibles afin de réduire l'investissement ». Jusqu'à présent ce choix c'est montré judicieux. A ce jour, il n'y a pas eu de désordre dû à cette réduction d'épaisseur.

Les deux derniers mètres de la carapace de l'endiguement sont peu sollicités. L'épaisseur a été réduite à 0.75m comme le montre le croquis suivant.



A ce jour, il n'y a pas eu de désordre dû à cette réduction d'épaisseur en partie haute.

La largeur des digues en crête était initialement de 6m.

### 3.5 Epaulement de sécurité

L'étude sur modèle physique réalisée au laboratoire de la CNR en 1994 [37] a défini un épaulement de sécurité côté extérieur des endiguements. Ce dernier été construit et porte la largeur en crête à 10 m auquel s'ajoute l'épaulement un mètre plus bas que la crête de digue, de largeur variable : 25 m à l'amont, à 5m à l'aval.

La partie amont de l'endiguement RD a été particulièrement renforcé. En effet, c'est à cet endroit que le risque est le plus important :

- Aléa fort d'attaque par un bras vif compte tenu du virage de la RdG,
- Vulnérabilité maximum, puisque s'il y a rupture à cet endroit, ce sont la totalité des terrains exondés RD qui seront touchés.

Rappel: Risque = Aléa x Vulnérabilité

## 4 DESORDRES OBSERVES SUR LES OUVRAGES

Depuis la réception des ouvrages aval en 1995, des désordres ont été observés après chaque crue moyenne de la RdG, en 2002, 2006 puis 2007. Ces désordres proviennent de l'enfoncement du lit de la RdG:

### 2002- DINA

Renforcement en 2003, du pied de la fondation rive droite de l'endiguement entre les profils P20 et P17 (entre l'axe mixte et l'amont de l'endiguement).



Souscavement le long du pied de l'endiguement amont RD

NB sur la photo, la semelle est visible à l'étiage ce qui est anormal. En effet, si le bras vif peut atteindre la semelle en crue, il se rebouche ensuite en décrue. Ceci dénote d'un abaissement généralisé des fonds.

## 2006-DIWA

Renforcement en rive droite de l'endiguement entre P20 et P21 (proximité extrémité amont de l'endiguement) et en rive gauche entre P6 et P9 (aval pont axe mixte). Ces zones sont repérées sur la photo suivante :



## 2007-GAMEDE

La carapace de l'endiguement rive gauche à l'aval de l'axe mixte s'est rompue par déchaussement de la semelle de pied, comme le montre les photos suivantes :



Zone concernée

souvèvement

Entre les épis n°4 et 5, la digue rive droite c'est également déstabilisée.



Le bras à méandre typique d'une crue type Q2-Q5 a pénétré entre les deux épis. Les dégâts n'ont pas mis en cause la sécurité du village Rivière des Galets, compte tenu de la bande non constructible de 50 m derrière la digue.

### Ponts RN1

Des piles du pont métallique ont subis des dégâts:



Post Gamède pile du pont métallique photo DDE

Les blocs percolés RD ont cédés pendant le cyclone Gamède. La pile n'a manifestement plus de réserve de fondation. Les fondations des piles P2 à P5 sont en fait à la limite de stabilité, la culée RD et la pile P1 sont perchées.

Les piles P7, P6, P5 et P4 du pont métallique ont été renforcées post Gamède par la DDE en mars 2007 sur conseil du CETE Méditerranée. De gros blocs de basalte de rivière ont été déposés autour des piles.



### **Pont béton**

Les piles n'ont pas subis de dégâts pendant Gamède. La pile P5 a été renforcée préventivement post Gamède par la DDE en mars 2007 sur conseil du CETE Méditerranée. Des gros blocs de basalte de rivière ont été déposés autour des piles.

- *cas des piles P7 et P8 du pont béton ancrées sur les Lahars*

Ces piles et leur embase ont été renforcées de nombreuses fois par la DDE. En 1990, une abrasion importante de la pile 8 est apparue, semelle surcreusée, fers à béton dégarnis.

Jusqu'à Gamède, il s'agissait d'érosion localisée des fondations en lahars. Depuis Gamède, un danger beaucoup plus important guette ces piles.



aval ponts juste avant



et juste après le cyclone Gamède



Pendant le cyclone Gamède - dimanche 25 février 2007

Les piles sont fondées sur des lahars résistant très mal à l'érosion (voir CR test machine CNR sur un échantillon). Avant Gamède, les lahars présentait une chute de 2 m de haut environ situées à l'aval des piles. Pendant Gamède, cette chute s'est amplifiée et a régressée pour se situer post-Gamède pratiquement entre les piles P7 et P8 du pont béton avec une hauteur atteignant 5 m de haut selon le levé topographique DDE. La vitesse au droit des piles pendant Gamède peut être estimée à 8m/s, au pied de la chute à 16m/s

Les piles P7 et P8 ont donc résisté de justesse au cyclone Gamède. Un nouveau recul de la chute serait fatal aux piles.

Il a été constaté pendant Gamède des écoulements transversaux venant de la partie centrale et rejoignant le cañon, à l'amont et à l'aval immédiat de la pile P7 érodant dangereusement les lahars, qui dans cette zone, semblent particulièrement friables.

## 5 GENERALITES RIVIERES TORRENTIELLES REUNIONAISES

Ce chapitre permet une meilleure compréhension des phénomènes morphologiques de la RdG.

Pour les petites et moyennes crues, les précipitations tropicales et les fortes pentes des rivières de l'île place la morphologie de ces rivières dans la catégorie 'lit à tresse' avec un ou plusieurs bras comme le montre les photos suivantes :



Rivière des pluies, crue décembre 2004

Les grands principes des comportements morphologiques des rivières endiguées de la Réunion sont rappelés ci après.

### 5.1 Comportement morphologique de la rivière

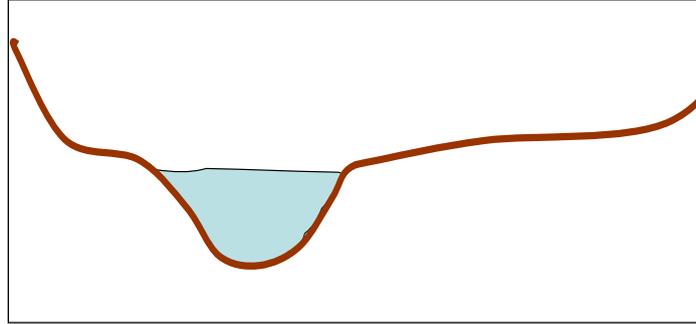
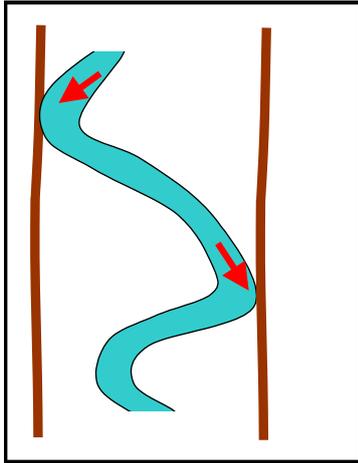
---

Les rivières torrentielles de l'île de la Réunion comme la RdG ont un comportement morphologique particulier qui dépend des débits de crues :

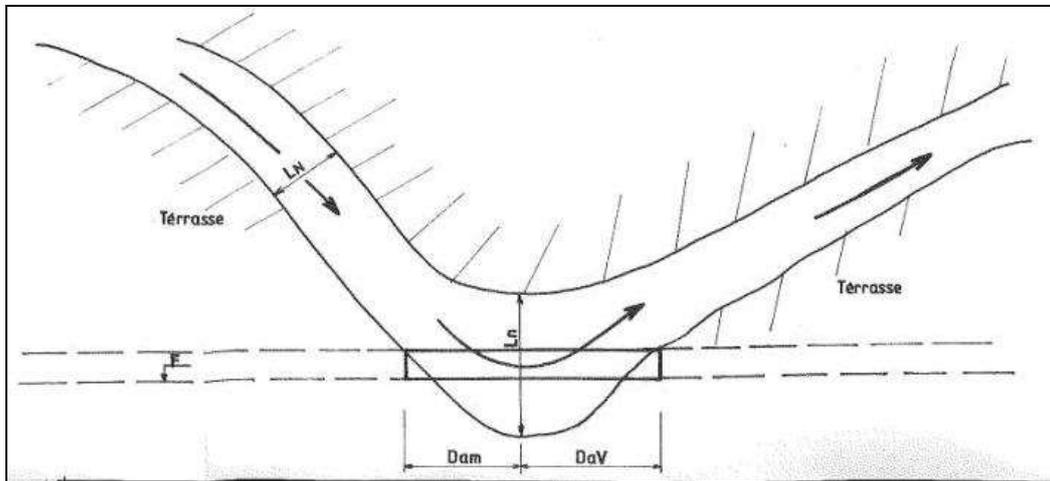
#### 5.1.1 Crue faible (Q2)

La rivière coule avec un bras vif qui méandre fortement, comme le montre la photo suivante après le passage du Cyclone Gamède en février 2007.

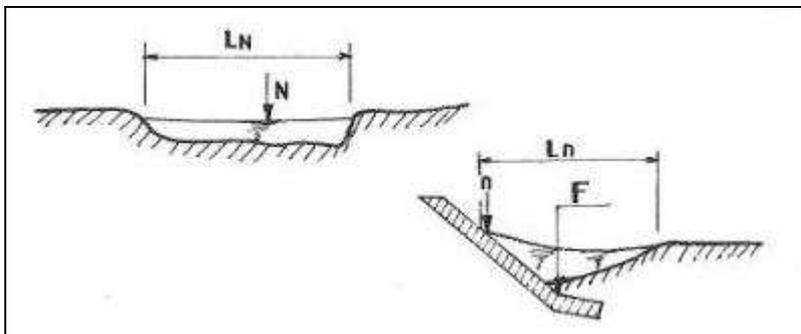
Pour ces crues faibles, on observe plusieurs bras vifs sur-crusés avec des vitesses élevées de l'ordre de 5m/s environ, et des angles d'attaque des berges très important.



Ce phénomène est détaillé sur le schéma établi à partir des observations sur modèle physique [28].



Vue en plan de l'attaque

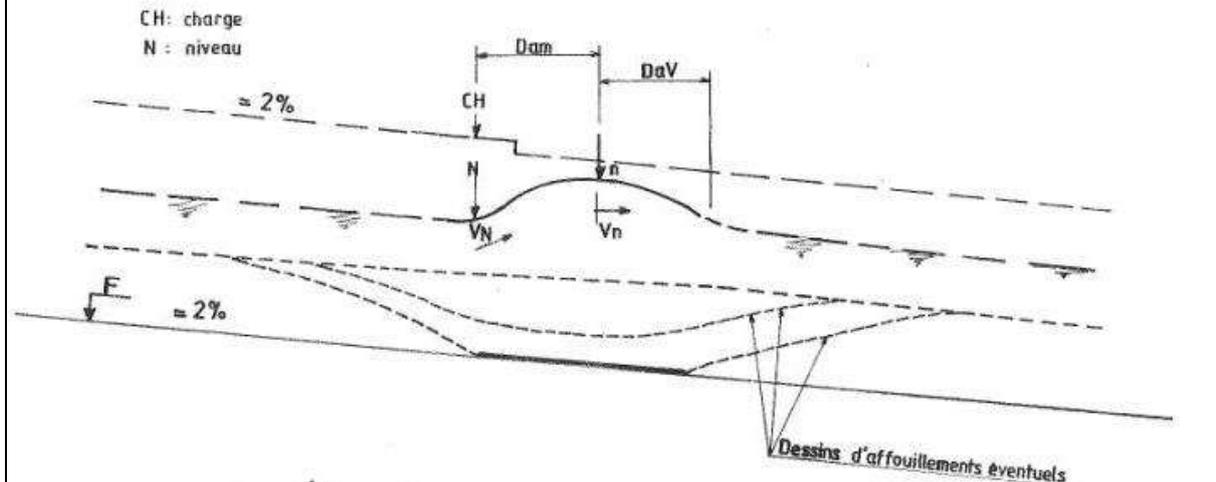


sections type

## Attaque "frontale" de la berge

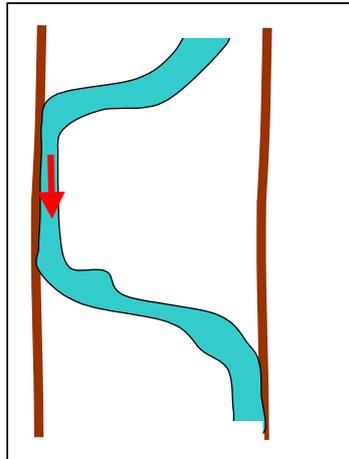
Schéma de principe simplifié

Schéma N°1  
Pièce N° 73



Profil en long

Avec un endiguement, le bras vif a tendance à coller à la digue (rugosité plus faible le long de l'endiguement que dans le lit).

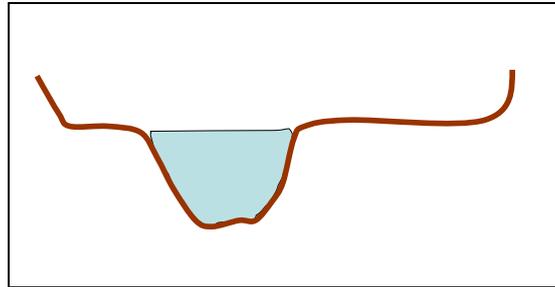
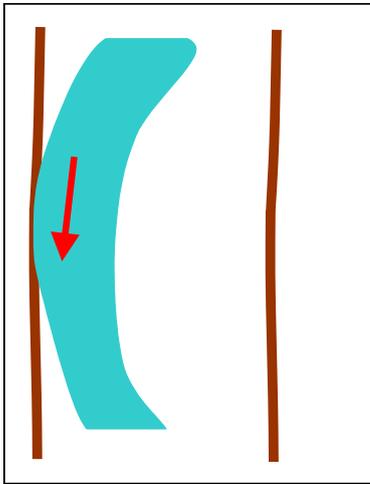


Ce phénomène augmente la vitesse et diminue le parcours curviligne vers la mer. L'érosion du lit augmente, la rivière se creuse. La pente de la ligne d'eau augmente localement. La pente du lit bascule créant des abaissements des fonds à l'amont, pouvant être très dangereux pour la stabilité des berges.

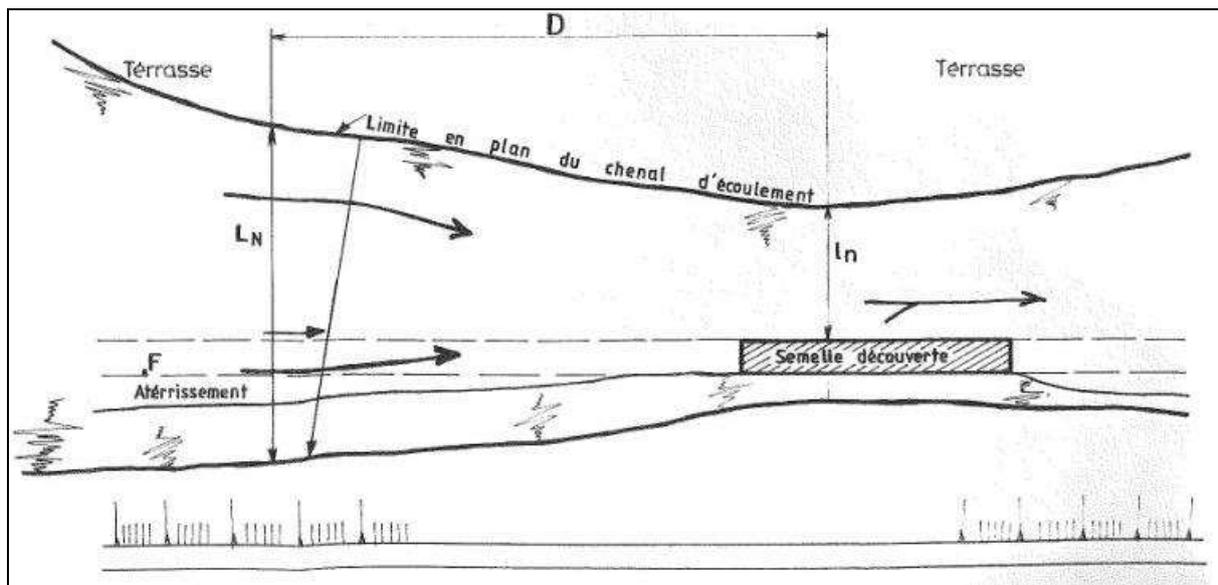
### 5.1.2 Crue moyenne (Q10)

Pour ce type de crue, on observe un bras vif assez rectiligne, n'occupant qu'une partie du lit. Ces crues relativement fréquentes, sont très dangereuses par leur

capacité d'érosion en pied de berges et en capacité d'abrasion des matériaux car les vitesses atteintes sont très élevées (8 m/s ou plus).



Ce phénomène est détaillé sur les graphiques extraits du rapport [28].

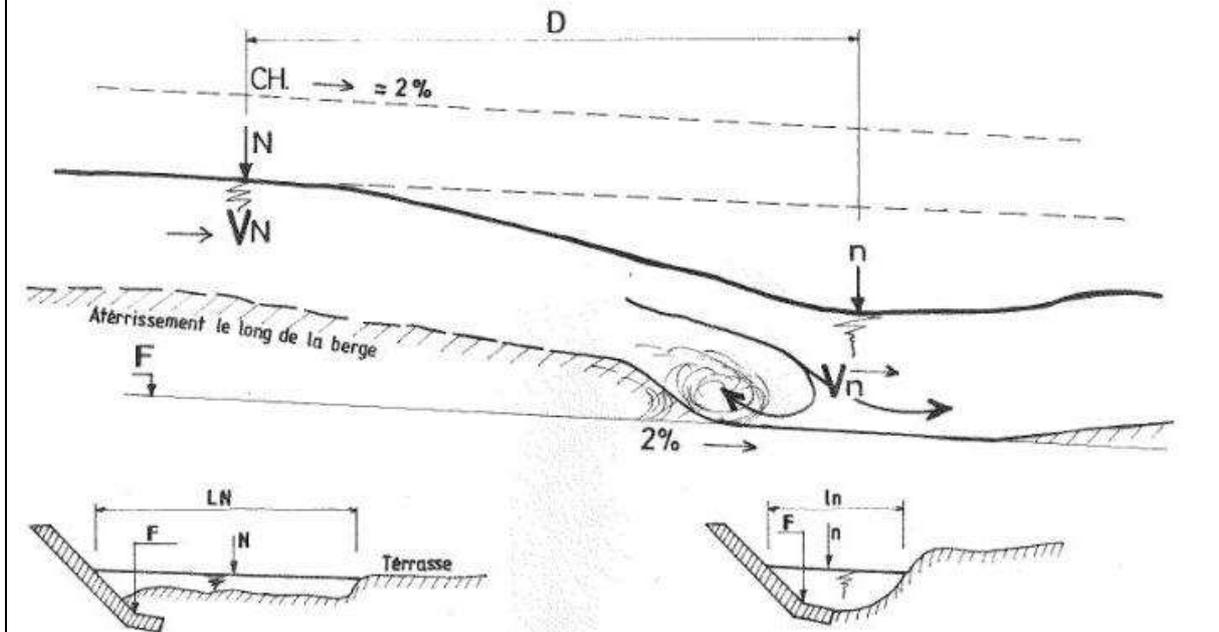


Vue en plan

# Écoulements longitudinaux concentrés le long de la berge

Schéma N°2  
Pièce N° 74

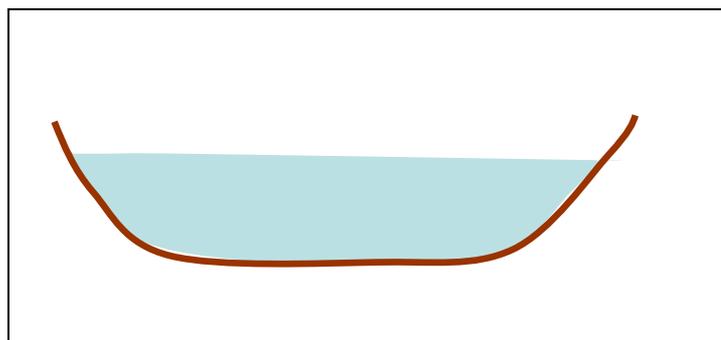
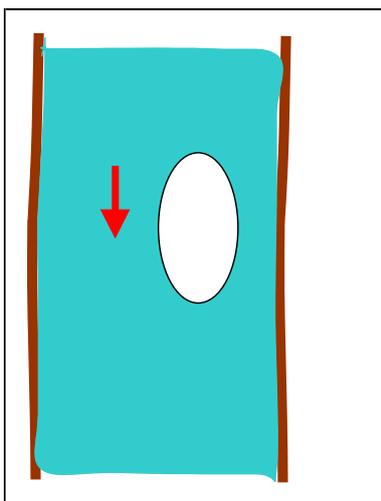
Schéma de principe simplifié



Profil en long et coupes

## 5.1.3 Crue très forte (Q100)

Le lit occupe toute la largeur de la rivière, des îles de graviers pouvant subsister. Les vitesses sont généralement légèrement plus faibles que pour les crues moyennes car les niveaux sont bien plus élevés.



Ce débit peut être en termes de débordement et d'inondation, mais pas forcément d'attaque des berges.

### 5.1.4 Synthèse

On retiendra que :

- les crues **faibles et moyennes sont dangereuses** pour les **fondations** des ouvrages de protection,
- les **crues fortes sont dangereuses** du point de vue de la **submersion** des endiguements.

## 5.2 Equilibre morphologique

---

L'équilibre des fonds d'un bief de rivière coulant sur ses alluvions dépend :

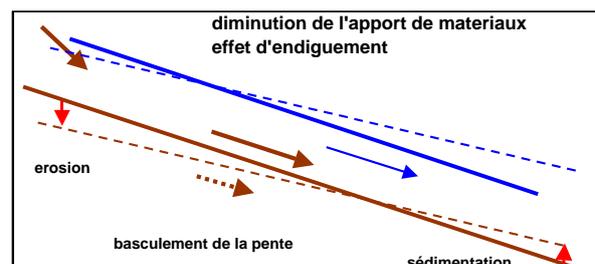
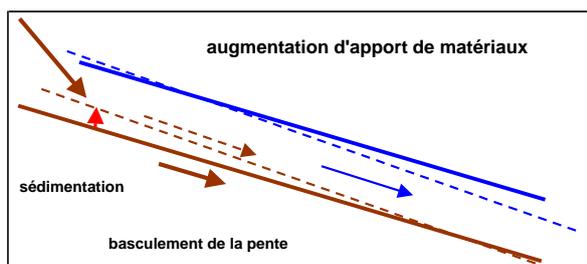
- de l'apport en matériaux solides venant de l'amont. Ces apports sont liés à la dégradation du bassin versant (érosion des terrains),
- de la capacité de transport solide de la rivière. Cette capacité dépend des caractéristiques de l'écoulement.

Dans le cas de la RdG, le lit était en équilibre avec une pente de 2.2% avant les extractions intensives de la fin des années 80 et de l'endiguement de la rivière [27]. Cela signifie que globalement le volume arrivant à l'amont d'un tronçon de la rivière est égal au volume repris pour alimenter le tronçon aval. A une échelle de temps plus courte, l'équilibre entre apports de matériaux et capacité de transport solide de la rivière donne naissance à des fluctuations des fonds appelées respiration des fonds.

D'une manière générale, les ruptures d'équilibre peuvent venir :

- d'apports solides en excès (éboulement dans le bassin versant type Branchard),
- d'apports solides déficitaires (effet d'extraction de matériaux),
- d'une modification de la capacité de transport du tronçon concerné (endiguement dans le cas de la rivière des Galets).

Les conséquences des ces causes sont schématisées ci-après :



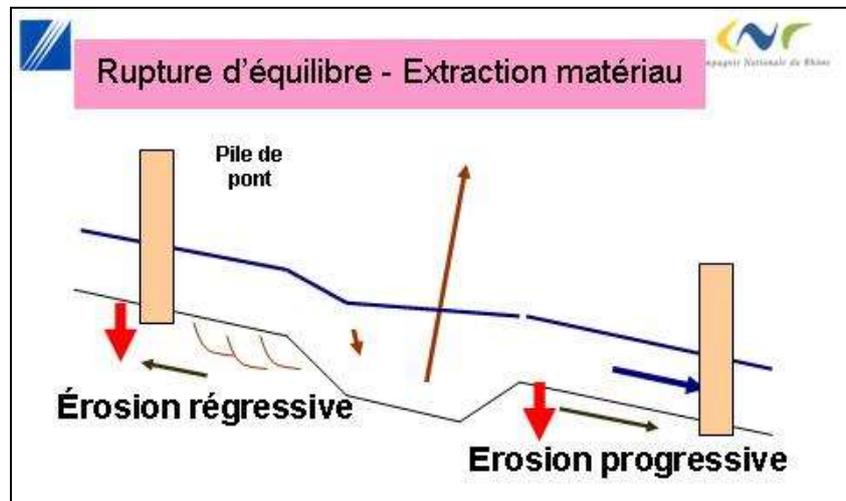
Évolution du profil en long suite à augmentation d'apport évolution du profil en long suite à réduction d'apports ou endiguement

Une augmentation des apports solides conduit au basculement de la pente et à un rehaussement des fonds pour un nouvel équilibre (schéma de gauche).

L'effet de l'endiguement de la rivière des Galets a été observé sur le modèle physique (passage d'une pente d'équilibre de 2.2% à une pente de 2% [13] à [18] voire 1.8% [37]).

### 5.3 Effet des extractions de matériaux

Les extractions de matériaux déclenchent une érosion régressive et progressive comme indiqué par le schéma ci après.



Les extractions sont préjudiciables à la stabilité des fondations des ouvrages tels piles de pont, endiguements, épis, que ceux-ci soient situés à l'aval ou à l'amont des extractions de matériaux. Dans le cas de la RdG les extractions massives ont été estimées par CNR, à partir des éléments en sa disposition, à 2 300 000m<sup>3</sup> entre 1988 et 1992 pour des apports s'élevant sur la même période à 100 000m<sup>3</sup> [27]. Cela représente une hauteur moyenne prélevée de 1.8 m sur la surface du cône de la rivière.

## 6 DONNEES DE BASE

### 6.1 Visites de terrain

---

Le chargé d'affaire a réalisé plusieurs visites de terrain pendant sa semaine sur place. Le mardi 20 février, jeudi 22 février et lundi 26 février pendant le passage du cyclone GAMEDE.

### 6.2 Analyse bibliographique

---

La DDE de la Réunion service SEECL, a réalisé la maîtrise d'œuvre travaux des ouvrages. C'est dans ce service que les documents d'archives concernant ce projet ont été consultés par le chargé d'affaire. Un premier tri sur place a permis de sélectionner 49 documents dont la liste est présentée en annexe. Dans la suite les références de ces documents sont notées entre [crochets].

**Ces documents concernent l'ensemble du bassin versant** de la RdG. Le détail du contenu de ces documents est présenté en annexe. L'analyse bibliographique suit les thématiques suivantes :

- apports solides du bassin versant ;
- la RdG avant son endiguement (pente, blocométrie, coulée boueuse) entre la sortie des gorges et la mer ;
- impact de l'aménagement sur le littoral ;
- prélèvements de matériaux dans la RdG jusqu'en 1992 ;
- évolution des fonds entre 1967 et 1992 ;

Un résumé concernant chaque thème est présenté ci-après.

#### **6.2.1 Apports solides du bassin versant**

L'érosion du cirque de MAFATE est avancée par rapport aux deux autres cirques de l'île. Les volumes solides disponibles sont donc réduits par-rapport aux autres cirques [10].

## **6.2.2 Données générales concernant la RdG**

### **a) Pluviométrie**

La pluviométrie moyenne journalière sur le bassin versant est donnée par le tableau suivant :

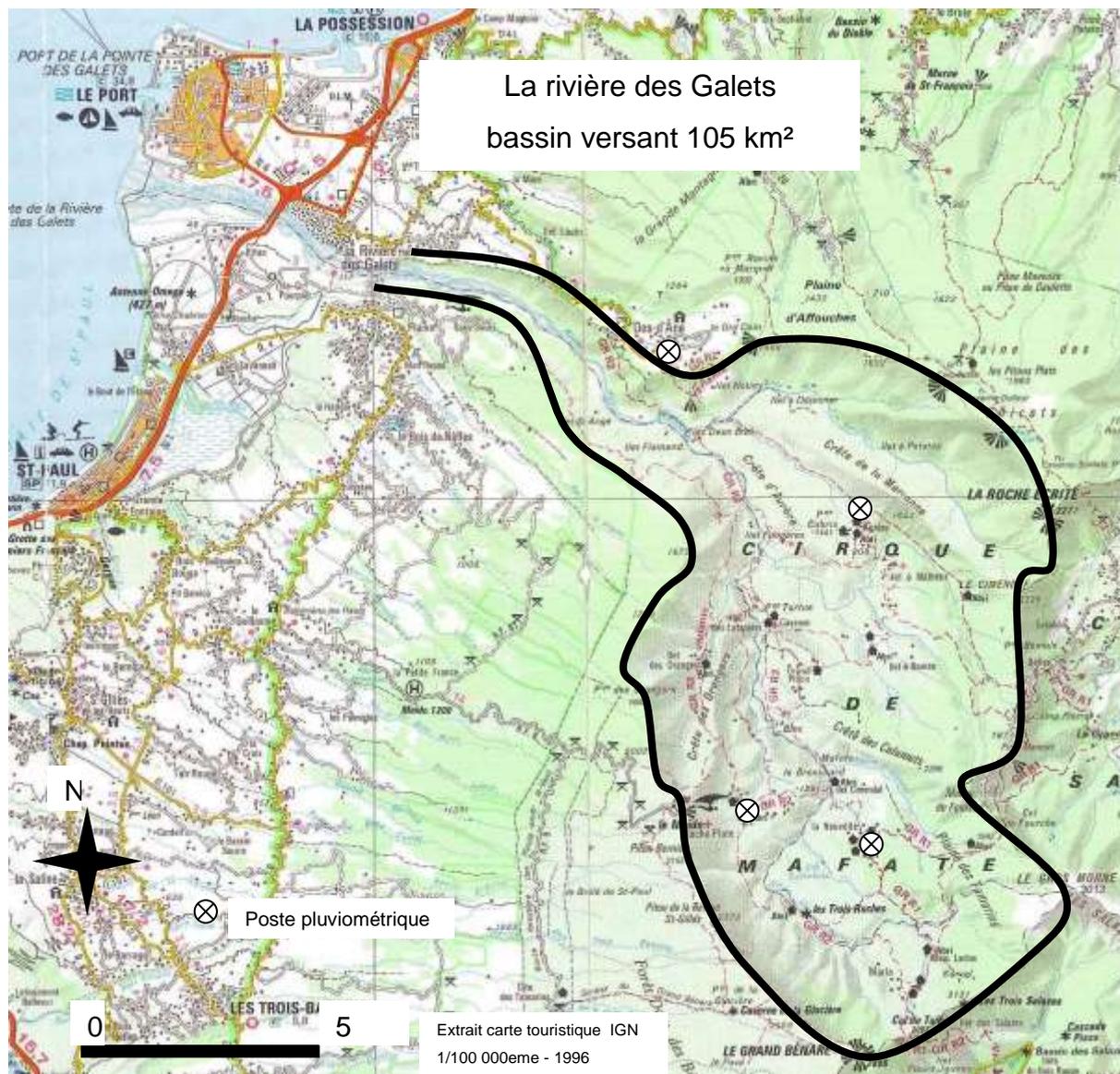
Pluie journalière	[10]
P <sub>J2</sub> mm	250
P <sub>J10</sub> mm	620
P <sub>J100</sub> mm	1100

### **b) Hydrologie**

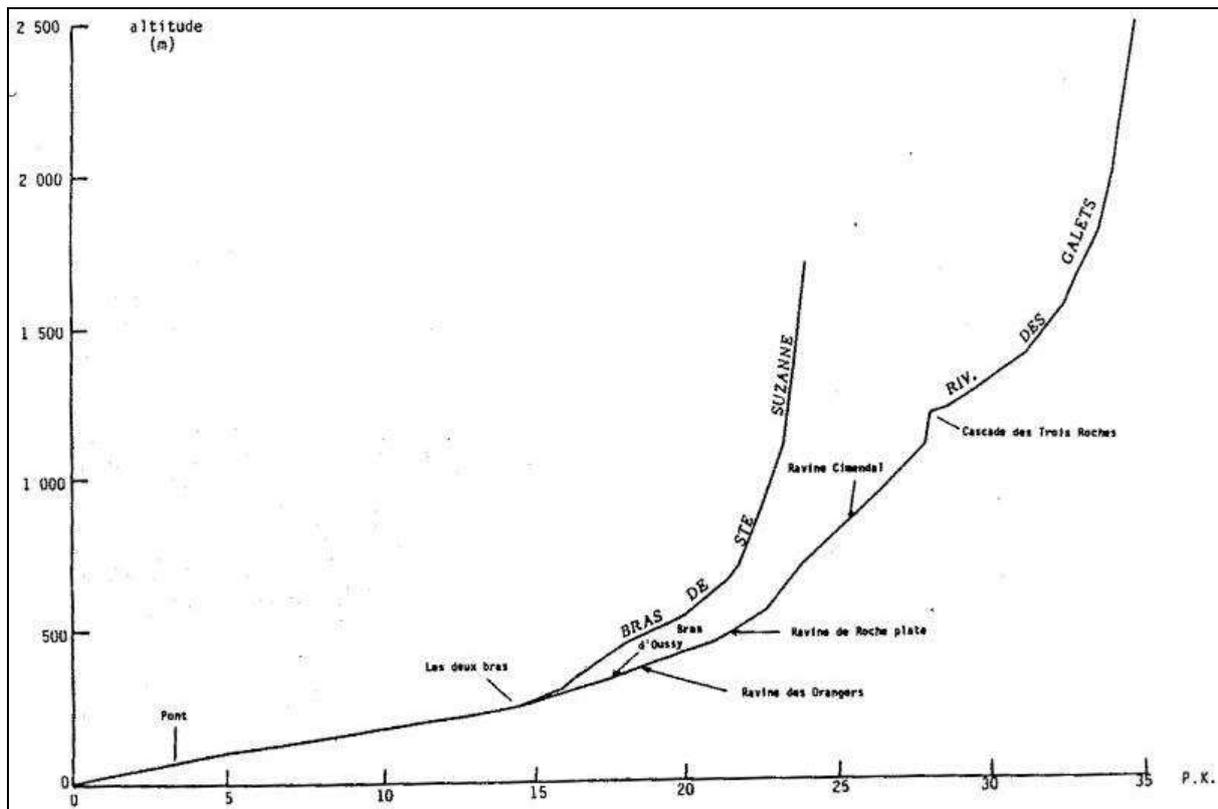
Les débits de pointe de crue sont présentés dans le tableau ci-dessous [33] :

Période de retour	Débit m <sup>3</sup> /s
Q2	740
Q5	1300
Q10	1570
Q100	2440

La carte ci-après présente les limites du bassin versant ainsi que la localisation des postes pluviométriques du bassin.



Le profil en long de la RdG est extrait du rapport [34]. Il est présenté ci-après.



### c) Courbe granulométrique des sédiments

Le lit de la RdG est composé de galets émoussés. La taille de ces galets est fournie par les fourchettes suivantes :

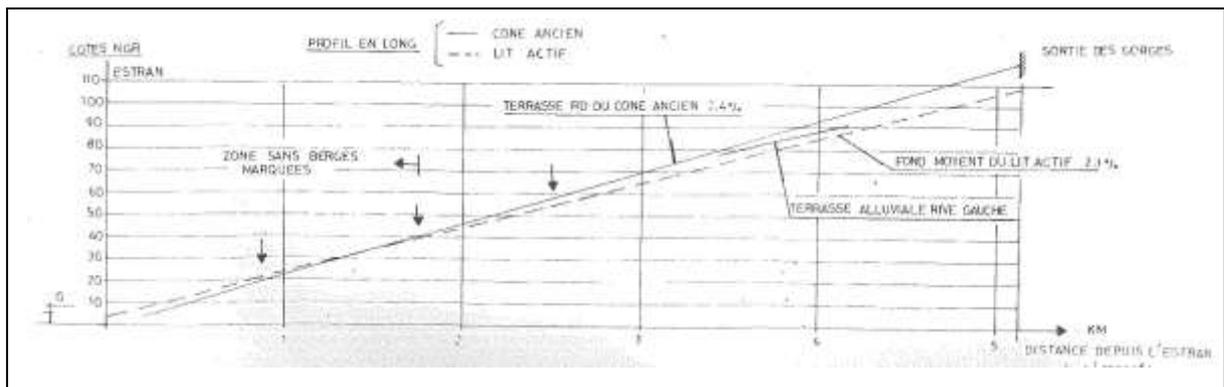
- $d_{max}$  égal à 1m environ,
- $d > 0,4m$  compris entre 5 et 22 %.[29],
- $d_{50}$  compris entre 0.1 et 0.17 m,
- $d_{10}$  compris entre 0.0008 et 0.013 m.



Le lit de la RdG sous le pont de l'axe mixte. A titre de comparaison, le diamètre des piles est de 2m

#### d) Pente naturelle avant aménagement

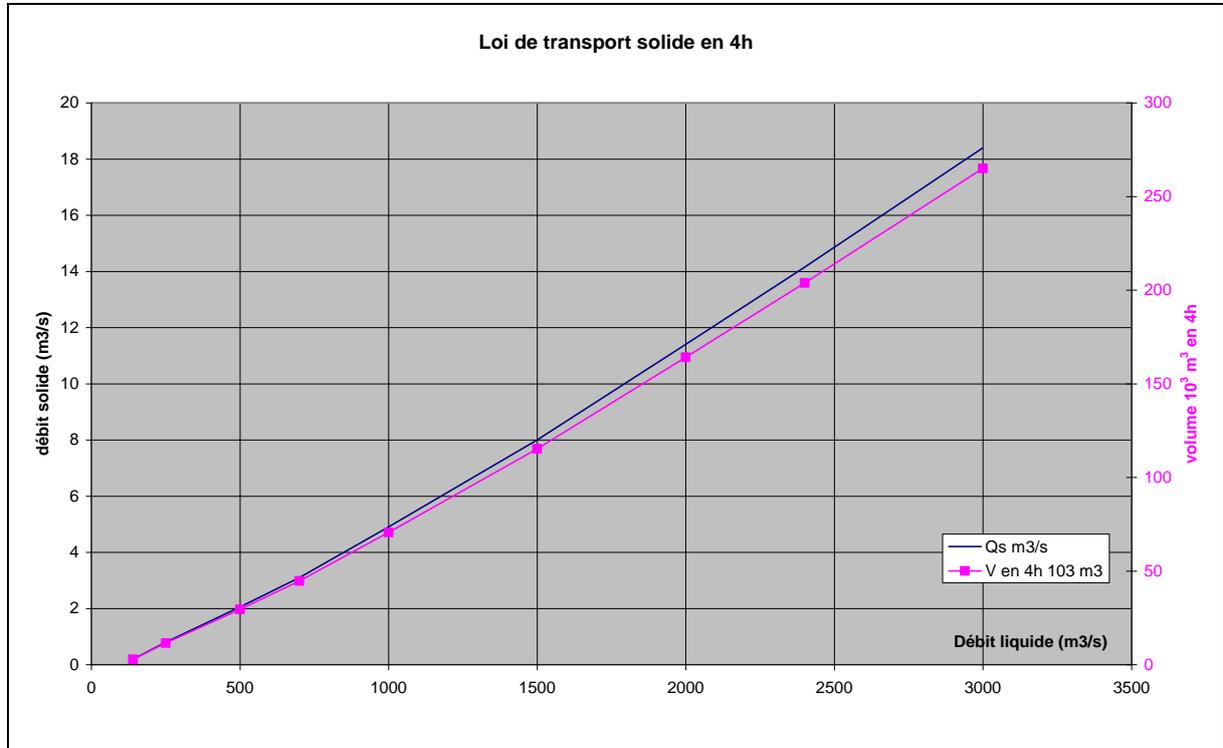
Le schéma ci-dessous extrait du rapport [23] indique que le cône de la RdG 'naturelle' (avant aménagement) avait une pente de 2,1%. Ce cône s'est développé dans l'ancien cône de la RdG qui a une pente de 2,4 % [23]. Cette différence de pente montre que la RdG à une capacité de transport solide qui s'est réduit avec le temps. La taille des galets transportés s'est également réduite.



Il est probable que les bras vifs du lit naturel de la RdG coulaient sur un fond plus ou moins pavé. Ce point sera détaillé dans la suite du rapport.

### e) Transport solide [27]

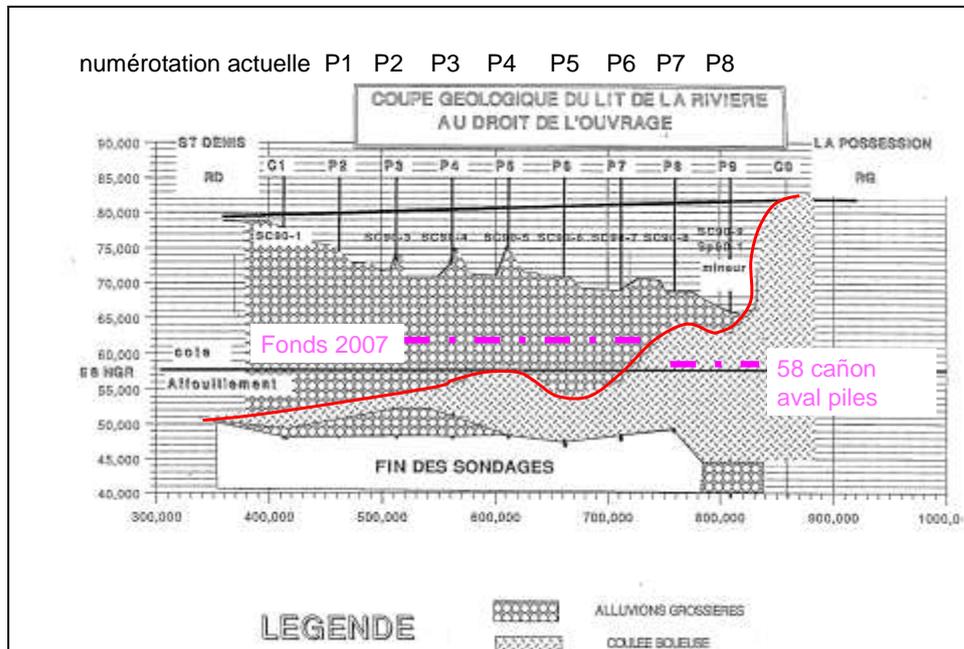
La loi de transport solide retenue sur la RdG est présentée sur le graphique suivant. Cette loi inclut le transport solide des sables de la RdG.



Le débit de début d'entraînement des matériaux de fond est estimé à 140 m<sup>3</sup>/s.

## f) Géologie et coulée boueuse

Une coulée boueuse s'étend en RG du piton Batard jusqu'aux ponts de la RN1. Sous le pont béton la coupe de la coulée boueuse est la suivante :

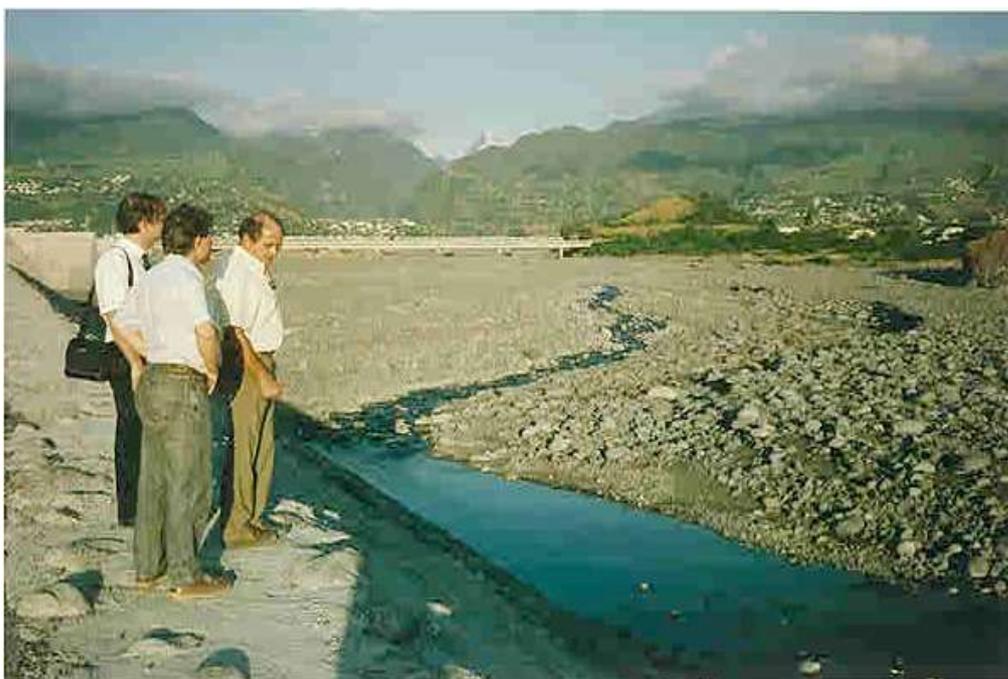


Extrait rapport Laboratoire Départemental de l'Équipement de la Réunion  
Janvier 1991 – 90 RE 2406 SFD 697

Cette coupe a été réalisée à partir de 8 sondages effectués par l'entreprise Bachy : culée 1 et piles 3 à 9 (ancienne numérotation). Ces sondages étaient destinés à la construction d'un nouveau pont entre les deux ouvrages existants, projet qui a été abandonné au profit de l'axe mixte.

Le pendage de la coulée boueuse est important. La culée RG, les piles P7 et P8 du pont béton sont fondées sur cette coulée.

Auparavant, les alluvions couvraient entièrement les coulées boueuses :



Photos CNR 1994

Actuellement à l'aval des ponts de la RN1 le substratum rocheux de la RdG est découvert sur plus de la moitié de la largeur de la RdG comme le montre la photo suivante.

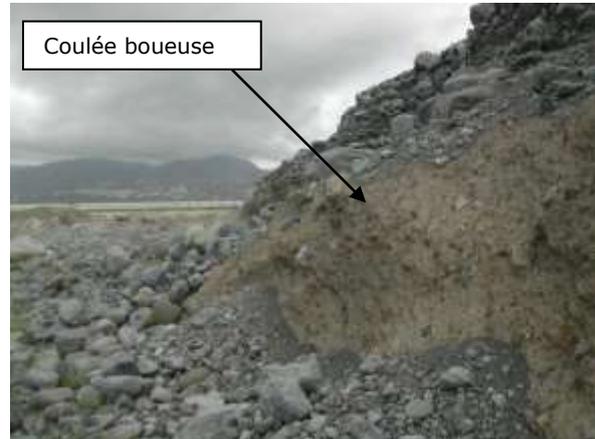


Vue aérienne vers l'amont mars 2007

Ce substratum est un Lahar appelé également coulée boueuse. La coulée boueuse est constituée de débris rocheux anguleux de nature pétrographique et de taille hétérogène, emballés et soudés dans une matière argilo-sablo-gravillonnaire gris brunâtre clair, assurant une certaine cohérence de l'ensemble.



Vue du canon depuis la RG à l'aval des ponts de la RN1



vue d'un affleurement de la coulée boueuse

Cette formation s'est développée entre 350 000 et 250 000 ans BC [19]. La coulée a été considérée comme résistante pendant toute la durée des études et des chantiers. Depuis 2004, la mise à nu de ce substratum montre qu'il est fragile à l'abrasion de la RdG.

En 2001, La CNR a proposé à la DDE-SGT de tester la résistance à l'abrasion des coulées boueuses.

Extrait du rapport du laboratoire CNR de février 2002 :

Deux échantillons préalablement repérés sur le site et représentatifs des zones les plus importantes ont été prélevés à la fin de l'été 2001. Ils ont été découpés à la scie diamant pour éviter de les déstructurer, conditionnés dans des caisses en bois et livrés au laboratoire en décembre 2001.

Les 2 échantillons d'un volume unitaire de 50 litres environ ont été photographiés (photos n° 3 et 4 de l'annexe). Ils sont constitués visuellement d'éléments volcaniques durs (basalte) d'une taille comprise entre quelques millimètres et plusieurs centimètres, cimentés par une matrice très fine, d'une teinte variable du gris clair au brun ou au gris sombre.

#### ANALYSES MINÉRALOGIQUES

A partir de fragments prélevés sur les 2 blocs livrés, une analyse de 3 lames minces + 1 sur le sable de sciage induré dans une résine ont été pratiqués par une société spécialisée.

Les résultats sont joints en annexe.

Différentes roches sont identifiées. Certaines, telles que les dolérites s'altèrent facilement sous l'action de l'eau en prenant une teinte verdâtre.

Le ciment de l'ensemble, constitué de cendres volcaniques est globalement peu résistant.

On peut conclure de cette analyse que ces matériaux volcaniques appelés coulées boueuses ou LAHARS, sont constitués de roches de cohésion variable. Ce point est confirmé par la photo n°1 du site où l'on constate la présence d'une sorte d'éperon qui surmonte une zone en creux, plus tendre. La durabilité de l'ensemble est globalement faible

#### ESSAIS

##### Masse volumique

Des mesures de la masse volumique par pesée hydrostatique ont été faites sur 3 échantillons d'un poids compris entre 700 et 1400 g. Les résultats (jointés en annexe) montrent une faible dispersion des valeurs sur le matériau brut, elles sont comprises entre 2.34 et 2.37 g/cm<sup>3</sup>. La teneur en eau de ce matériau varie de 2.5 à 3 %.

Compte tenu de la masse volumique élevée des grains de basalte constitutifs (2.8 à 3.0 g/cm<sup>3</sup>), **la masse volumique** globale des coulées boueuses qui a été mesurée **est faible**.

##### Résistances mécaniques

Des carottages ont été engagés, pour permettre de réaliser les essais de compression.

On constate (photos 3 et 4 de l'annexe) que les blocs se désagrègent sous l'effet de la rotation de la carotteuse et de l'eau utilisée pour la lubrification.

Par conséquent, les essais de résistance en compression des blocs n'ont pas été réalisés.

Mais ce type de comportement confirme la faible cohésion du ciment interne

La valeur de la résistance en compression, par analogie à des matériaux rocheux tendres, peut être estimée à moins de 1Mpa.

La tenue aux chocs et à l'abrasion n'a pu être réalisée par manque de cohésion du matériau.

**La résistance aux chocs et à l'abrasion peut être considérée comme très faible.**

#### CONCLUSION

Les coulées boueuses présentes en rive gauche du pont de la RN 1 sur la rivière des galets ont un aspect (teinte granulométrie) et un comportement en place (éperon, zones creusées) assez hétérogènes

Les analyses faites sur les parties les plus représentatives et hors zone en éperon indiquent :

- une altérabilité de certaines roches
- une masse volumique moyenne de 2.35 g/cm<sup>3</sup>, qui est plutôt faible
- des résistances mécaniques et une cohésion faible.

Globalement, la durabilité de ces matériaux, sous l'effet de contraintes liées aux débits solides et liquides, est faible.

Bien que seulement deux d'échantillons testés, les lahars peuvent être considérés comme très peu résistants à l'érosion. Des mesures complémentaires seraient souhaitables, en particulier sur des carottages, pour estimer la résistance des lahars à diverses profondeurs. Les tests CNR devront être adaptés à la faible résistance rencontrée.

## **g) Situation des bras vifs, des ponts de la RN1 à la mer [23]**

De l'amont des ponts de la RN1 à la mer, depuis la mise en service de l'aménagement, les bras vifs de la RdG s'enfoncent sans divaguer d'un coté à l'autre de la RdG. Ce phénomène n'est pas récent.

Le rapport [23] d'octobre 1987 indiquait déjà ces zones préférentielles d'écoulement :

### Amont RN1 – Pont CFR (proximité amont de l'axe mixte)

- Aval piton DEFAUD : écoulement en rive droite provoqué par l'orientation du piton ;
- Piton BATARD : écoulement en rive gauche qui a provoqué en 1966 lors du cyclone DENISE la création d'un chenal entre le piton BATARD et la terrasse rive gauche, sur la commune de Saint Paul. Suite à cet épisode, une digue a été construite. Cette digue a été renforcée lors des travaux d'aménagement de la RdG entre 1992 et 1995.

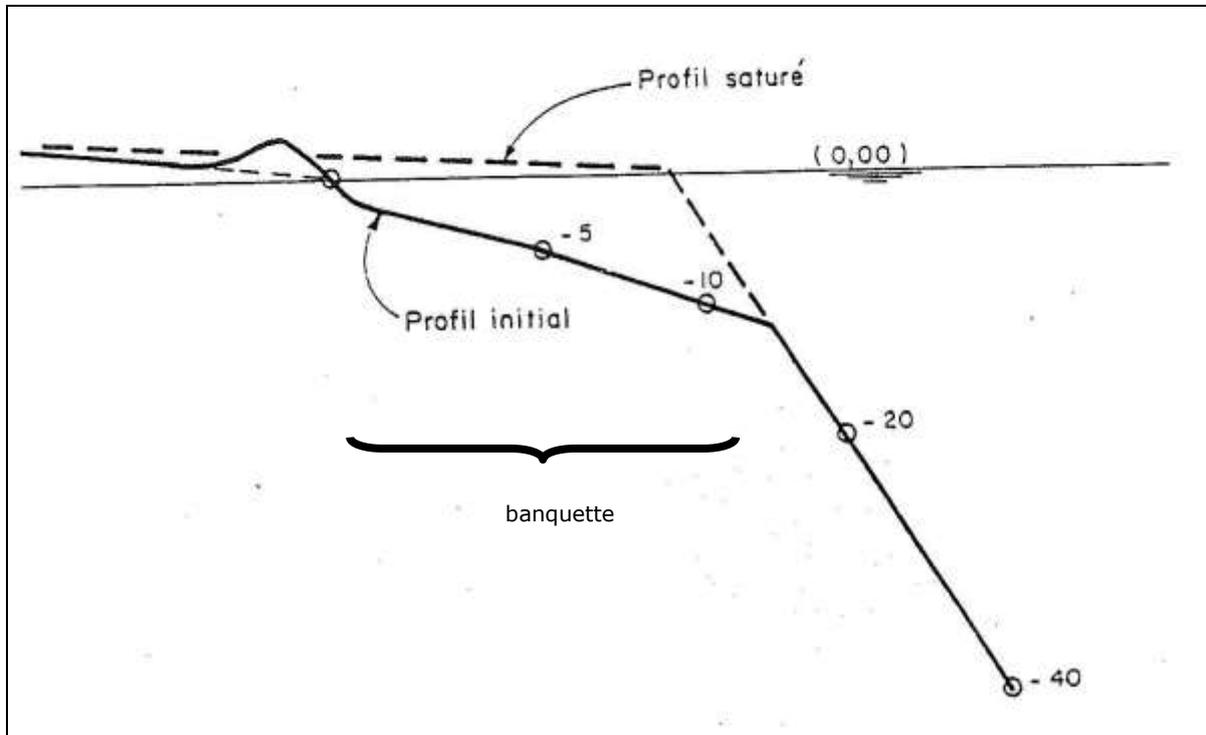
### Pont CFR – Océan

Au droit du pont CFR (Chemin de Fer Réunionnais), le lit s'est déplacé vers la rive droite en ruinant la culée du pont. En 1966 lors du cyclone DENISE l'érosion est entrée de 60m derrière la culée rive droite. En 1980 le cyclone HYACINTHE est entré de 200m dans la berge, plus au nord de la culée du pont CFR, et en 1988 CLOTILDA a de nouveau sollicité cette berge, mais des travaux d'urgence ont permis de limiter l'érosion pendant le cyclone.

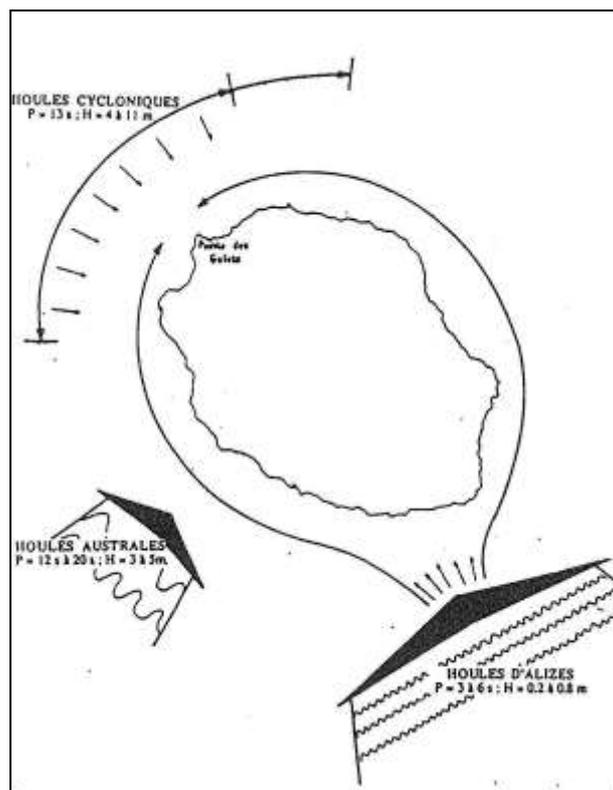
A l'aval, entre le pont CFR et la mer, les écoulements sont plutôt en rive gauche.

### 6.2.3 Impact de l'aménagement sur le littoral [20]

Lors d'une crue de la RdG, les sédiments se déposent en mer sur la banquette d'une centaine de mètres de large située entre les cotes 0 et -12m (voir croquis ci après extrait du rapport [34]).



Ces sédiments sont principalement repris tout au long de l'année par les houles australes (en moyenne 17 par an d'après [34]), qui les déplacent vers le nord en direction de la pointe des Galets. Les houles cycloniques qui apparaissent pendant la crue de la RdG n'ont pas un poids très important sur le comportement moyen du littoral.



Extrait [34]

D'après l'étude, l'endiguement de la RdG va provoquer une carence du transit littoral jusqu'à l'atteinte d'un nouvel état d'équilibre. L'étude propose la construction de deux épis le long du rivage entre la RdG et la ville du PORT.

#### **6.2.4 Prélèvements de matériaux**

Il n'existe pas de carrière sur l'île. Le lit des rivières dont celui de la RdG jusqu'en 1992, a constitué une source importante de matériaux de construction. En 1967, l'étude [1] indique que des prélèvements sont déjà réalisés. Mais c'est entre 1985 et 1990 que les carriers ont accru les prélèvements en les augmentant jusqu'à  $600\,000\text{m}^3$ , car ils sentaient la fin des autorisations proches [41]. En prenant l'hypothèse que les prélèvements en 1988 étaient de  $400\,000\text{m}^3$ ,  $500\,000\text{m}^3$  en 1989 et  $600\,000\text{m}^3$  à partir de 1990, on arrive à un volume prélevé de  $2\,300\,000\text{m}^3$  entre 1988 et 1992. Sur cette même période, l'étude [27] indique que les dépôts de la RdG ont été de  $100\,000\text{m}^3$ . Il apparaît un déficit de  $2\,200\,000\text{m}^3$  sur le cône de la RdG entre les ponts de la RN1 et l'océan sur cette période. Cela représente une hauteur moyenne de prélèvement de 1.8m.

A titre de comparaison, le basculement de pente lié à l'endiguement représente 4 millions de m<sup>3</sup> de l'amont des gorges à la mer (7.8 km).

Fin 1992, après le lancement des travaux, des profils en travers ont été levés par l'entreprise DUMEZ et le cabinet OIT-Méchy entre les ponts de la RN1 et l'extrémité aval du futur endiguement. Les constats suivants ont été faits [35] :

- Des ponts de la RN1 à l'extrémité amont de l'endiguement (profil P22-M9) le fond de 1992 est en moyenne 1 m au dessus du profil d'équilibre futur (pour mémoire ce profil est 3m plus bas que le profil d'équilibre avant aménagement de 1983) ce qui laisse un volume de matériau disponible d'environ 420 000m<sup>3</sup>.
- De l'extrémité amont de l'endiguement à l'axe mixte (profil P14-E8) le lit moyen de 1992 de la RdG se situe au dessus du fond d'équilibre futur, ce qui représente un volume excédentaire de 410 000m<sup>3</sup>. Cette analyse ne tient pas compte des 900 000m<sup>3</sup> de matériau pris en partie dans le lit pour construire l'endiguement (100 000m<sup>3</sup> d'enrochement pour la carapace [33], 450 000 m<sup>3</sup> au minimum pour le corps de digue [39] et 350 000 m<sup>3</sup> de remblais compactés pour les épaulements [45]).
- En aval du profil P14-E8 (axe mixte) jusqu'à l'extrémité aval de l'endiguement (profil P101) le fond moyen de 1992 se situe 2m en dessous du fond moyen futur ce qui représente un volume 'déficitaire' de 540 000m<sup>3</sup>. Au droit de l'axe mixte le fond moyen d'équilibre futur est 5 m plus bas que le fond moyen de référence de 1983.

Les conséquences de ces déficits sont décrites dans le rapport [35]. L'étude préconise :

- de descendre les fondations de l'endiguement de 2 à 4m ;
- de déplacer le terrain de l'amont vers l'aval ;
- de réduire à 1m la différence de niveau entre le fond du bras vif et le reste du lit qui forme une terrasse.

Par économie, il est décidé de ne pas réaliser ces travaux supplémentaires coûteux et il est préféré de conserver le projet dans sa version originale et intervenir ponctuellement sur les ouvrages chaque fois que des confortements seraient nécessaires.

## 6.2.5 Evolution des fonds de la RdG entre 1966 et 1996 [41]

### Sortie des gorges-ponts RN1

A la sortie des gorges (profil amont du P33), la superposition des campagnes topographiques montrent que le lit est stable entre 1966 et 1996.

**Epis, n°2**, profil P31, le bras vif de la RdG s'est enfoncé de 4m entre la campagne topo de 1983 et celle de 1989. Ce bras ne s'enfoncé pas après, mais il n'y a pas eu de crue importante entre 1989 et 1995 (maxi 680m<sup>3</sup>/s en 1993).

**Profil 29** (amont épi 4), le chenal de 1989 s'est enfoncé de 2.5m par-rapport à 1983. Il a peu évolué après.

**Epis n°6**, profil P26, le chenal ne s'est pas enfoncé (certainement stabilisé par l'affleurement de la coulée boueuse), mais c'est élargi sur une centaine de mètre de largeur en rive gauche entre 1989 et 1995.

La présente étude montera au chapitre 8.1 que depuis 1996, le bras vif ne s'est pas enfoncé à l'amont des ponts de la RN1.

### Des ponts de la RN1 à l'océan

Le lit de la rivière c'est fortement enfoncé sur ce tronçon suite aux prélèvements des carriers jusqu'en 1992. Le lit moyen s'est enfoncé de 2m environ par-rapport au lit moyen de référence de 1983. Il est rappelé que tous les essais sur modèle physique de 86/87 ont utilisé ce fond de référence de 1983 comme état initial sur toutes les simulations.

## 6.3 Photos aériennes

De nombreuses photos aériennes ont été prises sur cette RdG. Ces photos permettent de localiser la situation du bras vif de la RdG. Les photos disponibles sont les suivantes :

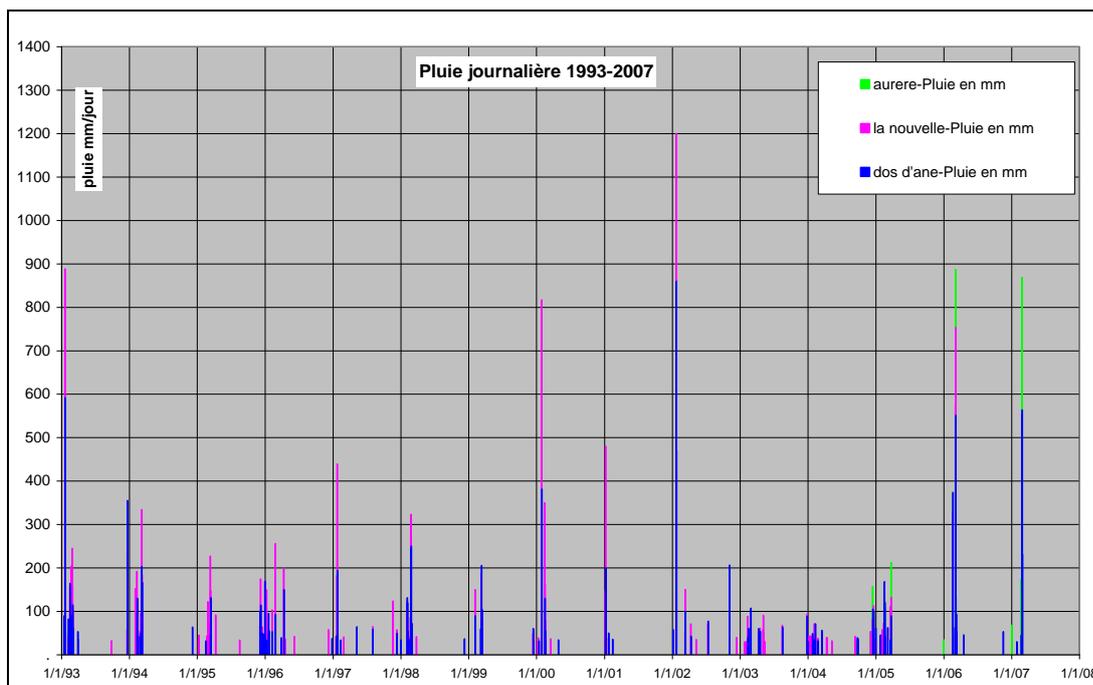
Date	Photos aériennes									
	1978	1984	1989	1996	1997	2000	2003	2004	2005	2006

## 6.4 Pluviométrie

Les données pluviométriques aux postes de La Nouvelle, Dos-d'âne et Aurère ont été fournies par météo France depuis 1993 (date du début des travaux d'endiguement). Le détail des données disponibles est fourni dans le tableau ci-après.

Poste pluvio	Période disponible	Altitude m NGR	Coordonnées géographiques	Code INSE
Dos d'âne	1/1/1993-27/2/2007	915	20°58'1 S 55°22'9 E	97408540
Aurère	12/9/2004-27/2/07	940	21°00'3 S 55°25'8 E	97408560
La Nouvelle	1/1/1993 au 17/4/2006	1415	21°03'8 S 55°25'7 E	97408580
Roche plate	HS	1100	-	-

Le graphique suivant montre que sur la période janvier 1993-février 2007, la hauteur de précipitation journalière maximale a été de 1200 mm à la Nouvelle en janvier 2002 (DINA). Ces précipitations ont provoqué la plus forte crue de la période : 1300m<sup>3</sup>/s.



## 6.5 Hydrologie

Le Service de l'Eau de la Réunion fournit des débits de crue de la RdG depuis 1989 à la station de Cap LEBOT. Cette série est complétée par les données du rapport [27].

Début crue	Pointe de crue	Débit m <sup>3</sup> /s	Nom
1980		1000 (1)	
1985		420 (3)	
1986		750 (4)	
1987		1200	Clotilda
1988		-	
1989		300	Firinga
1990		100	
1991		25	
1992		70	
19/1/1993	?	680	Colina
18/12/1993	21/12/1993 2h	180	
11/2/1994	11/2/1994 17h25	350	Hollanda
7/3/1994	9/3/1994	260	
12/3/1995	13/3/1995	150	Kylie
1996		50	Hansella
20/1/1997	24/1/1997 5h50	200	Gretelle
21/2/1998	25/2/1998 8h45	300	Perturbation
10/3/1999	10/3/1999 15h40	100	Davina
29/1/2000	29/1/2000 7h35	#400	Eline
7/1/2001	?	270	
22/1/2002	?	1200	Dina
2003		<100	
2004		<100	
2005		<100	
2006	18/2/2006	<1000(1)	
2006	3 au 5/3/2006	1300(1)	Diwa
2007	25 au 26/2/2007	1000(2)	Gamède

- (1) Estimation DDE  
 (2) Estimation non validée  
 (3) Estimation DDAF  
 (4) Estimation SOGREAH

On constate que depuis 1992 (date de début des travaux), les trois crues les plus importantes sont de 1200m<sup>3</sup>/s, 1300m<sup>3</sup>/s (fréquence quinquennale) et 1000m<sup>3</sup>/s. Elles ont respectivement eu lieu en janvier 2002, mars 2005 et février 2007. Elles ont provoquées :

- la découverte de la coulée boueuse,
- l'apparition de la semelle de l'endiguement aval,
- la déstabilisation de la carapace de l'endiguement aval et de la digue reliant l'épi n°4 à l'épi n°5.

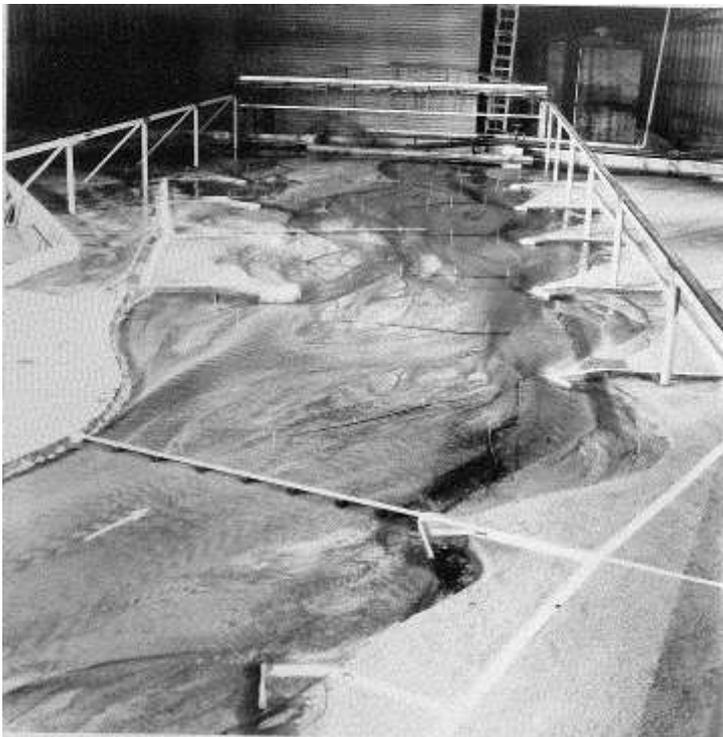
## 7 LES RESULTATS DES MODELES PHYSIQUES REALISES

### 7.1 Modèle physique Sogreah de 1968

Un modèle physique à fond mobile à l'échelle 1/200<sup>ème</sup> avec alimentation en continue en transport solide a été réalisé en 1968 par SOGREAH [2]. Ce modèle s'étend de l'amont du village de Rivière des Galets à la mer soit 5km nature. La loi de transport solide a été calée sur la pente d'équilibre du cône de la RdG observée en nature (environ 2.1%). Il est rappelé qu'une loi de débit solide de charriage trop important conduit à une pente trop forte par-rapport à celle observée en nature et inversement. La loi a été établie pour les 3 débits suivants :

- 1000 m<sup>3</sup>/s ;
- 2000 m<sup>3</sup>/s ;
- 3600 m<sup>3</sup>/s.

Le débit liquide de début d'entraînement généralisé des matériaux dans les chenaux est observé pour 250m<sup>3</sup>/s. Cette valeur est plus forte que celle retenue sur le modèle de 1986/1987.



Vue générale du modèle depuis le pont métallique de la RN1 vers l'océan

L'aménagement proposé comporte 10 épis en rive droite (de la sortie des gorges à la mer) et 4 épis en rive gauche du piton BATARD à la mer. Cet aménagement avait pour objectif de fixer le lit de la RdG et de protéger les berges contre l'érosion.

## **7.2 Modèle physique Sogreah de 1986/1987**

---

Le projet d'endiguement de la RdG a été élaboré à partir d'essais sur modèle réduit physique à l'échelle du 1/125<sup>e</sup>, réalisé sur l'Ile de la Réunion, avec alimentation solide en continu à l'amont. Ces essais ont fait l'objet de plusieurs phases (notées I à IV), rapports [12] à [18] et [22]. Une synthèse de ces essais a été réalisée dans [35]. Cette synthèse est reprise et complétée dans les paragraphes suivants.

### **7.2.1 Phase I : Réglage et étalonnage du modèle [12]**

La comparaison des différentes campagnes bathymétriques disponibles a montré que le tronçon de rivière étudié est pratiquement en équilibre en l'absence d'extractions de matériaux dans le lit. La pente d'équilibre est de l'ordre de 2,16% (des gorges à la mer et 2.2% à l'aval des ponts de la RN1). L'objectif du calage du modèle est de trouver la loi d'alimentation en débit solide qui permette de retrouver cette pente d'équilibre.

Avant essais, le modèle est remis en état avec la bathymétrie de 1966. La chronique de débits reconstitués à partir des pluies journalières sur la période de 1966 – 1983 est appliquée en injectant le débit solide correspondant. La loi utilisée sur le modèle est une adaptation de celle retenue sur le modèle physique de 1968. Les résultats du modèle sont comparés avec la bathymétrie levée en 1983. Trois essais ont été réalisés pour obtenir un calage jugé satisfaisant (PIE1 à PIE3). Le calage retenu consiste en la suppression de la fraction 0.50 / 1m nature pour les débits liquides inférieurs à 700m<sup>3</sup>/s. Au-delà tout le spectre de la courbe granulométrique est injecté. Cette phase de calage a montré que :

- les matériaux utilisés sur le modèle contiennent des fines qui provoquent de la cohésion. Ce phénomène limite le transport solide sur le modèle par rapport à la nature. Ce point est mis en avant dès le 1<sup>er</sup> essai puis n'est plus abordé dans la suite ;

- les matériaux du modèle ont une forme anguleuse (matériaux concassés) alors qu'ils sont arrondis en nature. Cette forme rend les matériaux du modèle plus stables que ceux nature ;
- le déversoir à l'aval du modèle qui permet de fixer le niveau de la mer n'est pas assez long Ce déversoir a du être modifié pour les phases suivantes ;
- la bathymétrie est relevée automatiquement par un limnidyn (chariot équipé d'un capteur de niveau se déplaçant sur une poutre). 10 profils en travers sont équipés de ce dispositif. Les mesures sont réalisées en fin de journée après chaque jour d'essai. La flèche maximale de la poutre est limitée à 15mm, ce qui fait quand même 1.87m nature ! Bien que ça ne soit pas indiqué, on peut supposer que ce biais à été pris en compte pour correction des mesures.

Les essais PIE4, PIE5B et PIE6 ont été des essais prospectifs du fonctionnement de la rivière pour un cycle hydrologique représentatif d'une durée de 60 ans. Pour chacun de ces essais des ajustements de la loi d'injection du débit solide ont été faits.



Vue générale du hall d'essais

## **7.2.2 Phase II : Impact des aménagements sur la morphologie**

### **[13]**

Cette phase permet de mesurer l'incidence de l'endiguement à l'aval des ponts de la RN1 sur la morphologie de la rivière. Trois configurations ont été testées lors de cette phase :

- PII E1 : endiguement large de 450m du piton Batard à la mer,
- PII E1 ext : idem PII E1, mais avec une fosse d'extraction à l'aval des ponts de la RN1,
- PII E2 : endiguement étroit de 220m du piton Batard à la mer.

Dans les trois cas, de la sortie des gorges à la RN1, les terrasses en rive droite étaient protégées par un perré continu. Le perré était plus avancé dans le lit pour l'essai PII E2. Pendant toute la durée de l'essai PII E1, les sédiments se sont accumulés en mer. Pour les deux autres essais, les sédiments étaient évacués à la fin de chaque journée. Les niveaux de l'essai PII E1 sont donc surestimés le long du tronçon proche de l'océan.

**L'essai PII E1** fait apparaître des affouillements de 14m de profondeur par rapport au fond initial de 1983 dans la zone des ponts de la RN1. Les affouillements atteignent 12m en rive droite au droit de l'entonnement de l'endiguement amont. Le rapport indique page 13 : «... nous notons les effets « néfastes » du développement des réflexions et du méandrement pour l'endiguement large avec « l'avantage » de zones non affouillées ». Cette solution est écartée.

**L'essai PII E1 ext** provoque une érosion progressive intense, avec un affouillement en rive droite en face du piton Batard qui atteint -26m. Cette solution est écartée.

**L'essai PII E2** s'approche beaucoup de la solution qui sera finalement retenue par le maître d'ouvrage (largeur retenue de 250m entre digues). La largeur de 220m retenue entre digue pour l'essai PII E2 est égale à la somme des largeurs des chenaux observés lors de la phase I. L'endiguement testé a un fruit de 2H/1V (celui retenu sera de 3H/2V) et ne comporte pas de semelle en pied. Cette dernière disposition permet d'observer les profondeurs maximales

d'érosion en pied de digue (FMINI sur le profil en long joint ci-après). Le modèle montre que l'affouillement atteint 8m de profondeur par-rapport au fond moyen de 1983, dans la zone des ponts de la RN1. Cette profondeur est moins importante que pour l'essai PIIE1 car le perré à l'amont limite la réflexion de l'écoulement sur l'avancée rocheuse en rive gauche. Ces affouillements atteignent 16m à l'entrée de l'entonnement de l'endiguement et diminuent à 8m plus en aval. Il est intéressant de noter la remarque faite sur le rapport page 11 : « *Notons que cet effet (affouillement à l'entrée de l'entonnement rive droite de l'endiguement) est peut-être en partie amplifiée par le fait que l'essai PIIE2 a été réalisé après l'essai PIIE1 ext ; la zone occupée par la fosse de décantation bien que remplie avec un matériau « tassé » était pour cet essai peut-être un peu plus érodable* ». C'est certainement ce phénomène qui s'est produit au pied de l'endiguement nature. Les travaux ont nécessité de remobiliser le lit de la rivière jusqu'aux semelles des ouvrages supprimant ainsi la cohésion du lit. C'est ce qui peut expliquer en partie l'enfoncement du bras vif le long de l'endiguement.

Le rapport conclut : « *Pour l'endiguement étroit, les deux rives sont plus uniformément concernées avec des développements d'affouillements qui semblent du même ordre de grandeur...* ».

Les vitesses mesurées le long des berges sont les suivantes :

Débit total m <sup>3</sup> /s	Vitesse m/s
600	5
1200 à 1500	5,5 à 9,5
2000	8,5 à 10,5
2400	8,5 à 11

Pour chaque essai de cette phase, le débit liquide injecté à l'amont du modèle suit le cycle prospectif n°2. Ce cycle représente une période de 50 ans nature, dont un hydrogramme type HYACINTE (1980) et une crue centennale. Les crues se succèdent les unes après les autres (les périodes sèches ne sont pas simulées), ce qui représente 181 paliers de crue de 4h nature chacun. L'échelle des temps sédimentologique du modèle est le 1/11.18<sup>ème</sup>. La durée totale d'une simulation dure (181x4)/11.18 = 61h21' soit un peu moins de 9 jours d'essai à raison de 7h par jour. L'enchainement des crues est donc ajusté pour qu'à la fin de chaque journée, l'essai finisse sur une fin de crue. Après chaque fin de journée d'essai, les limnidyns mesurent la bathymétrie sur les 10 profils équipés.

Pendant l'essai, des mesures ponctuelles à la lunette sont également réalisées pour quantifier le niveau minimal d'érosion au pied des ouvrages.



Limnodyn utilisé pour le levé automatique des profils en travers

L'analyse de l'évolution des fonds des 10 profils en travers équipés de limnodyn a été réalisée à partir de quatre paramètres :

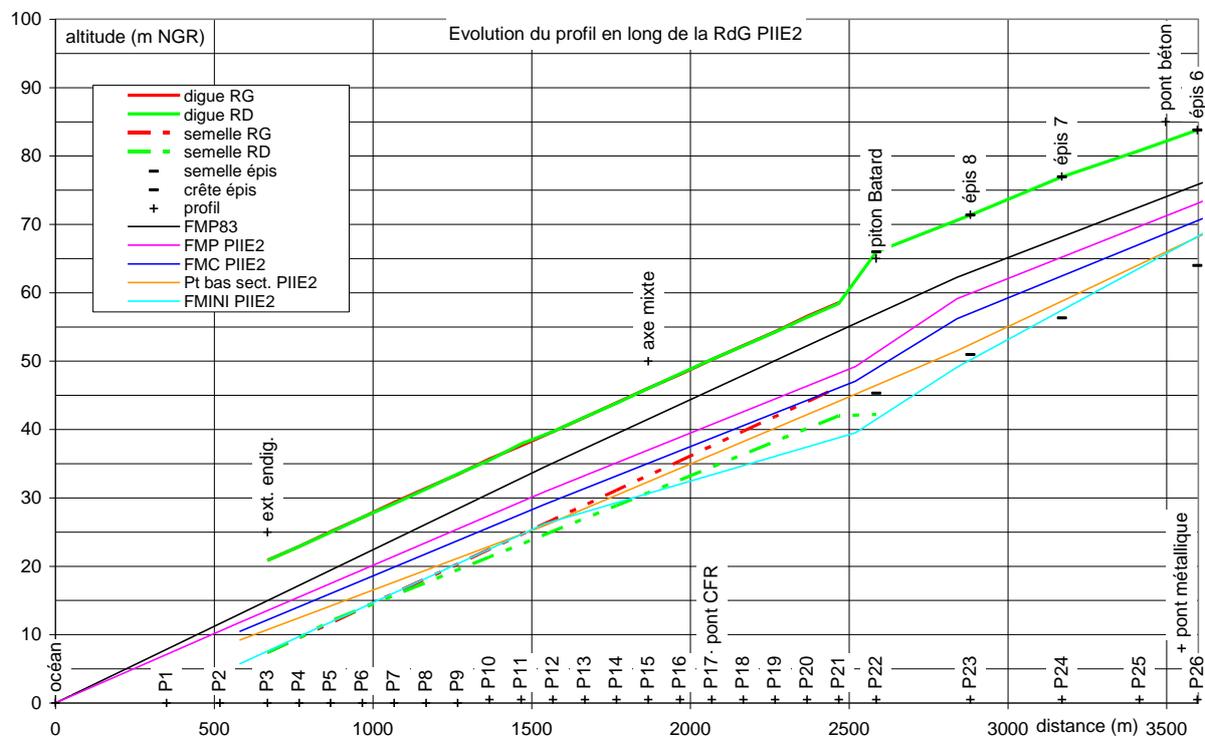
- **niveau du fond moyen du profil (FMP)** levé par le limnodyn,
- **niveau du fond moyen des chenaux (FMC)** (il n'y a qu'un chenal dans la partie endiguée) extrait du profil levé par le limnodyn. Ce chenal est aussi appelé bras vif dans le rapport,
- **niveau du point bas de la section levée (Pt bas sect.)** par le limnodyn (après crue),
- **niveau minimum pendant la crue (FMINI)** relevé à la lunette pendant l'essai sur le profil équipé d'un limnodyn.

Ces quatre niveaux sont reportés sur le profil en long ci-après. Sur ce graphique figure :

- les ouvrages effectivement réalisés (courbes vertes et rouges de la crête et du dessus de la semelle, de l'endiguement aval, ainsi que les tirets noirs représentant le dessus des semelles des épis),
- les résultats de l'essai PIIE2 (courbes noire, rose, bleue, orange et bleue claire).

Cet essai est proche de la solution retenue. Parmi les quatre phases de test réalisées entre 1986 et 1987, c'est la seule où la profondeur des affouillements

est mesurée en cours de crue (FMINI). D'après [22] le niveau minimum atteint par les affouillements durant cette phase n°2 est le même que celui qui apparaîtra lors de la phase IV des essais.



On constate que :

- le fond d'équilibre naturel (FMP 1983, courbe noire) à une pente de 2.2% à l'aval des ponts de la RN1.
- Le fond après endiguement (FMP PIIE2, courbe rose) s'établit avec une pente de 2%. Ce basculement est provoqué par l'augmentation de la capacité de transport solide du tronçon endigué,
- Le fond moyen des chenaux (FMC PIIE2, courbe bleu foncé) s'établit 2m environ sous le fond moyen du profil,
- Le point bas de la section en fin de crue (Pt bas section PIIE2, courbe orange) est 2m à 2.8m au dessous du fond moyen des chenaux,
- La cote minimale atteinte par l'affouillement au pied de la digue au cours de la crue (FMINI PIIE2, courbe bleu clair) est plus basse que le point bas de la section en fin de crue (courbe orange). Pendant la décrue le fond du bras vif se rebouche. L'écart avec le point bas de la section est nul au centre de l'endiguement, vaut 5.5m à l'extrémité amont et 3.5m à

l'extrémité aval. A l'extrémité amont de l'endiguement le niveau de la cote minimale (39.5m NGR) est 10m plus bas que le fond moyen futur du profil (49.2 mNGR). La cote minimale atteinte par l'affouillement au pied de l'endiguement droit (39.5 m NGR) est sous la fondation de la semelle de l'endiguement (la ligne verte en pointillée représente le niveau du dessus de la semelle (42.0mNGR)). D'après [33] cette semelle a une épaisseur de 1.2m).

En synthèse, on retiendra que :

Le **fond moyen du profil (FMP)** est une valeur intéressante pour suivre **l'évolution du volume de matériaux déplacé** d'une campagne topographique à une autre. Cette valeur permet aussi une comparaison avec le niveau de la crête de l'endiguement, nécessaire pour vérifier si la revanche de la ligne d'eau de la crue de projet est suffisante. Actuellement, les fonds de la RdG sont tellement bas qu'il n'y a aucun risque de débordement par-dessus les endiguements.

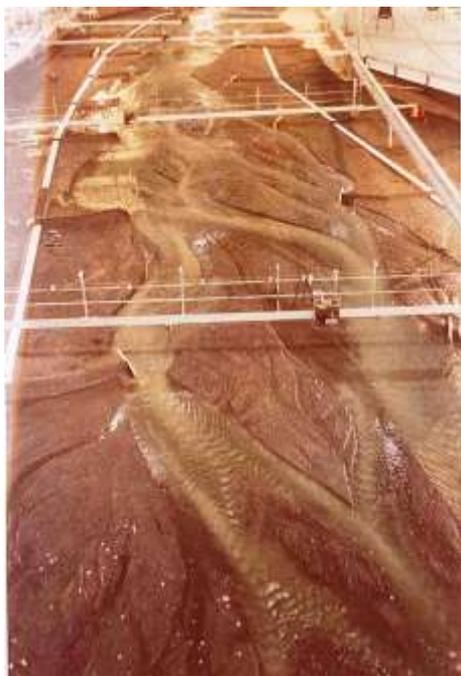
Parmi les 3 autres paramètres mesurés sur le modèle, il apparait que le niveau du **talweg** après crue (point bas de la section en fin de crue « **Pt bas sect.** ») est le seul facilement mesurable en nature qui puisse être comparé avec le **niveau de fondation des ouvrages**. Mais cette comparaison doit être faite avec prudence. En effet, les mesures sur le modèle physique, montrent que durant la crue les affouillements « **FMINI** » peuvent **descendre jusqu'à 5 m plus bas que ce talweg !**

### 7.2.3 Phase III : étude de différents type d'ouvrages

Six configurations d'aménagement ont été testées lors de cette phase de dimensionnement :

	Amont Piton Bâtard	Aval Piton Bâtard	Référence
PIII – E1	épis	Epis	[14]
PIII – E2	épis	largeur entre digues 250m	[15]
PIII – E3	épis	-largeur entre digues 180m -seuils de fixation	[17]
PIII – E41	épis	-largeur entre digues 250m -épis agressif en pied de digue	[18]
PIII – E42	épis	-largeur entre digues 150m -épis en pied de digue	[18]
PIII – E42 Exp.a	épis	-largeur entre digues de 150m -épis en pied de digue -seuil à l'aval ponts RN1	[18]

**L'essai PIII – E1** ne réduit l'espace de liberté de la RdG que de 50%. La largeur entre tête d'épis est de 300 à 350m et la largeur entre digue est de 500 à 700m à l'aval de la RN1.

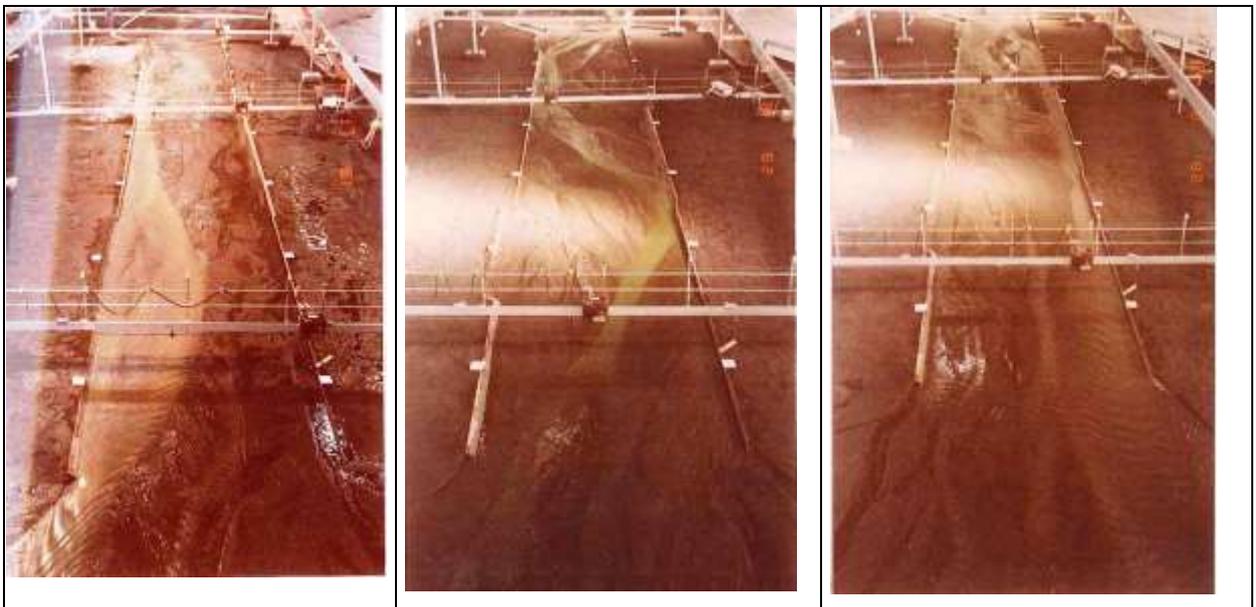


Vue générale du modèle vers l'amont

Les commentaires du rapport [14] indiquent que durant les longues séries de débits faibles ou moyens, un chenal principal très marqué s'installe dans le lit. Ce chenal évolue en général par comblement lors des débits forts et abandon après décrue. Cette solution est écartée.

**L'essai PIII – E2** représente un aménagement de géométrie proche de celle effectivement construite. Cet essai a permis la modélisation d'un endiguement de 250m de largeur entre le piton Bâtard et la mer avec différents types de protection de berge. L'orientation du chenal était plus centrale que lors de la phase II. Il a été observé une pente d'équilibre résultante dans le secteur endigué de l'ordre de 2%. Pour les protections de berge, différents types sont testés le long de l'endiguement :

- mur avec semelle en béton ;
- mur avec semelle en enrochements ;
- perré à 3/2 en blocs bétonnés avec semelle en béton ou semelle en enrochements ;
- berges à 3/1 protégées par des enrochements.



Vues vers l'amont de l'endiguement aval pour différents débit de crue

C'est le cycle n°4 qui est appliqué comme débit entrant. C'est un cycle à crues fortes. Il comporte 100 paliers de 4h nature avec le cyclone HYACINTE, une crue centennale, un cyclone type ERINESTA, une crue décennale, des débits soutenus

du type 1958-1959, de nouveau HYACINTHE et enfin une crue exceptionnelle de 3000m<sup>3</sup>/s.

**Sur la partie amont** de la sortie des gorges à l'amont des ponts de la RN1, le lit est stable.

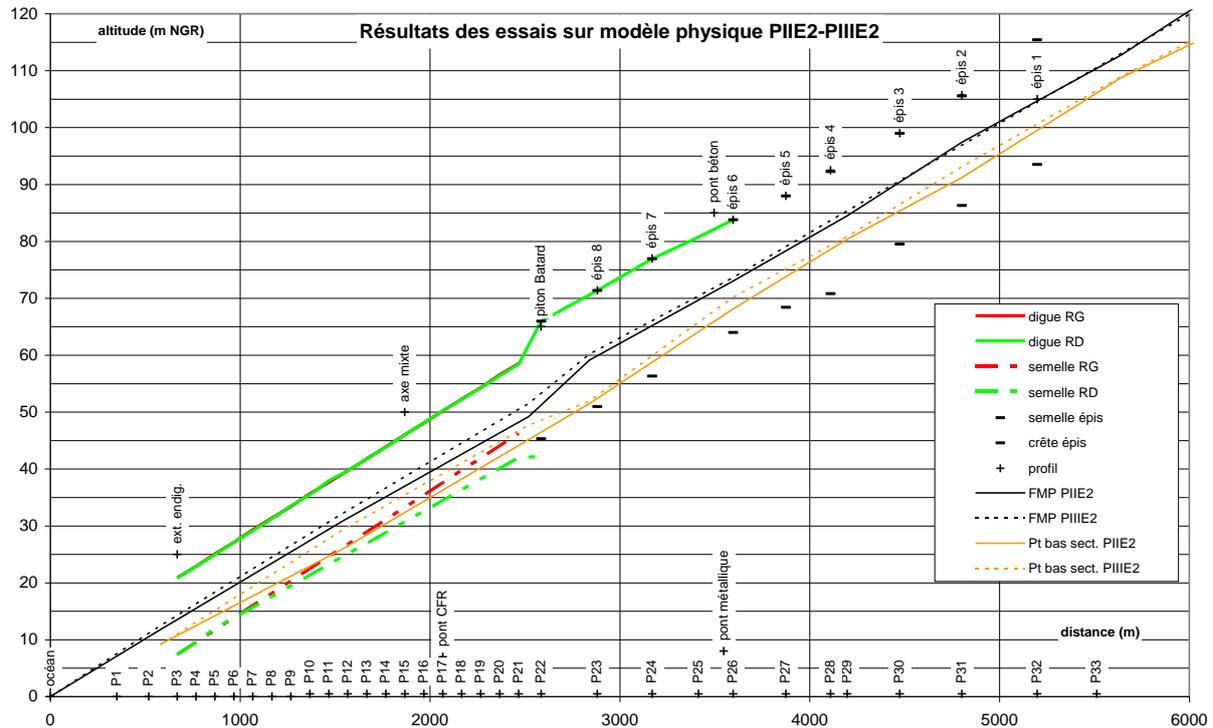
A l'approche des **ponts de la RN1** l'abaissement du lit s'amorce.

Dans la **partie endiguée**, les affouillements observés sont restés limités au niveau supérieur des semelles prévues. Seules la crue exceptionnelle de 3000m<sup>3</sup>/s a provoqué un déchaussement des semelles notamment en aval rive gauche (profil P6). Pendant la pointe de crue la vitesse a atteint 11 m/s le long du parement, au droit du pont CFR. L'arase des berges est 5m au dessus du fond moyen. Au cours de l'essai il n'y a pas eu de submersion, ce qui indique que la revanche est suffisante.

La partie **aval de la section courante endiguée**, (profil P1) est particulièrement stable. On note un enfoncement lors de longues séries de paliers de faibles débits à 100 m<sup>3</sup>/s et à 300 - 400 m<sup>3</sup>/s avec la création d'un chenal unique.

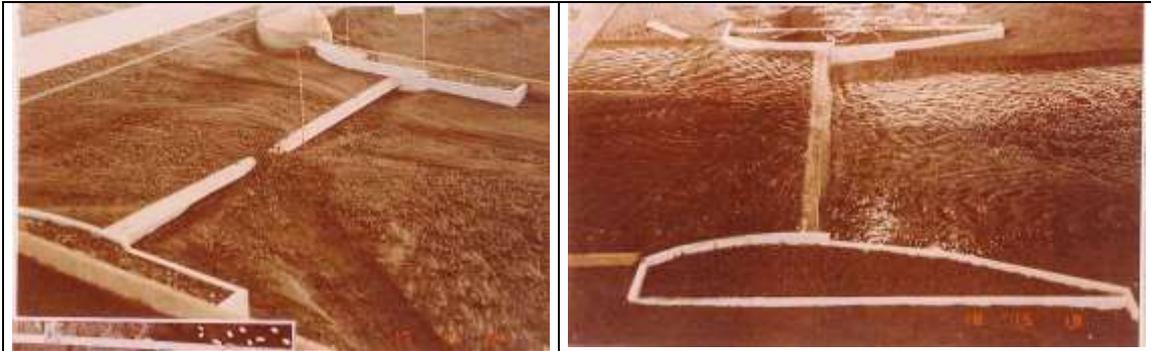
Il est proposé pour l'essai suivant de mettre en place des épis plongeant le long de la digue afin de contrarier l'effet de fixation des chenaux privilégiés le long des digues – voir PIII E3.

Les résultats du modèle physique sont repris sur le profil en long suivant :



On constate que la courbe orange en pointillés « Pt bas sec PIIIE2 » (point bas de la section) est systématiquement au dessus de la courbe orange en trait continu (PIIE2). Le bras vif c'est donc moins enfoncé durant cette phase que pour la phase deux. Cela peut s'expliquer par le cycle de crue beaucoup plus intense appliqué lors de la phase III. Ce sont les crues moyennes et faibles qui provoquent des enfoncements du bras vif comme cela est rappelé au chapitre n°5.

**L'essai PIIIE3** – teste un aménagement comprenant 5 seuils de fixation du lit entre le Piton BATARD et la mer. La chute de chaque seuil est de 3 m de hauteur.

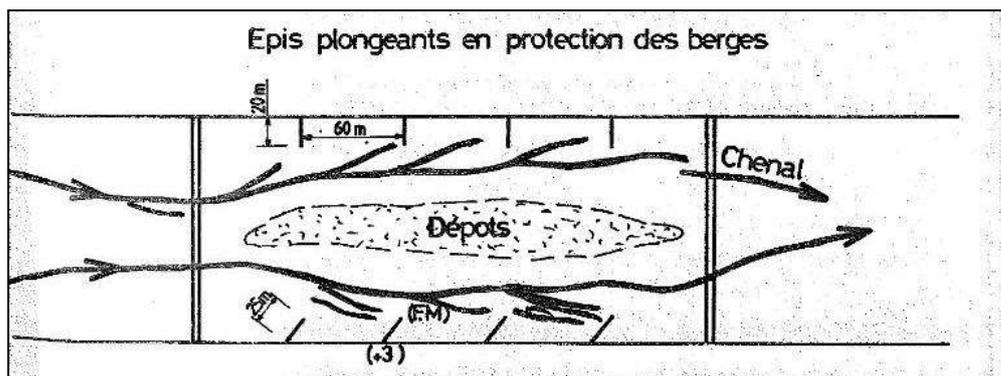


Ce dispositif de seuils permet de limiter l'enfoncement des bras vifs dans le lit de la RdG et de réduire les vitesses d'écoulement (maxi 7m/s). Par contre :

- Pendant les grosses crues, des ondulations de fortes amplitudes apparaissent à la surface libre de l'écoulement ;
- Les bras vifs restent collés le long du parement.

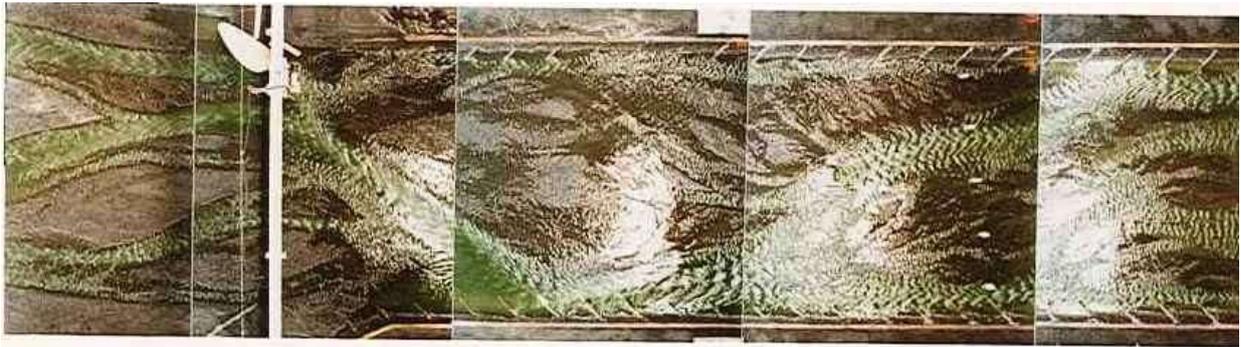
Cette solution est écartée.

Afin d'éloigner le bras vif du parement de l'endiguement, un linéaire d'endiguement a été équipé avec des épis déflecteurs similaires au schéma suivant.



Ces épis ont provoqué des attaques en pied de berges à leur aval immédiat. Des variantes à ces épis sont testées lors des essais suivants.

**L'essai PIII – E41** a porté sur un endiguement de 250m de largeur avec une protection de berge en enrochements libres de fruit 3H/1V. La zone indurée du Piton Bâtard est dérasée jusqu'à la cote 40m NGR. Le dérasement a amélioré les conditions de sollicitation des berges. Cependant les effets de déflexion dus au Piton Bâtard ont provoqué des écoulements transversaux qui sollicitent fortement la rive droite en amont de l'endiguement. Il a donc été préconisé de caler la semelle de rive droite plus profondément que celle de la rive gauche.



Le pied de l'endiguement est équipé d'épis agressifs (tournés vers l'amont) sur la moitié amont du linéaire. La moitié aval est réalisée en murs épi. L'objectif de ces épis agressifs est d'éloigner le bras vif du pied de l'endiguement afin de réduire les érosions de pied. L'essai montre que ces épis génèrent des ondulations de très fortes amplitudes pour les grosses crues. Des affouillements très profonds apparaissent à l'aval des seuils (jusqu'à - 7m par rapport au plafond du chenal). Cette solution est écartée.

**L'essai PIII – E42**, propose de tester un chenal étroit de 150m de large réalisé par un mur protégé par des épis. Cet aménagement provoque une forte érosion régressive qui met en péril les ponts de la RN1 et l'entonnement amont de l'endiguement. Cette solution est écartée.

**L'essai PIII – E42 Exp. a**, améliore l'aménagement testé précédemment en y ajoutant un seuil à l'entrée de l'entonnement et en allongeant le tronçon « mur épis » vers l'amont. Ce projet limite l'érosion régressive vers les ponts de la RN1, mais accélère celle vers l'aval. Il n'est donc pas retenu.



#### **7.2.4 Phase IV : Phasage de construction de l'ouvrage[22]**

La solution choisie par le maître d'ouvrage a fait l'objet d'un avant-projet sommaire en janvier 1987. Les caractéristiques de cet ouvrage ont été testées lors de cette phase IV. Elles sont détaillées ci-après :

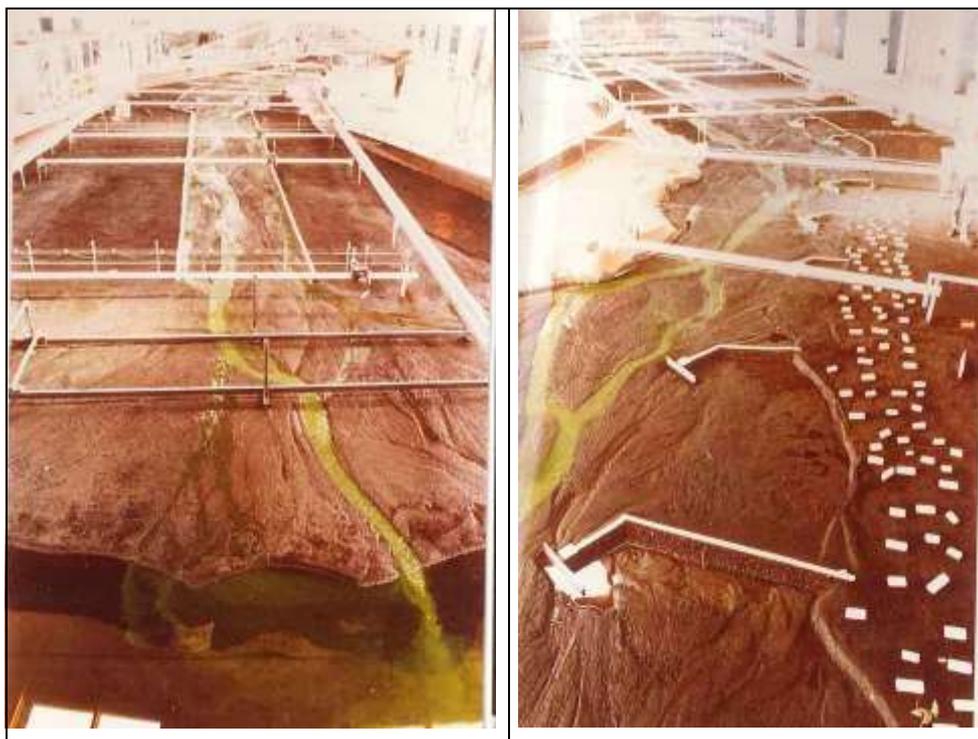
- 9 épis en rive droite de la RdG,
- Un endiguement de 250m de large avec des berges à 3H/2V recouvertes d'enrochements liés au béton qui viennent s'appuyer sur une semelle béton.

La phase IV a eu pour but de :

- tester le phasage de construction de l'ouvrage,
- vérifier le comportement final de l'aménagement.

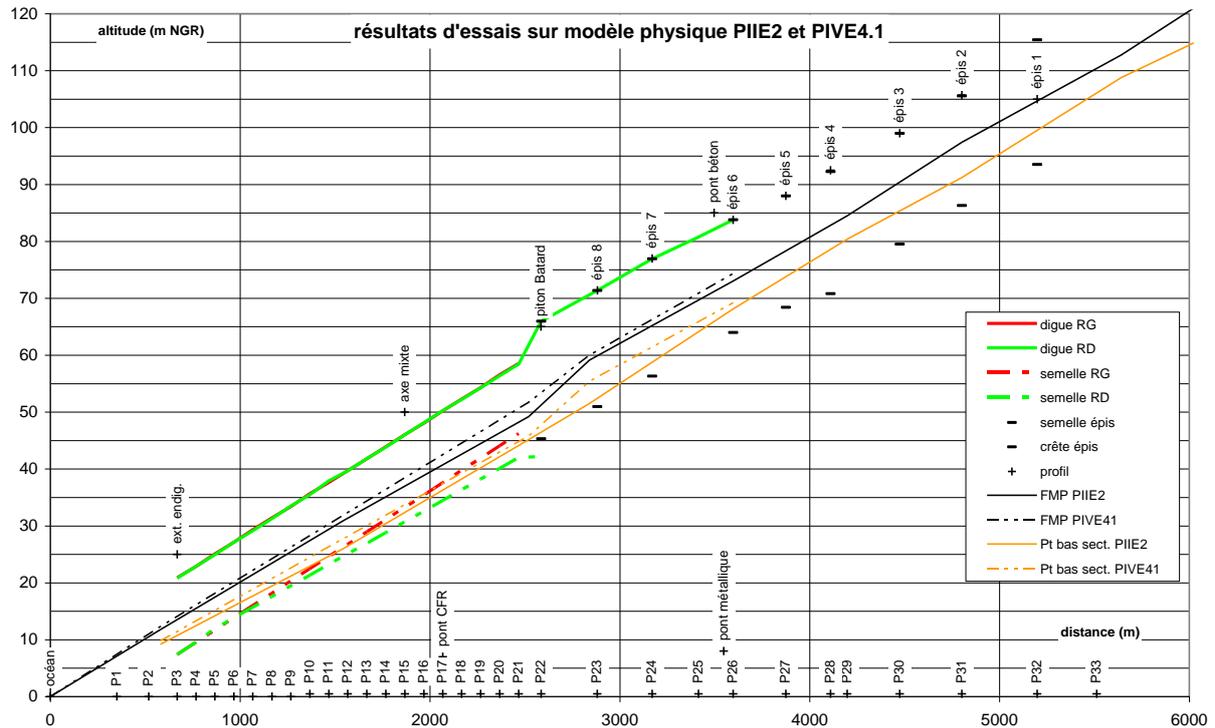
Les essais réalisés pour ce dernier point ont utilisé le cycle n°7, de crues particulièrement fortes. Ce cycle comporte notamment trois passages de crues exceptionnelles à 3000m<sup>3</sup>/s.

Suite à l'étude du BRGM [19] concernant l'extension des coulées boueuses, en particulier sous le Piton Bâtard, la représentation du toit de ce substratum est faite de façon plus précise. Cet essai vérifie le bon comportement du système de protection sans déroctage de ce substratum.



Comme pour tous les précédents essais, les extractions de matériaux dans le lit de la RdG réalisés depuis 1983 ne sont pas prises en compte. Le rapport indique : « *le calage des fondations (des épis) est tel que la semelle du mur est découverte voire dégarnie à son extrémité. A aucun moment il n'a été noté de souscavement* ». Plus loin concernant l'endiguement : « *les courbes enveloppes des affouillements le long des berges correspondent aux niveaux mesurés au cours des essais de la phase II, essai PIIE2 et au cours de l'essai PIVE1 (totalité de l'aménagement réalisé). Les cotes de fondations des semelles adoptées correspondent aux mesures et observations. Elles tiennent compte de l'abaissement à moyen terme des fonds moyens du lit endigué dans l'hypothèse où il n'y a pas d'extractions de matériaux dans le lit de la RdG. Le dessus de la semelle et l'extrémité peuvent être découverts. Les dispositions retenues sont telles que la semelle n'est pas souscavée* ».

Les résultats du modèle physique sont repris sur le profil en long suivant :



On constate que la courbe orange en trait mixte « Pt bas sec PIVE41 » (point bas de la section) est très proche de celui qui avait été obtenu lors de la phase II (trait orange continu) tout le long de l'endiguement. A l'amont du piton Batard la courbe de la phase IV est plus haute que celle obtenue lors de la phase II. La modification de l'axe de l'entonnement de l'endiguement entre la phase II et les phases suivantes explique peut-être cette différence, à moins que ce ne soit comme le proposait SOGREAH, un problème de tassement du fond du modèle lors de la phase II.

### **7.3 Modèle physique CNR de 1994[37]**

---

L'étude a été réalisée pour le Sivu avec maîtrise d'œuvre DDE-SEECL. L'étude avait pour but de dimensionner et optimiser un épaulement de sécurité renforçant l'endiguement aval, en vue de l'aménagement avec plus de sécurité des terrains exondés de la RdG.

#### **Analyse des risques de rupture**

Une analyse des risques de rupture de la carapace a préalablement été effectuée. Il a été montré que le talus 3H/2V de l'endiguement était stable, mais pouvait être à la limite de stabilité si les matériaux constituant le talus de la digue sous la carapace commençaient à être dégradés. L'étude a mis en évidence le danger d'un processus du type :

- tassement des matériaux constituant l'endiguement
- fissuration de la carapace constituée de blocs de basalte percolés au béton
- départ des fines du corps de digue par ces fissures, d'autant plus qu'il n'existe pas de couche filtre sous la carapace et que les niveaux de la RdG en crue peuvent être fluctuants.
- dégradation des conditions de stabilité de la digue et carapace avec risque de rupture par cercle de glissement, la semelle assurant cependant une butée en pied stabilisatrice

L'étude a mis en évidence le danger d'un sous-cavement de la semelle, qui peut alors la faire casser et déclencher l'instabilité du talus par perte de la butée en pied.

NB depuis la mise en service des ouvrages d'endiguement, on ne constate pas pour le moment de fissuration particulière de la carapace.

#### **Modèle physique**

Un modèle a ensuite été réalisé au laboratoire d'hydraulique de la CNR à Lyon – Gerland. L'échelle était 1/60<sup>ème</sup>. Un tronçon de 1000m nature de la partie endiguée était représenté. L'endiguement éventuellement dégradé et

l'épaulement de sécurité était représenté en RD seulement, le modèle étant symétrique.



Photo du modèle au 1/60

Le modèle était à fond mobile avec recyclage des matériaux par une pompe à vortex. Le recyclage consiste à alimenter le modèle en transport solide, à partir des matériaux sortant à l'aval du modèle. Ceci permet d'avoir un transport solide ajusté en quantité et en granulométrie quel que soit le débit testé, évitant en particulier le tri granulométrique pour les petits débits. Ce type d'alimentation n'était pas possible sur le modèle Sogreah.

### **Matériaux utilisés sur le modèle**

Granulométrie : On disposait d'un faisceau de courbe granulométrique des matériaux de la RdG. Ce modèle étant destiné à dimensionner un épaulement de sécurité à l'extérieur de l'endiguement, des ruptures plausibles de la carapace ont été simulées. Pour se placer dans le sens de la sécurité et maximiser les érosions en pied de digue, les matériaux les plus gros du lit avaient été volontairement sous représentés sur le modèle en se plaçant au minimum du faisceau granulométrique pour les matériaux les plus gros : pas de matériaux supérieurs à 5mm modèle, soit 300 mm nature. En comparaison, la courbe granulométrique représentée dans le modèle Sogreah de 1986-87 se situait au maximum du faisceau granulométrique.

Cette différence de granulométrie utilisée explique la différence de pente d'équilibre constatée sur les modèles.

La pente d'équilibre obtenue sur le modèle CNR était de 1.8% alors qu'elle était de 1.9% sur le modèle Sogreah de 1986. la pente de 1.8 % est proche de la pente réelle de la RdG en 2006 : 1.7%.

En fait, la granulométrie du modèle CNR simule l'enlèvement des gros blocs pour la construction de la carapace de l'endiguement (blocs 300-900 mm).

La densité des matériaux utilisés était de 2.6 modèle pour 2.8 nature. Il n'a pas été fait de correction sur le diamètre de matériaux modèle (en principe  $\frac{2.8-1}{2.6-1}=1.12$ ) pour aller dans le sens de la sécurité.

Les matériaux modèle ont été obtenus à partir d'un mélange de deux catégories de sable roulé et non concassé, représentant donc bien la forme réelle des matériaux de la RdG.

## **Essais**

Des essais d'étalonnage ont été effectués pour les débits de 500, 1000, 1500, 2000 et 2500 m<sup>3</sup>/s. Deux débits considérés comme dangereux pour l'endiguement ont été sélectionnés pour la suite des essais :

- 500 m<sup>3</sup>/s bras vif surcreusé à méandre, avec fort angle d'attaque
- 1500 m<sup>3</sup>/s bras vif quasi rectiligne à très forte vitesse

Il a été supposé par ailleurs une fissuration de la carapace, sous forme de plaques carrées de taille réelle :

- 4.8 m x 4.8 m x 1.2 m d'épaisseur
- 2.4 m x 2.4 m x 1.2 m d'épaisseur



Plaques 2.4 x 2.4 m simulant la carapace fissurée

Des reprises de bétonnage ont été effectués tous les 1.2 m de haut lors de la construction de la carapace. Les plaques correspondent donc à des fissurations toutes les 2 ou 4 reprises de bétonnage.

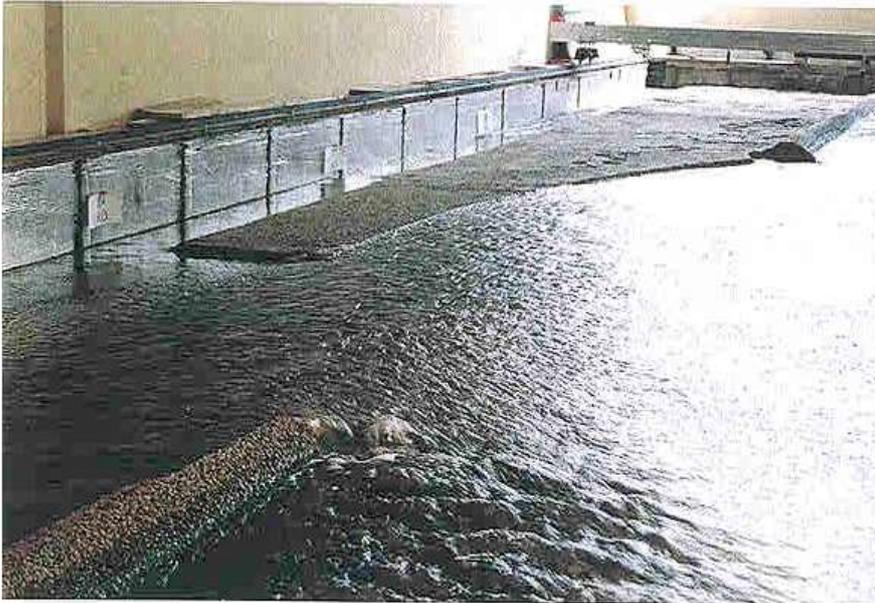
Les essais ont montré qu'une carapace fissurée pouvait résister aux débits testés moyennant une déformation importante.

Cependant, en cas de sous-cavement de la semelle, les essais à 1500 m<sup>3</sup>/s ont montré que la carapace et l'endiguement pouvait être détruite sur une grande longueur :



essai sous-cavement débit 1500m<sup>3</sup>/s. Arrachage et départ des plaque, épaulement érodé sur 20m

Dans la configuration initiale de l'épaulement, il a été constaté à 2000 m<sup>3</sup>/s suite au souscavement, à une rupture totale de l'endiguement avec passage d'une partie du débit par la brèche créée.



De ce fait, l'épaulement de sécurité proposé a été redimensionné en conséquence.

Une vidéo relatant l'ensemble de l'étude et des essais a été réalisé pour le Sivu.

### **Essais abrasion**

Des essais choc et abrasion ont été effectués sur des échantillons de blocs de basalte et de béton constituant la carapace, sur les deux machines spécifiques du laboratoire de matériaux CNR.

- Le basalte constituant la carapace est révélé résistant à l'abrasion (indice CNR = 1)
- Le béton de percolation s'est révélé peu résistant à l'abrasion (indice CNR = 4) et peu résistant aux chocs

(plus l'indice est petit, plus le matériau est résistant)

### **Conclusion modèle CNR**

Les différents essais ont montré que la carapace résistait assez bien aux différentes sollicitations et débits, mais que le souscavement de la semelle en cas d'abaissement des fonds, représentait le risque le plus important. Tous ces faits corroborent les hypothèses déjà proposées pour expliquer les dégâts observés.

## 8 EVOLUTION MORPHOLOGIQUE DE LA RDG

### 8.1 Evolution morphologique de la RdG entre 1996 et 2006

Le lit de la RdG s'enfonce notablement depuis la mise en service des ouvrages d'endiguement. La fréquence des levées topographiques permet d'établir l'historique de cet enfoncement.

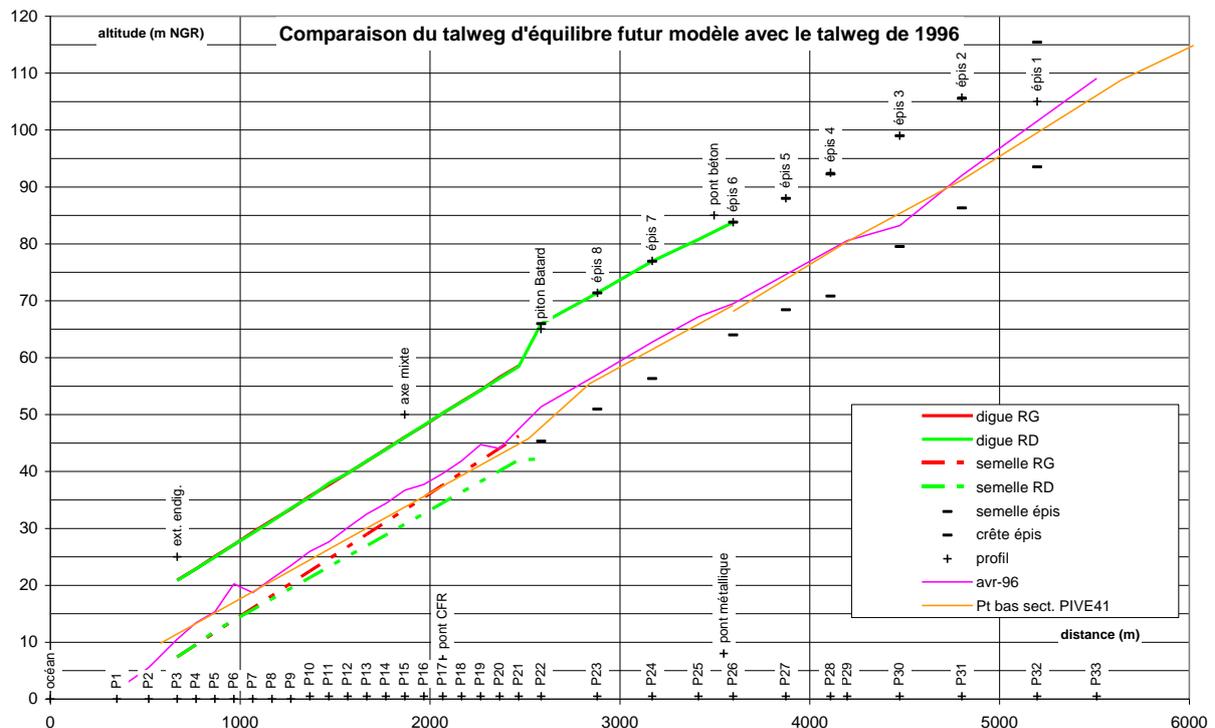
#### Comparaison Modèle physique - Etat initial 1996

Le graphique suivant compare le talweg (pt bas sect PIVE41) du lit obtenu sur modèle physique lors de la phase IV (courbe orange), avec le talweg du lit relevé en avril 1996 (courbe rose).

**Nota** : Le talweg du modèle physique de la phase IV se finit au profil P26. Il est complété par celui de la phase II à l'amont des ponts de la RN1 qui a été réalisé dans des conditions similaires.

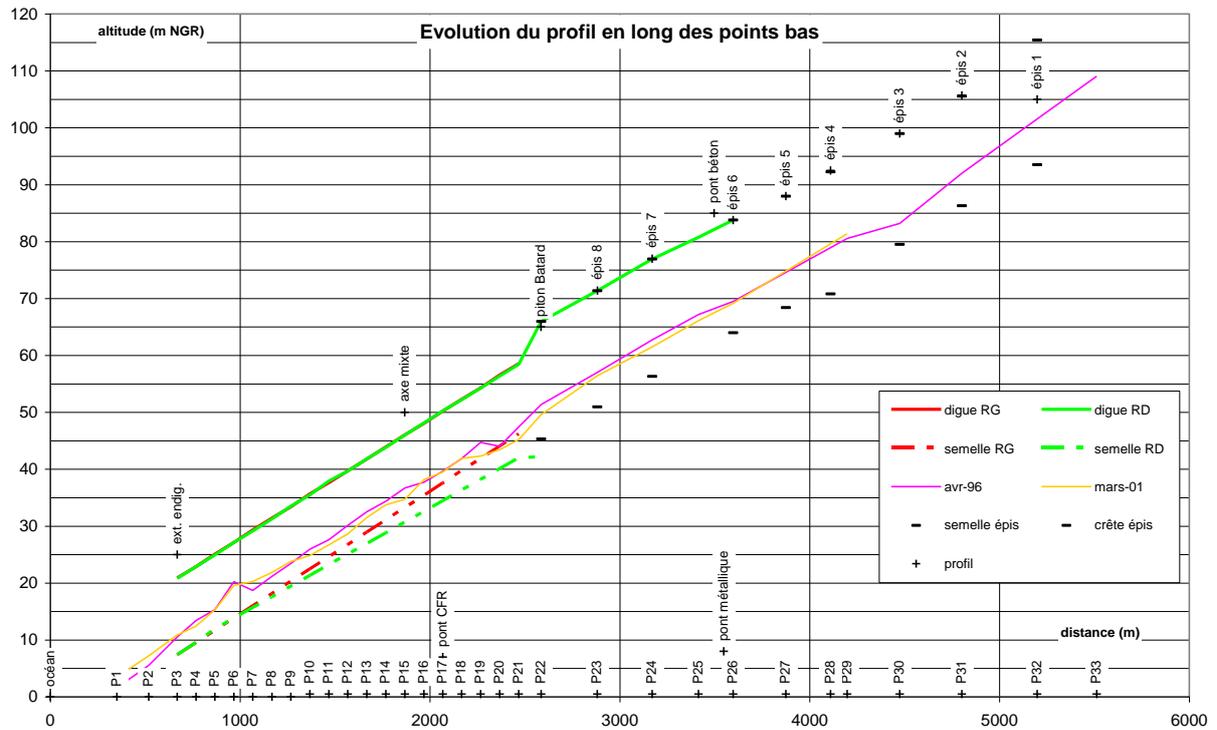
La topographie terrain de 1996 est complétée à l'amont du profil P29 par la campagne terrain de mai 1995 (il n'y a pas eu de crue entre les deux campagnes).

Ce graphique montre que le talweg de 1996 se situe globalement au dessus du talweg d'équilibre (après endiguement) obtenu sur modèle physique Sogreah.



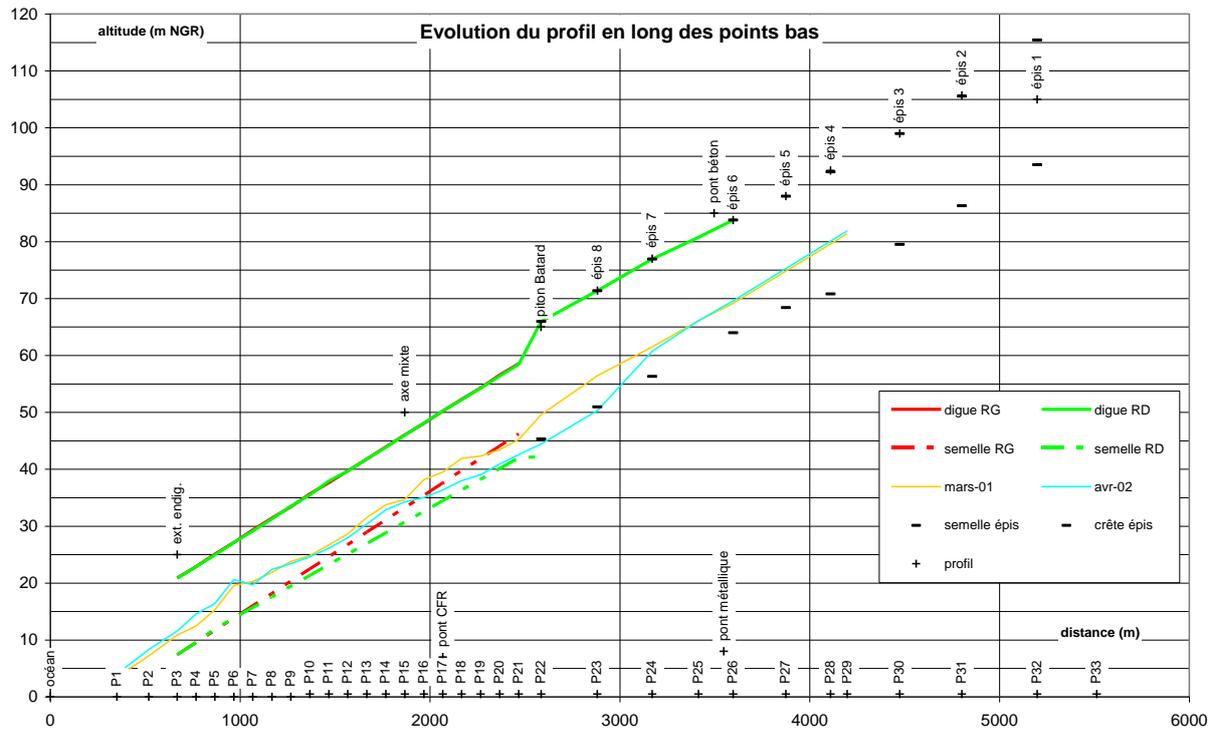
## Evolution avril 1996- mars 2001

Le graphique suivant montre l'évolution du talweg de la RdG entre avril 1996 (courbe rose) et mars 2001 (courbe orange). Durant cette période il n'y a pas eu de crue supérieure à 400m<sup>3</sup>/s. Le graphique montre que le bras vif de la RdG a très peu bougé. Le lit est légèrement remonté à l'aval de l'endiguement (profils P1 et P2).



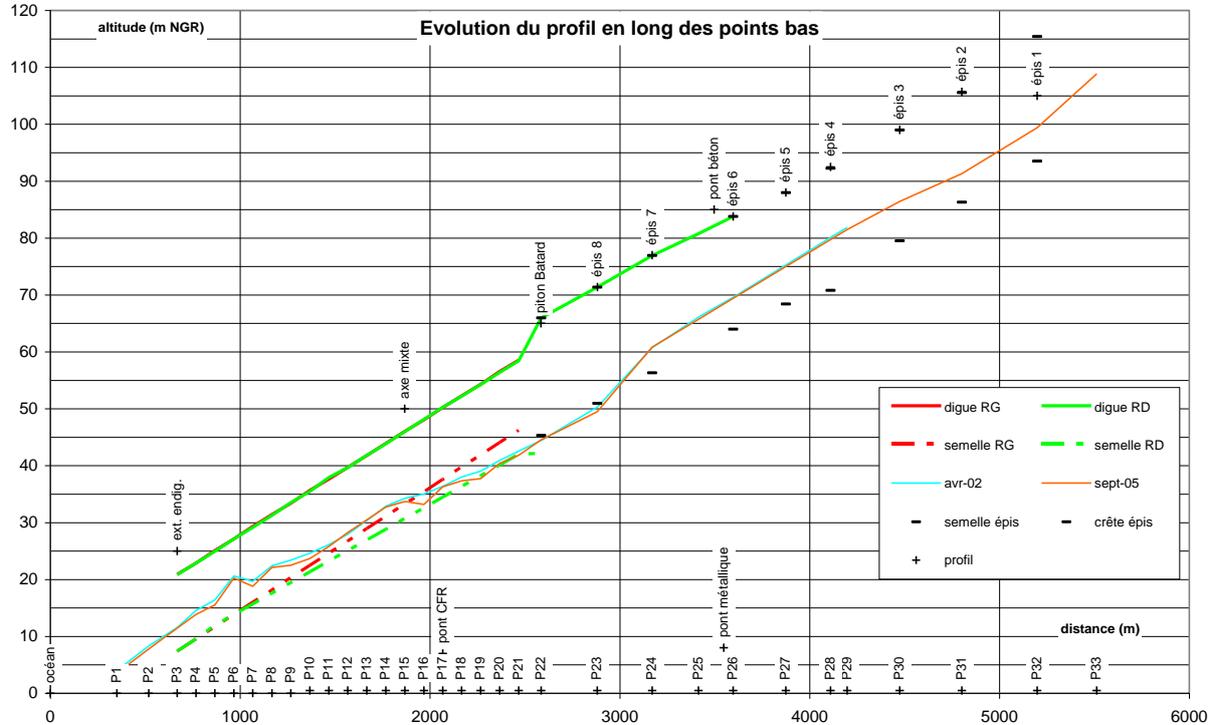
## Evolution mars 2001 – avril 2002

Le talweg de la RdG s'est enfoncé entre mars 2001 (courbe orange) et avril 2002 (courbe bleue) suite au passage du cyclone DINA (1200m<sup>3</sup>/s). Cet enfoncement a touché le tronçon compris entre l'épi n°7 et le pont de l'axe mixte. Le dessus de la semelle de l'endiguement est visible entre les profils P20 à P22. A l'aval de l'endiguement (profil P1 à P5) le lit est remonté comme prévu.



## Evolution avril 2002 - septembre 2005

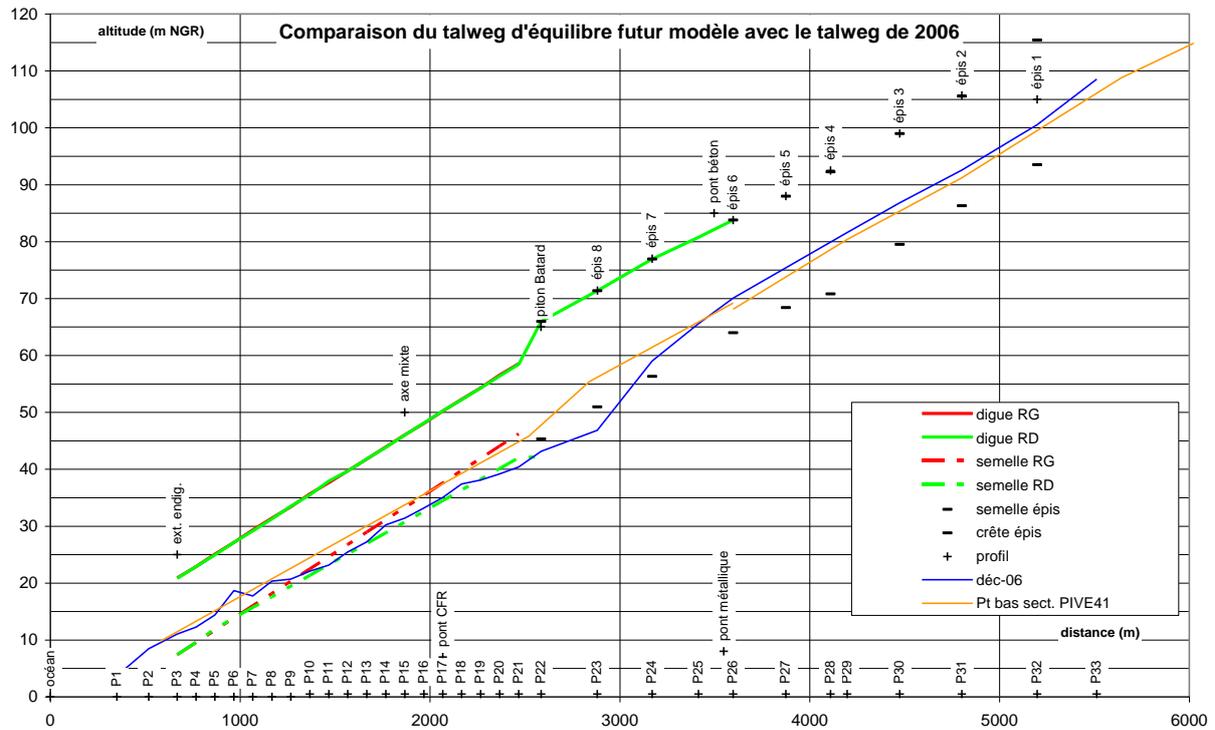
Le talweg de la RdG a très peu bougé entre avril 2002 (courbe bleue) et septembre 2005 (courbe orange). Durant cette période, les débits sont restés en dessous de 100m<sup>3</sup>/s.





## Comparaison Modèle physique – situation décembre 2006

Le graphique suivant compare le talweg d'équilibre après endiguement (courbe orange) obtenu sur le modèle physique avec celui mesuré sur le terrain en décembre 2006 (courbe bleue) :



NB Il s'agit du point le plus bas du profil en travers et non du fond moyen.

On remarque que :

- A l'aval des ponts de la RN1, les fonds réels sont 2 à 10m plus bas que ce qui étaient prévus.
- L'enfoncement du lit est maximum (10 m) au droit de l'épi n° 8 un peu à l'amont du piton Batard.
- Pour l'endiguement, le fond du talweg 2006 atteint partout la cote de la semelle RD et est 5 m plus bas que semelle RG à l'aval immédiat du piton Batard. Fort heureusement, les bras vifs ne se sont jamais venus méandrer dans cette zone.
- Le fond du talweg 2006 est plus bas que la semelle des épis 8 et 9. Les bras vifs sont venus méandrer très prêt de cette zone pendant le cyclone Gamède.

- A l'amont des ponts de la RN il n'est pas noté d'enfoncement du lit par rapport à celui de 1996. Ce point montre qu'il n'y a pas de déficit d'apports du bassin versant. Cela signifie également que les enfoncements à l'amont des ponts de la RN décrit au chapitre 6.2.5 entre 1983 et 1989 ne se sont pas aggravés ensuite. La zone des ponts de la RN1 et des épis n°6 à n°1 n'est pas encore affectée par l'érosion régressive.

## **8.2 Evolution morphologique due au Cyclone Gamède (fév 2007)**

---

En 2007, le cyclone GAMEDE a de nouveau provoqué la remontée de l'érosion régressive vers les ponts de la RN1. Le souscavement de la digue comprise entre les épis n°4 et n°5 (décrit au chapitre 4) est un symptôme assez inquiétant. Il montre que le lit qui était stable dans le secteur des deux ponts et plus à l'amont, a commencé à s'enfoncer pendant le cyclone GAMEDE.

Post Gamède des relevés topographiques sont disponibles au droit des trois ponts (DDE-SGT).et autour des épis 4 et 5 (DDE-SEECL pour le Sivu).

## **8.3 Bilan global**

---

Le lit de la RdG s'est notablement enfoncé depuis la mise en service des ouvrages, ce qui est manifestement la cause des dégâts observés.

L'enfoncement du lit avait bien été observé sur le modèle physique réalisé par le bureau d'études Sogreah lors de la conception des ouvrages, dont les fondations des endiguements et épis avaient bien été dimensionnés en conséquence.

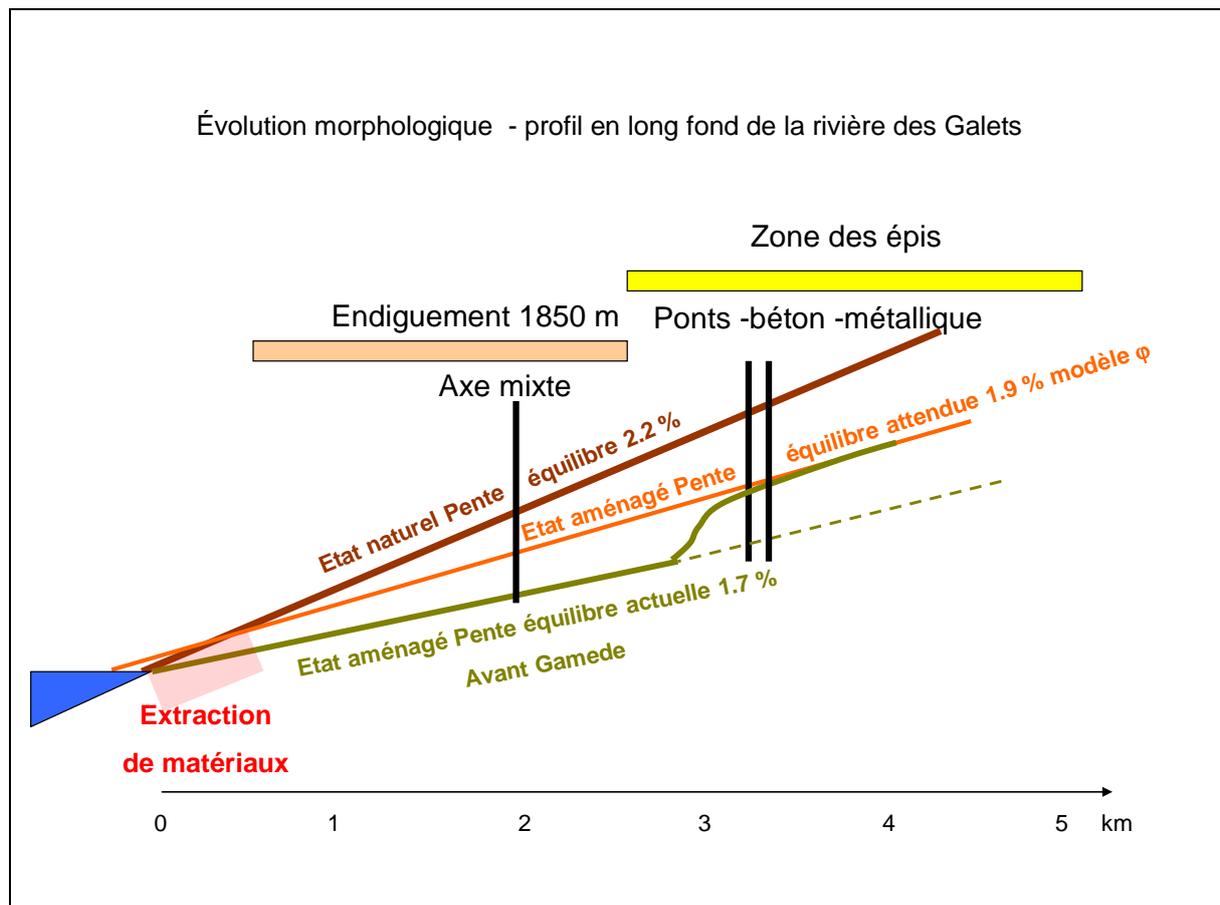
En revanche, les ponts de la RN antérieurs aux ouvrages de protections contre les crues, ont dû subir l'enfoncement du lit.

Le problème est l'enfoncement actuellement constaté de la RdG pour la partie endiguée dépasse très largement l'enfoncement prévu par le modèle :

- Pente naturelle avant aménagement 2.2%
- Pente après aménagement prévu par le modèle 1.9%
- Pente constatée en 2006 après aménagement 1.7 %

(0.2% de pente supplémentaire= 2m /km, soit 5 m au piton Batard et potentiellement 7 m au niveau des ponts de la RN)

Le schéma suivant situe les ouvrages principaux par rapport à ces différentes pentes.



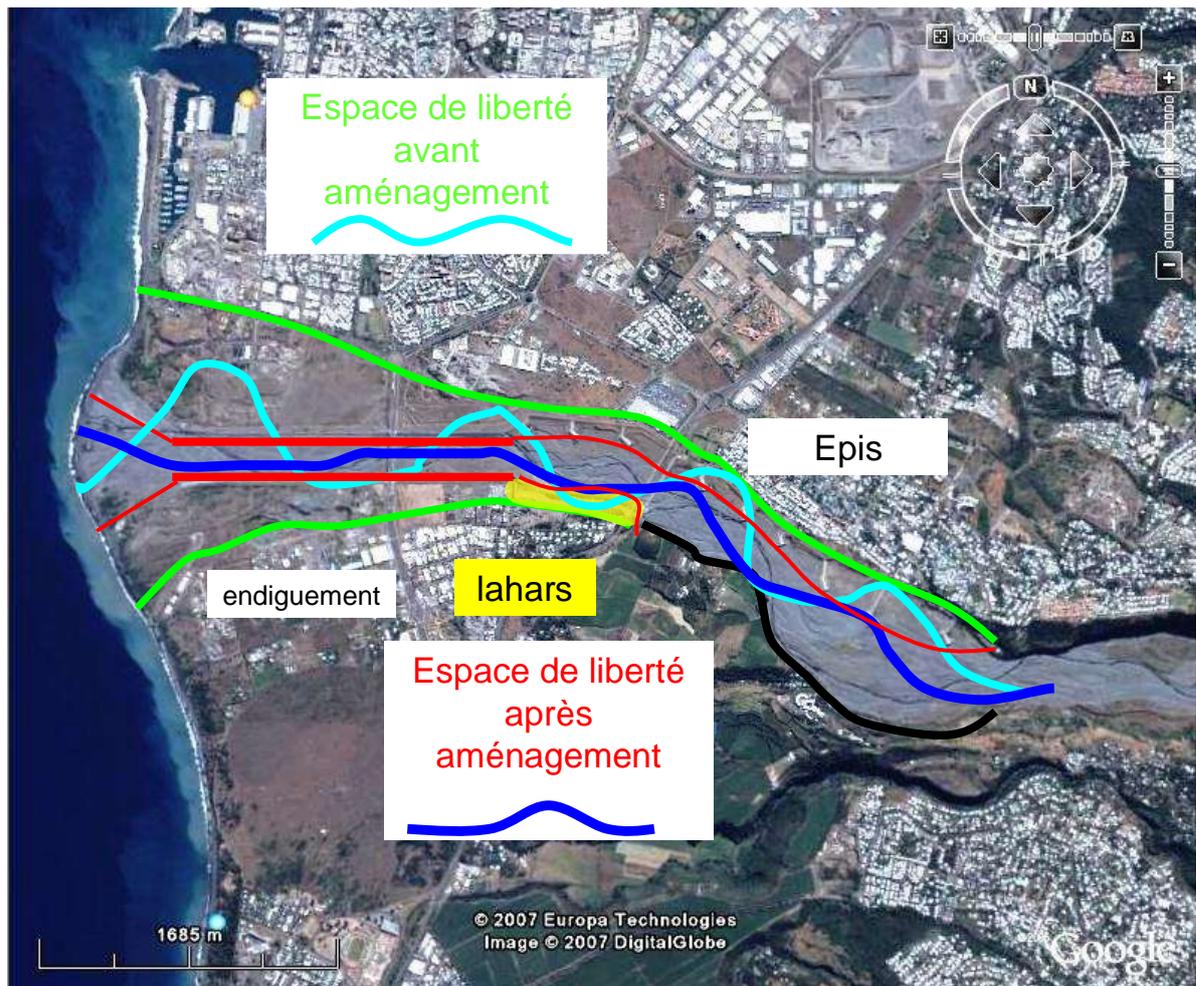
L'enfoncement du lit de la RdG est donc quasi le double de ce qui était prévu, que l'on ne peut attribuer à une simple respiration de fonds.

Les ouvrages, endiguement et épis, sortent donc bel et bien de la bande passante pour laquelle ils ont été conçus.

## 8.4 Causes de l'enfoncement du lit

L'origine de cet enfoncement du lit de la RdG est multiple :

Une des causes principales est la perte d'espace de liberté produit par l'endiguement et dans une moindre mesure par les épis, comme indiqué par le graphique suivant :



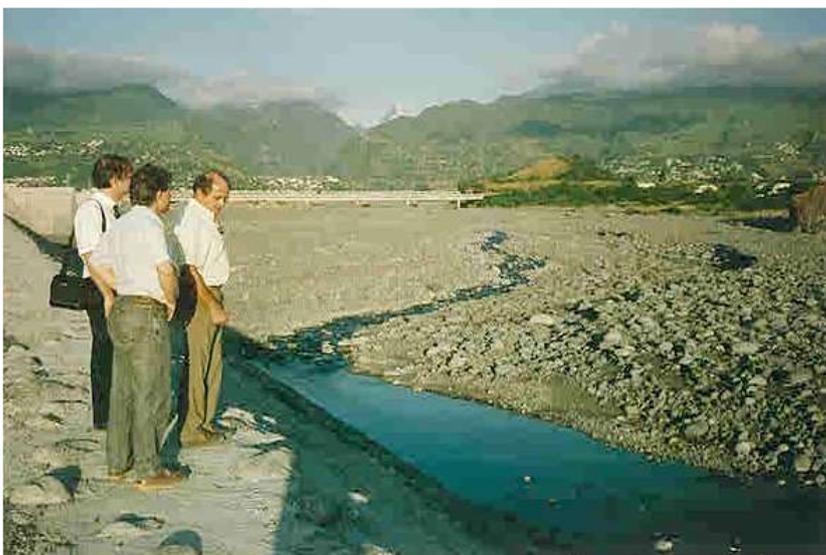
Les bras vifs de la RdG en crue n'ont plus la possibilité de divaguer comme à l'état naturel, ce qui se traduit par un parcours plus court jusqu'à la mer, par conséquent des vitesses supérieures et un enfoncement du lit en réaction.

Par ailleurs, la partie endiguée constituée de blocs de basalte percolés au béton est trop lisse et fait que les bras de la RdG en crue collent à l'endiguement avec pour effet une augmentation des vitesses et un parcours plus court à la mer.

L'enfoncement du lit a provoqué la découverte de lahars (coulées boueuses) en RG entre les ponts de la RN et le piton Batard, zone auparavant recouverte d'alluvions, ce qui a encore restreint l'espace de liberté de la RdG :



Lahars en 2007



1994 : les lahars sont entièrement couvert d'alluvions en RG

Ces lahars, qui paraissaient du rocher assez solide, ont en fait une très faible résistance à l'érosion (abrasion par les matériaux fins et chocs par les gros blocs).

Le cañon qui préexistait dans les lahars sous les alluvions, a été livré aux crues et s'est alors vite agrandi et approfondi. Cet approfondissement remonte vers les ponts de la RN1 et devient actuellement très dangereux pour les piles P7 et P8 du pont béton ainsi que pour les piles P6 et P7 du pont métallique.

L'écoulement en crue dans ce cañon soulage en revanche le bras parallèle qui coule en rive droite dans les alluvions, retardant donc l'enfoncement de ce dernier et protégeant de ce fait provisoirement les piles des ponts de La RN1 et les épis rive droite.

Le modèle physique à fond mobile employé pour le dimensionnement des ouvrages est un moyen d'étude reconnu comme fiable. Même si le modèle a pu introduire quelques biais, il y a d'autres facteurs qui sont intervenus dans processus anormal d'enfoncement des fonds.

Une autre cause de l'enfoncement du lit de la RdG est les extractions de matériaux effectuées dans le lit de la RdG :

- <sup>3</sup> Extraction par les carriers dans le lit dans la partie aval du cône de déjection jusqu'en 1992, à fin de production de matériaux de construction, facteur non pris en compte par le modèle physique antérieur à ces extractions. Ces extractions peuvent expliquer les dégâts subis par l'endiguement en RG à l'aval de l'axe mixte. L'effet de ces extractions semble actuellement en partie dissipé, le lit de la RdG dans la partie endiguée ayant repris avec Gamède une morphologie plus rassurante (voir plus loin Synthèse & prospective).
- <sup>4</sup> extraction de gros blocs dans la souille le long de l'endiguement et au pied des épis pendant la construction des ouvrages, à fin de récupération de blocs de basalte pour la construction de la carapace de l'endiguement et des digues reliant la tête des épis à la berge, facteur non pris en compte par le modèle physique.

---

<sup>3</sup>En 1992, lors du commencement des travaux d'endiguement de la RdG, le lit aval était beaucoup plus bas que celui pris en compte dans les études du fait de prélèvements des carriers (estimé par CNR à plus de 2 millions de mètres cubes entre 1988 et 1992). Le bureau d'études Sogreah a alors montré qu'il fallait descendre les fondations de l'endiguement entre 2 et 4m et de déplacer les matériaux surabondant du lit de l'amont vers l'aval, ce qui présentait un surcoût important. L'alternative qui a été retenue était de conserver le projet dans sa version originale et d'intervenir ponctuellement sur les ouvrages chaque fois que des confortements seraient nécessaires pendant une période transitoire jusqu'au retour à l'équilibre du lit. Ce choix à l'époque paraissait raisonnable.

<sup>4</sup> Il est à noter que le modèle physique fond mobile d'un tronçon d'endiguement, réalisé par la CNR trouvait une pente d'équilibre de 1.8% proche de la pente actuelle. Or ce modèle était destiné à dimensionner un épaulement de sécurité à l'extérieur de l'endiguement. Pour cela, des ruptures plausibles de la carapace avaient été simulées sur le modèle. Pour se placer dans le sens de la sécurité et maximiser les érosions en pied de digue, les matériaux les plus gros du lit avaient été volontairement sous représentés sur le modèle, ce qui simule assez bien l'enlèvement des gros blocs pour la construction de la carapace de l'endiguement.

Les différents essais avaient par ailleurs montré que la carapace résistait assez bien aux différentes sollicitations et débits, mais que le sous-cavement de la semelle en cas d'abaissement des fonds, représentait le risque le plus important. Tous ces faits corroborent les hypothèses déjà proposées.



Souille avril 1994

Cette souille a été rebouchée après travaux avec des matériaux remaniés exempts de gros blocs, constituant donc des zones plus facilement érodables. Associé à une carapace assez lisse, il n'est donc pas surprenant de voir les bras vifs couler systématiquement le long de l'endiguement (voir photo ci après), et être une cause majeure de l'incision du lit dans le secteur.



Cyclone Gamède - RdG vers le pont axe mixte

Une hypothèse parfois évoquée pouvant expliquer une partie de l'enfoncement du lit, est un déficit provisoire d'apports solides venant du bassin, qui conduirait alors à un rééquilibrage de la rivière sur une pente plus faible. Rien ne permet actuellement de valider cette théorie, les quelques données disponibles tendraient plutôt à l'invalider.

En conclusion, l'incision anormale constatée du lit de la RdG résulte donc d'un cumul de causes différentes qui se sont agrégées. Cette incision du lit explique tous les dégâts déjà constatés, qui résultent d'une attaque des fondations par souscavement.

## 9 CONSEQUENCES POUR LES OUVRAGES

L'évolution du lit de la RdG et ses conséquences pour les ouvrages peuvent être envisagée comme suit :

### **a) Partie endiguée**

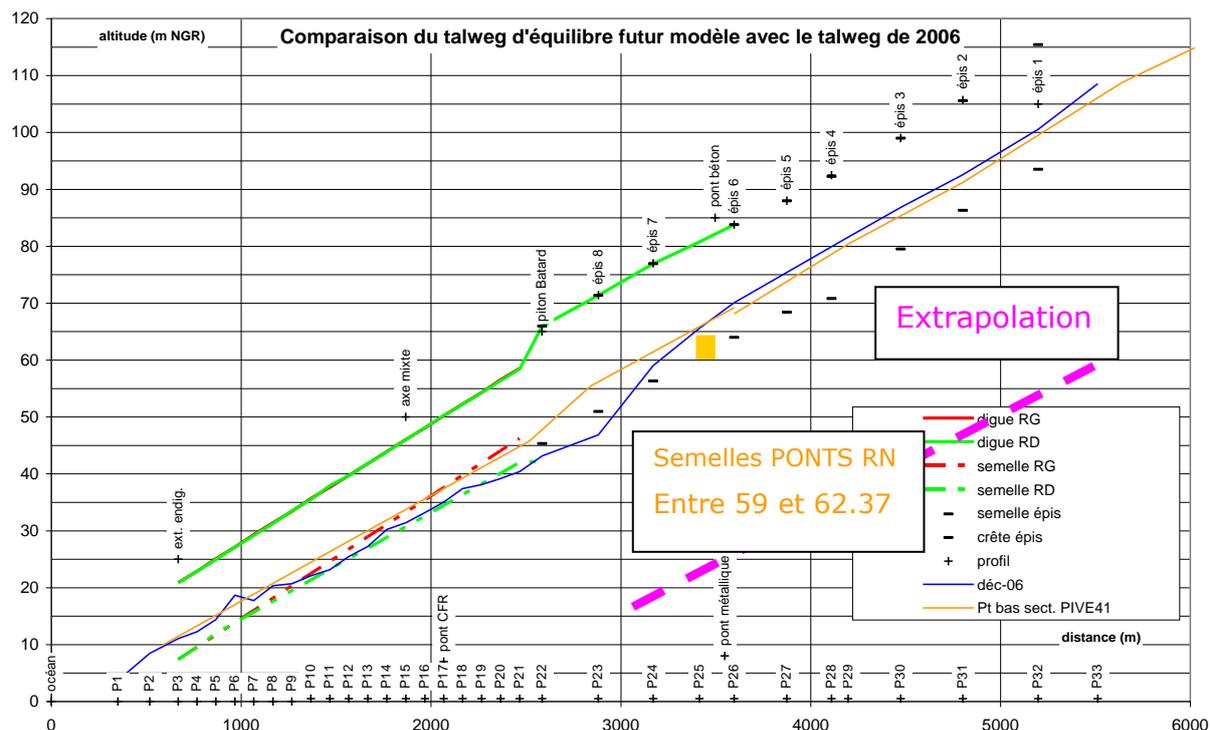
L'effet des extractions effectuées commence à se dissiper. Au gré des crues, les fosses d'extraction aval commencent à se combler, la RdG ramène de gros blocs le long de l'endiguement. Lors du cyclone Gamède Le lit semble pour la première fois avoir évolué favorablement dans cette zone.

Des dégâts limités tels ceux déjà observés sont encore possibles pour les prochaines crues, mais il est peu probable que l'on y observe des dégâts majeurs le long de l'endiguement, sauf si un méandre attaque la RG entre le piton Batard et l'axe mixte ou la semelle est plus haute que le fond des bras vifs.

## b) Epis

L'érosion régressive va inexorablement se poursuivre et atteindre la zone des ponts RN1 puis la zone plus à l'amont. Le cyclone Gamède a d'ailleurs commencé à éroder le lit sous les ponts.

Le **trait en violet** donne l'extrapolation approximative des fonds à partir des fonds aval 2006 pour les prochaines crues, qu'il conviendra de préciser.



Il en résulte que tous les épis sont menacés de dégâts ou même de destruction par l'enfoncement du lit, si un bras vif se déplace vers ceux ci :

- n°9 et 8 déjà menacés avant le cyclone Gamède,
- n°7 probablement menacé depuis Gamède,
- menacés par les futures crues : dans l'ordre n° 7, 6, 5, 4, 3, 2 et 1. Les épis 5 à 1 sont fondés sur les lahars, ce qui n'est pas vraiment un gage de meilleure stabilité.

La destruction de la digue par souscavement entre les épis 4 et 5 pendant le cyclone Gamède est la preuve que l'érosion régressive commence à atteindre ces épis.

### **c) Ponts**

On notera que les deux ponts de la RN1 antérieurs aux ouvrages d'endiguement et épis, n'ont pas été prévus pour l'enfoncement prévu généré par les ouvrages, et encore moins pour le sur-enfoncement apparus après mise en service. Certaines piles du pont béton ont cependant été approfondies.

On notera que le pont métallique ancien et obsolète devait être remplacé par un ouvrage neuf, le projet axe mixte s'étant semble-t-il substitué au projet.

#### **• Pont métallique RN1**

Les cotes des fondations des piles sont les suivantes :

Culée RD	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	Culée RG
66.57	66.7	62.45	62.99	62.37	62.88	62.95	62.77	63.15

#### *Situation actuelle*

Dans la partie alluvionnaire, les fonds mesurés sous le pont post Gamède sont actuellement à la cote (66.8) entre P5 et P6. Les bras se rebouchant en décrue, le fond pendant Gamède était probablement à la cote (64). Le fond pour une crue décennale descendra à la cote (62) environ.

- Les fondations de la culée RD et la pile P1 sont perchées. La pile P1 serait immédiatement détruite en cas de déplacement du bras vif en crue vers la RD.
- Les piles P2 à P5 sont à la limite de stabilité, le fond du bras vif atteignant pratiquement la cote des fondations.

Les piles P7, P6, P5 et P4 du pont métallique ont été renforcées post Gamède par la DDE en mars 2007 sur conseil du CETE Méditerranée. De gros blocs de basalte de rivière ont été déposés autour des piles. Ces dispositions peuvent sauver provisoirement les piles de la destruction à condition que le bras vif soit assez perpendiculaire au tablier et passe bien entre les piles. Si un bras à méandre (Q2-Q5) attaque une pile de biais, elle ne pourra probablement pas résister car la forme rectangulaire des piles constitue un facteur défavorable.

En cas de crue décennale, le lit sera beaucoup plus rectiligne, ce qui est favorable à des piles rectangulaires, mais le lit sera aussi plus profond avec des vitesses bien plus fortes. Le pont pourra peut-être résister si le bras vif passe bien entre les piles.

#### *Situation future*

Il s'agit du passage de plusieurs crues ou crue d'une très forte déclenchant une érosion régressive importante atteignant les deux ponts. La durée nécessaire pour atteindre cette situation n'est pas prévisible car elle dépend du nombre de cyclones qui toucheront la Réunion dans les prochaines années.

La cote extrapolée des fonds se situe alors vers (55) selon le graphique précédent. Aucune des piles ne pourra résister même avec les travaux d'urgence effectués.

Il est à noter qu'une conduite d'eau potable alimentant une partir du Port emprunte ce pont.

- **Pont béton RN1**

Les cotes des fondations des piles sont les suivantes :

RD	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8-RG
Initial	63	63	63	63	63	63	67	64.67
Après renforcement	63	63	59	59	59	59	65	62.64

#### *Situation actuelle et future proche*

Les fonds mesurés du bras vif post Gamède sont actuellement à la cote (66) environ dans la partie alluvionnaire (même remarque que pour le pont métallique, les bras se rebouchent en décrue, les fonds en crue sont plus bas : 62 à 63 environ)

- Les piles P1 et P2 pourraient être détruites en cas de déplacement du bras vif en crue vers la RD
- Toutes les autres piles P3 à P6 ont pour le moment une petite marge de sécurité

#### *Situation actuelle et future proche*

- La cote extrapolée des fonds lors des prochaines crues se situe vers (55) selon le graphique précédent. Dans ce cas, même les piles à fondation(59) résisteront difficilement. Le pont pourra résister si les bras vifs passent bien entre les piles et ne se déplacent pas vers les piles P1 P2.

La pile P5 a été renforcée post Gamède par la DDE en mars 2007 sur conseil du CETE Méditerranée. Des gros blocs de basalte de rivière ont été déposés autour des piles.

- *Cas des piles P7 et P8 du pont béton ancrées sur les Lahars*



après le cyclone Gamède

En l'état, les fondations des piles P7 et P8 résisteront difficilement à une nouvelle crue ainsi que la culée et la pile P7 du pont métallique situées juste à l'amont et aussi fondées sur les lahars.

Il a été constaté pendant Gamède des écoulements transversaux venant de la partie centrale et rejoignant le cañon, à l'amont et à l'aval immédiat de la pile P7 érodant dangereusement les lahars, qui dans cette zone, semblent particulièrement friables.

- **Pont axe mixte**

Ce pont n'est a priori pas en danger, bien que les fonds soient descendus en dessous du blindage de protection faisant apparaître les barrettes supportant les pieux, ce qui n'aurait jamais dû avoir lieu.



Pont axe mixte Photo CNR Fév. 2007 avant Gamède

Post Gamède, le lit semble s'être un peu remblayé, les barrettes ne sont plus visibles, ce qui est un premier indice d'une évolution favorable du secteur.

Les lahars vont totalement disparaître à long terme, sous l'effet de l'érosion, ce qui est a priori une bonne chose d'un point de vue morphologique, la RdG retrouvant alors son espace de liberté initial avant aménagement dans le secteur.

Les fondations des piles des ponts béton et métallique fondées superficiellement sur les lahars doivent être complétées par des fondations profondes de manière identique aux fondations des piles dans les alluvions.

## 10 RECOMMANDATIONS

### **a) Partie endiguée**

- Il conviendra de réparer rapidement de manière préventive et curative si nécessaire tout nouvel affouillement qui se produirait en pied d'endiguement. La technique employée par la DDE-SEECL consistant à mettre des gros blocs en pied de semelle, employée en 2001 et 2003, semble efficace et pourra être reconduite,
- L'idéal serait de rendre la carapace de l'endiguement plus rugueuse sans la rendre plus vulnérable,
- L'endiguement RG aval piton Batard est vulnérable et il convient d'en tenir compte en termes de vulnérabilité, en cas de projet construction derrière l'endiguement.

### **b) Epis**

Les épis sont en danger comme il a été démontré. Il est proposé :

- de renforcer rapidement les épis n° 9, 8, 7 par la technique de blocs en pied déjà utilisée pour l'endiguement,
- de préciser la limite de stabilité des épis en cas d'affouillement en pied ainsi que les conséquences d'une rupture d'épi, d'étudier les possibilités de renforcer plus notablement les épis par travaux en sous œuvre.

### **c) Ponts RN**

Le confortement des piles des deux ponts RN est en cours à la DDE service SGT et n'est pas l'objet de ce rapport. Cependant des conseils de différents ordres peuvent être émis à la lumière de l'évolution morphologique de la RdG.

- *Pont métallique*

Le pont métallique semble condamné à moyen terme même avec le confortement provisoire effectué en mars 2007.

- *Conduite AEP passant sur le pont métallique*

Compte tenu du risque de destruction du pont métallique, il paraît souhaitable de construire un by-pass par le pont béton. Au minimum, les études devraient être effectuées pour démarrage immédiat des travaux en cas d'effondrement du pont métallique.

- *Pont béton*

Seuls des travaux lourds et exécutés rapidement de reprise en sous œuvre de toutes les piles sur une profondeur d'une dizaine de mètres permettra de sauver l'ouvrage, y compris les piles P7 et P8 fondées sur les lahars.

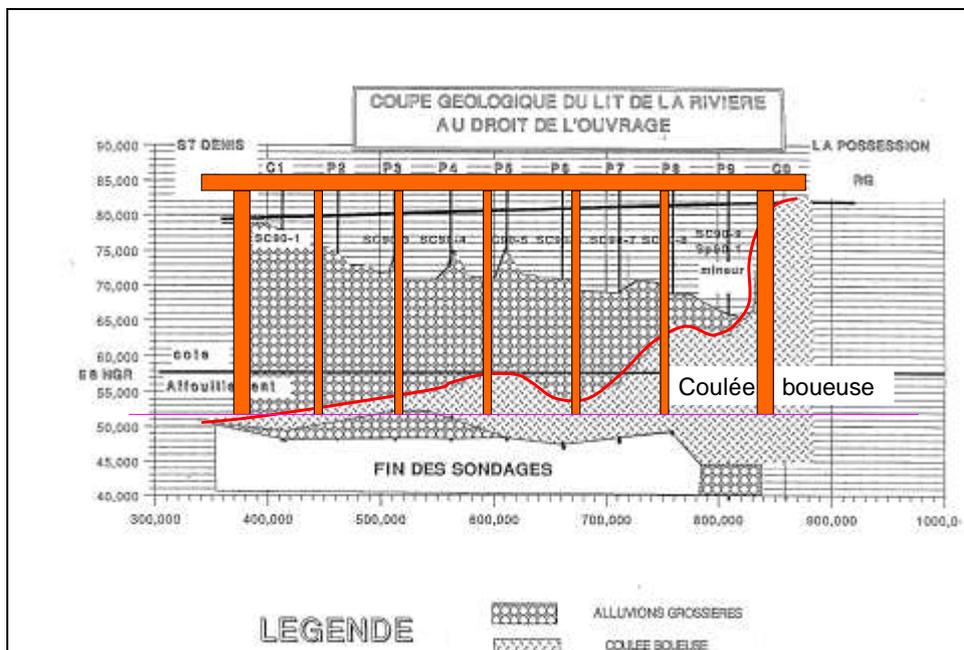
Il est nécessaire :

- de ne pas boucher le cañon qui constitue par son débit en crue un frein à l'érosion régressive dans le lit alluvionnaire parallèle. Boucher le cañon et supprimer sa débitance pourraient signer prématurément l'arrêt de mort des deux ponts,
- d'effectuer seulement un confortement localisé de la chute située au droit des piles P7 et P8, pour éviter leur ruine et celle de la pile P7 du pont métallique,
- de surveiller la régression de l'érosion de lahars dans le cañon
- d'effectuer des carottages dans les lahars et de mesurer leur résistance à l'abrasion (déjà proposé à la DDEE-SGT et au CETE)
- à long terme de laisser les lahars se désagréger complètement pour retrouver un meilleur espace de liberté à la RdG, favorable à tous les ouvrages.

- *Nouveau pont*

On ne peut que conseiller la programmation la plus rapide possible d'un nouvel ouvrage de franchissement, avec des piles fondées profondément, toutes à la même cote même dans les lahars, et doté impérativement de piles circulaires.

Une coupe schématique du futur pont pourrait être :



## **11 ASPECT SURVEILLANCE - PREVISION**

La surveillance des épis devra être renforcée ainsi que l'évolution du lit dans le secteur des épis et des ponts de la RN.

Il paraît nécessaire de mieux prévoir l'évolution morphologique de la RdG. Pour cela, il est proposé :

- d'étudier la régression du fond du lit de la RdG en fonction du temps, afin d'en apprécier l'ampleur et la vitesse d'évolution, pour mieux anticiper les risques et programmer les travaux éventuels,
- De surveiller l'évolution du lit à l'amont dans le bassin versant par le levé de quelques profils en travers, après chaque grosse crue, pour apprécier les fluctuations du transport solide arrivant,
- d'avoir une meilleure vision du comportement géomorphologique à long terme du bassin versant de la RdG, ce qui nécessitait une étude fondamentale et l'organisation d'un suivi à long terme.

## 12 ASPECT SECURITE

- *Sécurité endiguement*

- Il est souhaitable d'interdire en crue l'accès de l'endiguement au public.

- *Sécurité épis*

Il est souhaitable :

- d'interdire en crue l'accès des épis et berges au public
- De bien appliquer la réglementation de non construction dans une bande de 50m le long de la berge (village Rivière des Galets en particulier)

- *Sécurité ponts*

Plusieurs piles (et culées) RD des deux ponts RN sont déjà perchées c'est à dire que les fondations sont plus hautes que le lit actuel, et ceci ira en empirant avec les crues. Un déplacement du bras vif suffira donc à détruire la pile et le pont.

- Il paraît donc nécessaire de bien surveiller en crue toute évolution des bras vifs en rive droite
- De surveiller particulièrement les attaques en biais des piles de pont rectangulaires du pont métallique (attaque typique des petites crues)
- de ne pas hésiter à fermer à la circulation les deux ponts amont même pour des petites crues dans les deux cas précédents, surtout hors période cyclonique (circulation non arrêtée) avec déviation par le pont axe mixte qui ne présente a priori pas de risque.