

N° 005170-01

août 2007

Effondrement du pont de la rivière Saint-Etienne sur l'île de la Réunion



Conseil général des ponts et chaussées

Rapport n° 005170-01

**EFFONDREMENT DU PONT DE LA RIVIERE ST-ETIENNE
SUR L'ÎLE de la RÉUNION**

(25 février 2007)

RAPPORT

établi par

Christian BINET-TARBÉ de VAUXCLAIRS

Ingénieur général des ponts et chaussées

JUILLET 2007



Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

note à l'attention de

Monsieur le Ministre d'Etat,
Ministre de l'écologie, du développement
et de l'aménagement durables

Direction générale des routes

ministère
de l'Écologie
du Développement
et de
l'Aménagement
durables

La Défense, le 2 août 2007

**Rapport n°005170-01 : Effondrement du pont de la rivière St-Etienne
sur l'île de la Réunion**

Conseil général des
ponts et chaussées

Le Vice-président

Par note en date du 23 mars 2007, vous m'avez demandé de diligenter une **mission sur l'analyse des causes de l'effondrement du pont sur la rivière St-Etienne sur l'île de la Réunion** survenu le 25 février 2007 lors du passage du cyclone GAMEDE.

Je vous prie de bien vouloir trouver ci-joint le rapport établi par Monsieur Christian BINET-TARBÉ de VAUXCLAIRS, ingénieur général des ponts et chaussées.

Il ressort de l'expertise menée que l'effondrement est la conséquence de l'affouillement de l'une des piles du pont dont la ruine a entraîné successivement la chute des deux travées adjacentes, puis la ruine de tout l'ouvrage en raison de la résistance insuffisante des piles en maçonnerie ancienne qui n'ont pu s'opposer à l'effet d'entraînement du tablier dans l'axe de l'ouvrage.

La raison pour laquelle la pile en question n'a pas résisté à une crue d'importance modeste, décennale tout au plus, alors que sa date de construction remonte à 1882 environ, provient d'un approfondissement chronique du profil de la rivière du fait d'extractions de matériau dans son lit, et du déplacement progressif au cours des crues antérieures du tracé du chenal principal vers la pile défaillante.

Les recommandations qui sont faites sont

- d'une part de protéger au plus vite les piles du pont restant supportant l'autre sens de circulation, car leur vulnérabilité peut-être considérée comme critique du fait de la nouvelle configuration du lit de la rivière,
- d'autre part de prendre toutes les mesures permettant de mettre fin aux extractions de matériau qui aujourd'hui encore perdurent de manière illicite malgré les mesures réglementaires déjà prises,
- enfin d'améliorer la surveillance des ouvrages dont la situation est similaire, en procédant après chaque crue à un relevé précis des écoulements et à une réévaluation du risque compte tenu de la nouvelle situation constatée.

Je vous informe, que sauf objection de votre part, ce rapport sera rendu communicable et publié sur le site internet du ministère, dans un délai de deux mois à compter de la présente diffusion.

Tour Pascal B
92055 La Défense cedex
téléphone :
01 40 81 70 40
télécopie :
01 40 81 23 93

Claude MARTINAND

Diffusion du rapport n° 005170-01

- le directeur du Cabinet du ministre de l'écologie, du développement et de l'aménagement durables	1 ex
- le directeur du Cabinet du secrétaire d'Etat chargé des transports	2 ex
- le secrétaire général	2 ex
- le directeur général des routes	5 ex
- le vice-président du CGPC	1 ex
- la présidente et les présidents de section du CGPC	7 ex
- les secrétaires des 3ème et 6ème sections du CGPC	2 ex
- le coordonnateur de la MIGT 12	1 ex
- les coordonnateurs du collège « Projets d'infrastructure »	2 ex
- le coordonnateur du collège « Eau, hydrologie et météorologie »	1 ex
- les coordonnateurs du collège « Génie civil et ouvrages d'art »	2 ex
- archives CGPC	1 ex

Résumé

A la suite de l'effondrement de l'un des ponts permettant à la RN1 de franchir la rivière St-Etienne dans l'île de la Réunion, événement qui s'est produit pendant le passage du cyclone Gamede, le 25 février 2007, le Directeur général des routes a sollicité une expertise du Conseil général des ponts et chaussées pour déterminer les causes et les conséquences à tirer de l'événement.

Le rapport conclut que l'effondrement est la conséquence de l'affouillement de l'une des piles dont la ruine a entraîné successivement la chute des deux travées adjacentes, puis la ruine de tout l'ouvrage en raison de la résistance insuffisante des autres piles qui n'ont pu s'opposer à l'effet d'entraînement du tablier dans l'axe de l'ouvrage en raison de leur constitution en maçonnerie ancienne.

La vulnérabilité de la pile affouillée provient de sa cote de fondation insuffisamment profonde dans les alluvions, telle qu'elle résulte de sa construction qui remonte à 1879-1882. Cette vulnérabilité qui n'était pas apparue comme problématique au moment de la construction du tablier en 1993, est devenue critique par la conjugaison de deux phénomènes, d'une part l'approfondissement progressif du lit de la rivière constaté depuis plusieurs années par suite d'une exploitation excessive des matériaux de la rivière, et d'autre part le déplacement de certains chenaux de la rivière dont l'évolution fréquente au cours des crues a conduit l'un d'entre eux à faire prise directe sur la pile concernée après l'événement cyclonique de 2006.

Compte tenu de la situation actuelle, le rapport recommande de renforcer rapidement les piles du second pont restant en exploitation situé juste en amont et dont la vulnérabilité a augmenté, si possible avant la prochaine saison cyclonique.

Il recommande aussi, d'une part de prendre toutes les mesures permettant d'arrêter les exploitations illicites de matériau encore en activité dans le lit de la rivière, et d'autre part de mettre en place une surveillance des ouvrages de situation comparable après chaque événement hydraulique majeur afin de réévaluer le risque d'affouillement de chaque pile au regard des changements observés du lit de la rivière (position et profondeur des chenaux), et d'en tirer les mesures de protection adéquates.

Sommaire

1	Introduction.....	5
2	Données sur l'ouvrage.....	5
3	Faits observés.....	6
4	Cause directe de l'effondrement.....	7
	4.1 Ruine de la pile P7.....	7
	4.2 Mécanisme d'effondrement du tablier.....	8
5	Etat de l'ouvrage et mesures antérieures de gestion	9
	5.1 Inspections.....	9
	5.2 Etudes et travaux de protection contre les affouillements.....	9
6	Evolution du lit de la rivière.....	11
	6.1 Approfondissement du lit au droit du pont.....	11
	6.2 Évolution de la position des chenaux.....	12
7	Conclusion sur l'effondrement.....	13
8	Risques résiduels.....	13
9	Recommandations	14
10	Liste des personnes rencontrées.....	15
11	Liste des rapports consultés.....	16
12	Photographies et plans.....	17

1 Introduction

Lors du passage du cyclone Gamède sur l'île de la Réunion au cours de la journée du 25 février 2007, l'un des deux ponts routiers de la RN1 qui franchit la rivière St-Etienne s'est effondré (pont aval, sens nord-sud).

Par lettre en date du 23 mars 2007, le Directeur général des routes a demandé au Conseil général des ponts et chaussées de diligenter une mission afin de procéder à l'analyse des causes de l'effondrement du pont.

Les objectifs assignés à cette mission sont de tirer toutes les leçons utiles pour la conception de ponts similaires et pour la gestion du patrimoine d'ouvrages (surveillance et entretien des ouvrages eux-mêmes, gestion du domaine fluvial et de son environnement).

Le présent rapport rend compte de la mission qui a été faite sur la base d'une analyse des données disponibles et d'une série d'entretiens menés sur place avec les services de l'Etat concernés (DDE, DRIRE), avec les bureaux d'études ayant produit des rapports sur la gestion de la rivière et celle de l'ouvrage (BRGM, SOGREAH), ainsi qu'avec le SETRA qui a produit une reconstitution du mécanisme de rupture, et avec le CETE Méditerranée qui a mené les études géotechniques du site.

La mission s'est déroulée sur place les 5, 6 et 7 juin 2007.

Les listes des personnes rencontrées et des rapports d'étude consultés sont données en annexe.

2 Données sur l'ouvrage

Le franchissement de la rivière St-Etienne était constitué de deux ouvrages,

- l'ouvrage amont supportant le sens de circulation sud-nord, constitué d'un pont en caisson précontraint à travées indépendantes construit en 1977 sur des piles datant de 1937-1938
- l'ouvrage aval, supportant le sens nord-sud de circulation, constitué d'un pont en béton précontraint construit en 1992-1993 sur les anciennes piles du pont des chemins de fer réunionnais datant de 1879-1982.

Les longueurs des ouvrages sont sensiblement identiques (520 m). Ils comportent 10 travées d'environ 52 m. Les appuis sont numérotés C1 (culée rive droite), P2, ..., P10, C11 (culée rive gauche). La longueur des ouvrages est nettement inférieure à la largeur du lit naturel de la rivière qui est de l'ordre de 800 à 900 m ; dans la partie complémentaire située sur la rive gauche, la route a été construite sur le remblai réalisé vers 1876-1880 pour les besoins du chemin de fer CFR ; ce remblai est protégé par des épis dont la qualité peut être considérée comme médiocre puisqu'ils ont été en partie détériorés par la crue provoquée par le cyclone Gamede.

Les piles des deux ouvrages sont en maçonnerie de basalte bien appareillée avec un remplissage en béton grossier.

Les fondations sont constituées de massifs en maçonnerie qui reposent

- pour l'ouvrage aval directement sur le sol naturel,
- pour l'ouvrage amont sur une semelle de 1 mètre d'épaisseur en béton, armée par des fers ou vieux rails dont certains sont ancrés dans les alluvions.

Les niveaux de fondation sont variables, mais se situent au plus bas à la cote 23,80 NGR (piles P7 et P9 du pont aval), et au plus haut à la cote 30 NGR (Pile P2 du pont amont).

Le sol d'appui est constitué d'alluvions sur la partie des ouvrages situés près de la rive gauche (à partir des piles P6 et P7), alors que sur l'autre partie proche de la rive droite il existe, à une profondeur variable, une formation dite « coulée boueuse » constituée de formations détritiques, à blocs anguleux, très hétérogènes, contenus dans une matrice cendreuse dont les propriétés mécaniques permettent de la considérer comme non affouillable mais érodable. Ceci veut dire que ce matériau peut s'éroder progressivement par l'effet du frottement des granulats charriés par la rivière, mais que le phénomène ne peut évoluer brutalement sans prévenir, à condition d'en assurer une surveillance attentive après chaque crue majeure. Il n'en est pas de même pour les alluvions sans cohésion qui peuvent s'affouiller sur de grandes profondeurs au cours d'un même événement.

Certaines piles sont fondées sur la coulée boueuse ; d'autres, fondées sur les alluvions, ont fait l'objet de mesures de protection contre les affouillements soit au moment de la construction, soit plus récemment ; d'autres piles enfin comme les piles P9 et P10 situées près de la rive gauche ne sont pas protégées contre ce type de phénomène.

Cette brève description montre la diversité des situations, chaque pile devant faire l'objet d'une analyse au cas par cas, d'autant que les reconnaissances géotechniques faites jusqu'à présent ne permettent pas d'avoir des certitudes sur le niveau de la coulée boueuse dont le toit s'enfonce de la rive droite vers la rive gauche pour disparaître peut-être vers les piles P7 à P10 et la culée C11.

Pour répondre à cette interrogation, des sondages ont été réalisés au droit de chaque appui ; les premiers résultats en seront donnés plus loin.

3 Faits observés

L'île de la Réunion a subi directement les effets du cyclone Gamede entre le samedi 24 et le mercredi 28 février 2007.

L'alerte rouge a été déclenchée à deux reprises en raison du trajet suivi par le cyclone qui l'a amené à revenir à proximité de l'île le 27 février après un premier passage le 24 février.

La pluviométrie a atteint une valeur de 173 mm en 3 heures sur le cirque de Cilaos, ce qui correspond à une pluie de fréquence décennale. Quant à la houle, elle a atteint la valeur maximale de 10m,90 sur la cote ouest, ce qui peut la faire considérer comme une houle de fréquence cinquantennale.

La rivière St-Etienne n'étant pas équipée d'une station de mesure automatique de débit, contrairement à d'autres sites de l'île, une simulation du débit de la rivière a été faite entre le 24 février et le 27 février à partir des pluviométries mesurées et d'un modèle de calcul numérique (calculs effectués par M.Boquet, ancien directeur de l'office de l'eau, aujourd'hui en fonction à la Préfecture).

Le débit aurait atteint la valeur de 1300 m³/s le dimanche 25 février vers 12h00, pour diminuer ensuite vers 700 m³/s, puis pour augmenter de nouveau jusqu'à un maximum de 2000 m³/s le 27 février vers 12h00. Ce maximum correspond à une période de retour de l'ordre de 10 ans, sachant que la crue centennale est, elle, de l'ordre de 5.700 m³/s.

Toutefois, il convient de noter que l'effondrement du pont s'est produit le dimanche 25 février matin, au moment de la montée de la première crue, à un moment où le débit était de l'ordre de 1000 m³/s, valeur qui correspond à une période de retour de 5 ans environ, donc d'importance assez modeste globalement mais pouvant présenter un impact significatif si le débit est concentré sur une

faible largeur (point développé plus loin).

L'effondrement n'a pas été observé, car il s'est produit pendant la première alerte rouge. Lorsque la DDE est intervenue, la totalité du pont était tombée dans une position qui n'a guère évolué ensuite, si ce n'est le déplacement de quelques morceaux du caisson du pont poussés par les eaux lors de la deuxième phase de la crue le 26 février.

Aucune trace de la pile P7 n'était visible, contrairement aux autres piles, ce qui a conduit rapidement à penser que l'effondrement du pont provenait de la ruine de cet appui emporté par les flots.

Au moment de l'intervention de la DDE, le courant était maximal aux abords de la pile P7 avec un biais assez prononcé. Les piles P8 et P9 du pont amont semblant menacées, la DDE a essayé d'ouvrir un chenal de décharge entre la pile P10 et la culée C11 avec une pelle en travaillant à partir du chemin d'accès à la décharge qui passe sous l'ouvrage, mais en vain. C'est la rivière elle-même qui, plus tard, a trouvé son propre passage en centrant son débit sur la pile P9, probablement au moment où un nouveau chenal s'est créé le long de la rive gauche, érodant celle-ci sur une grande longueur en amont du pont, et venant attaquer les épis protégeant le remblai d'accès à l'ouvrage.

4 Cause directe de l'effondrement

4.1 Ruine de la pile P7

La disparition de toute trace de la pile P7 du pont, contrairement aux autres piles, conduit à faire l'hypothèse que l'ouvrage a péri par déficience de cette pile. Les sondages effectués en juin 2007, dont deux au droit de la pile P7 aval n'ont pas mis en évidence le moindre reste de maçonnerie de cette pile. La position exacte des sondages est encore à confirmer, et il n'est pas certain qu'il aient été réalisés à l'emplacement exact de la fondation de la pile P7 aval. Mais même s'il s'avère que les sondages ont été réalisés un peu à côté de cet emplacement, on aurait pu s'attendre à trouver des débris, ce qui n'a pas été le cas.

L'hypothèse que le choc d'un embâcle aurait pu provoquer la destruction de la pile n'apparaît pas très crédible, et aucun élément ne peut étayer cette hypothèse. Quant à celle d'un événement de type « lave torrentielle », la situation très en aval et la faible pente du lit (1,8% en moyenne) sont des éléments qui conduisent à l'éliminer, même si un tel événement a été observé le 2 février 2006 dans le bras de la Plaine en amont du captage de la SAPHIR. L'explication la plus plausible est donc celle d'un affouillement, même si l'on peut imaginer qu'un choc survenu une fois l'affouillement réalisé ait pu déclencher le phénomène ; mais il est plus vraisemblable que ce sont les blocs de matériau charriés par la rivière qui ont joué le rôle de déstructuration de la maçonnerie.

Les arguments en faveur de cette hypothèse sont, d'une part que la fondation de la pile P7 était devenue structurellement fragile compte tenu de son niveau d'appui par rapport à l'abaissement du fond du lit, et d'autre part que le courant principal était centré sur cette pile au moment de l'effondrement.

S'agissant de la position du chenal, les photographies prises en 2006 par la DDE postérieurement au cyclone DIWA, et celles prises juste après la ruine de l'ouvrage le 25 février, donc bien avant que la crue soit maximale, attestent que le chenal principal était centré sur la pile P7 aval avec une attaque biaise assez prononcée venant de la rive gauche, la pile amont ne faisant plus écran.

Cette situation est différente de celle qui existait en 2002 après le passage du cyclone DINA où les relevés topographiques et les photographies prises à cette époque montraient que le chenal

principal était plutôt centré sur la pile P6, la pile P7 étant située sur la berge rive gauche de ce chenal.

Le fait que le chenal était à cette époque plus centré dans le lit général de la rivière au voisinage de la pile P6 a fait dire à la SOGREAH, dans son étude de 2002 sur les risques d'affouillements, que le renforcement de la pile P7 n'était pas prioritaire et pouvait être différé, contrairement aux deux piles P6 (amont et aval), à la pile P2 et la culée C0 avals qui ont été renforcés conformément aux recommandations du rapport.

Il est donc compréhensible que l'effondrement du pont se soit produit au début de la crue, à un moment où le courant était concentré dans un chenal de faible largeur et centré sur la pile P7 aval. D'une manière générale, les affouillements de piles résultent en effet des tourbillons provoqués par l'obstacle qu'elles constituent dans le courant ; et l'accélération locale du courant contribue à la déconsolidation des alluvions puis à leur mise en suspension ou à leur charriage.

Pour ce qui est de la pile P7, la position du courant principal était nouvelle par rapport aux crues antérieures, ce qui explique que le phénomène ne se soit produit qu'en février 2007.

Bien entendu, tout ceci est à mettre en relation avec l'approfondissement général du lit de la rivière qui a été constaté les années passées et relaté dans plusieurs rapports de la SOGREAH et qui est la conséquence des extractions importantes de matériaux faites dans le lit à des fins de production de granulats pour les besoins du BTP (voir chapitre 6).

4.2 Mécanisme d'effondrement du tablier

Le SETRA a procédé à une reconstitution du mécanisme d'effondrement du tablier en faisant l'hypothèse que le phénomène initiateur a été la ruine de la pile P7.

Cette analyse a été faite à partir des caractéristiques structurelles du tablier (géométrie et précontrainte longitudinale) issues des documents récupérés auprès de la DDE. Elle tient compte des constatations suivantes :

- Toutes les piles (à l'exception de la pile P4) se sont effondrées en basculant vers la pile P7
- Le tablier s'est déplacé de plusieurs mètres vers la pile P7 (sur la culée C11 ce déplacement est de l'ordre d'une quinzaine de mètres)
- Certaines travées ont basculé vers l'aval

La modélisation par le calcul explique la rupture par flexion des travées encadrant la pile P7 mais n'explique pas celle des autres travées qui auraient du rester en place, compte tenu de l'indépendance des câbles de précontrainte dont la continuité n'était assurée que sur deux travées. Ainsi les câbles de précontrainte assurant la stabilité des deux travées adjacentes à la pile P7 étaient ancrés dans l'entretoise des piles P6 et P8 et n'allaient pas au delà.

Pour expliquer la ruine des autres travées, il faut supposer que ce sont les appuis qui n'ont pas résisté (en plus de la pile P7). L'explication qu'en donne le SETRA est que les travées adjacentes à la pile P7 ont entraîné avec elles dans leur chute les deux parties de tablier situées de part et d'autre, y compris jusqu'aux deux culées. Il est étonnant en effet de voir aujourd'hui que la dernière travée du pont a avancé d'une quinzaine de mètres à partir de la culée C11 et que la situation du tablier au voisinage de la culée C1 est similaire.

Ainsi, les piles sollicitées horizontalement en raison du blocage longitudinal des appuis ont été soumises à des efforts horizontaux importants qu'elles n'ont pu supporter en raison de leur constitution en maçonnerie (un tel matériau ne peut en effet reprendre que des efforts de

compression). Cette hypothèse est bien illustrée par la cassure que l'on peut voir sur la pile P4 restée debout, et par la brisure franche de certaines piles en deux morceaux.

C'est donc l'insuffisance de résistance des piles en flexion dans le sens longitudinal, du fait de leur constitution en maçonnerie, qui serait la cause de leur cassure et de la chute complète du tablier. De plus, il est possible que le phénomène ait été aggravé par un effet de torsion du tablier, comme le suggèrent la position déversée du tablier vers l'aval et la cassure particulière des piles P3 et P8.

Ainsi cette analyse conforte l'hypothèse faite dès le départ que la cause initiale est la ruine de la pile P7.

5 Etat de l'ouvrage et mesures antérieures de gestion

5.1 Inspections

La dernière inspection des ouvrages faite par la DDE remonte aux mois de juillet et septembre 2006. Il s'agit d'une inspection de type IQOA (Image qualité des ouvrages d'art) telle qu'elle a été instituée par la circulaire du 26 décembre 1995 de la Direction des routes, et dont la périodicité est de trois ans. Le classement de l'ouvrage aval résultant de cette inspection a été 2S, ce qui correspond à un état satisfaisant de la structure. La lettre S est la conséquence de quelques défauts sur les trottoirs et leurs bordures. Il est toutefois signalé que la pile P6 présente à sa base quelques dégradations des joints de la maçonnerie, mais sans grande gravité.

Conformément à la procédure, la visite IQOA ne consiste qu'en un examen visuel, sans moyen particulier d'investigation. Seules les parties émergentes des piles peuvent être inspectées.

La dernière inspection détaillée de l'ouvrage aval, avec relevé de tous les défauts, remonte à 1993 et a été faite par le laboratoire régional de Toulouse au moment de la mise en service de l'ouvrage. Il aurait été souhaitable qu'elle soit renouvelée tous les 6 ans conformément à la procédure, mais une telle inspection même renouvelée périodiquement n'aurait pu donner d'informations plus complètes sur l'état de la partie non apparente des fondations.

La DDE, sensibilisée par l'évolution constatée du lit après le cyclone DINA de 2002, procède depuis cette date à un relevé topographique du fond du lit après chaque événement météorologique important. Ces relevés sont complémentaires à ceux réalisés pour les études hydrauliques de la rivière dont il sera fait état au paragraphe suivant. Il sont bien adaptés au suivi du niveau des alluvions, même si leur restitution graphique mériterait quelques améliorations pour tenir compte de la variabilité des cotes en plan.

Mais il faut noter que la connaissance du niveau des affouillements atteint au cours d'une crue est très difficile, voir inaccessible, car au moment de la décrue de nouveaux alluvions se déposent et empêchent toute mesure de leur épaisseur. Si l'on voulait obtenir cette information, il faudrait pouvoir mesurer la profondeur de l'eau en période de crue, chose qui paraît irréalisable en raison de la turbulence de l'eau et du charriage des matériaux.

5.2 Etudes et travaux de protection contre les affouillements

La première étude détaillée relative à des travaux de protection des piles a été produite par la SOGREAH en septembre 2002 ; cette étude a été faite à la demande de la DDE afin de tirer les conséquences des observations faites après le cyclone DINA (22 et 23 janvier 2002).

Cette étude présente l'intérêt de retracer l'historique du franchissement et de l'évolution du lit de la rivière depuis la construction des ouvrages. Nous y reviendrons au chapitre suivant.

S'agissant des piles elles-même, le rapport fournit, pour chaque ouvrage et pour chaque appui, des données sur le niveau des fondations et le niveau des protections existantes, ainsi qu'une estimation du niveau de la coulée boueuse considérée comme un sol « non affouillable ».

Ouvrage amont											
	C1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	C11
Cote Fondat.	29,5	30	29,2	28,7	25,9	25,4	26,35	28	24,8	25,35	26,4
Niv. protec		26					23	24			
Coulée boueuse	29,5	30	29,2	28,7	25,9 ?	25,4 ?	23 ?	?	?	?	?

Ouvrage aval											
	C1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	C11
Cote Fondat.	27	27,74	27,74	24,85	23,84	24,87	23,8	24,3	23,8	24,3	23,8
Niv. protec	26	27,27									
Coulée boueuse	27	27,74	27,74	24,85	23,8?	?	?	?	?	?	?

NB : Ces valeurs sont à prendre avec beaucoup de prudence, et demandent à être confirmées par des relevés sur le terrain compte tenu des difficultés à recaler les cotes des sondages effectués en juin 2007.

Ces deux tableaux illustrent les incertitudes sur l'existence et la cote du toit de la coulée boueuse à partir des piles P7 voire P6, et mettent en évidence les travaux de protection déjà réalisés en 1993 à l'époque de la construction du tablier du pont aval (il s'agit des appuis pour lesquels le niveau de protection est renseigné). Les travaux ont été décidés à la suite du passage du cyclone Colina qui a provoqué le creusement d'un chenal entre les piles P7 et P8 et une érosion de la culée C1 aval. Ils ont consisté, pour les piles P7 et P8 du pont amont à réaliser une jupe protégeant de l'érosion les alluvions situés sous la semelle des piles.

Au moment de l'étude menée en 2002, donc après le cyclone DINA, le lit était constitué de deux bras, l'un passant entre la culée C1 et la pile P2, l'autre entre les piles P6 et P7 mais avec un biais qui rapprochait le chenal des piles P7 amont et P6 aval.

Compte tenu de cette situation, la SOGREAH a conclu qu'il convenait en première urgence de renforcer la culée C1 aval (cote 24), la pile P2 aval (cote 25), et les deux piles P6 (cote 22), sachant que la pile P7 amont avait déjà été renforcée en 1993 et que la pile P7 aval était jugée moins menacée.

En deuxième urgence, l'étude proposait de traiter les piles P3, P4 et P5 amont, et les piles P3, P5, P7

et P8 aval. Les travaux étaient considérés comme des aménagements à moyen terme à définir en fonction de l'évolution du lit et des caractéristiques de la coulée boueuse (que le rapport engageait implicitement à reconnaître).

C'est ainsi que les travaux considérés comme de première urgence furent réalisés par la DDE dans les mois qui suivirent grâce à des financements du Conseil Régional.

Toutefois, il convient de noter que les derniers sondages réalisés en juin 2007 au droit de tous les appuis du pont amont infirment les valeurs fournies par la SOGREAH en 2002 sur la cote de la coulée boueuse. Aucune trace de cette coulée n'a été trouvée au droit des appuis P6 et suivants. Quant à la pile P5 le niveau de la coulée est inférieur à celui de la fondation (d'une valeur qui reste à préciser). Ceci amène à conclure que la pile P5 et les piles P6, P7 et P8 amont, bien que renforcées en 2003 pour P6 et en 1993 pour P7 et P8, ne sont pas complètement à l'abri d'un affouillement si celui-ci allait au delà du niveau le plus bas des ouvrages réalisés.

6 Evolution du lit de la rivière

6.1 *Approfondissement du lit au droit du pont*

De nombreuses études ont été produites sur la question (voir références en annexe), que ce soit pour la protection de l'ouvrage, pour les possibilités d'extraction de matériau, ou pour la protection des rives. Malgré des objectifs différents, toutes les études abordent la question de la vulnérabilité des fondations du pont par suite de l'approfondissement progressif du lit de la rivière. Les relevés topographiques faits à l'occasion de chaque étude attestent de cette évolution dont on peut apprécier l'ampleur en comparant la situation actuelle avec les photographies prises au cours de la construction du premier pont en 1977.

Toutes les études s'accordent sur le fait que cet approfondissement est la conséquence des extractions de matériau dans le lit de la rivière, qu'elles aient été faites en aval du pont par un phénomène d'érosion régressive atteignant l'ouvrage, ou qu'elles soient encore réalisées en amont en provoquant un déficit de matériau de charriage.

Ce second point qui pourrait apparaître au premier abord comme mineur est décrit par la SOGREAH dans son étude de 1998 sur les potentialités d'extraction de la manière suivante :

« En extrayant des matériaux en amont non loin des ponts, on s'expose à un risque d'érosion progressive qui pourrait aggraver les risques d'approfondissement au droit des ponts.

En extrayant en amont assez loin des ponts, on crée un déficit en matériau en amont des ponts qui va limiter le volume solide transporté en aval sans que la capacité de charriage ne soit modifiée. Compte tenu de la taille des matériaux composant le lit de la rivière, le déficit en matériaux sera prélevé dans le lit. Il y aura donc aggravation de l'érosion en aval de la zone d'extraction donc aggravation du risque pour le pont. »

Le rapport de la SOGREAH rédigé en octobre 1998 conclut ainsi qu'il n'est pas envisageable d'extraire de nouveaux matériaux sans aggraver le risque, qui est déjà fort, de déstabilisation du pont de la RN1, et que des travaux de protection du pont sont indispensables à court terme.

Ce rapport a conduit le Préfet de la Réunion à remettre en cause son arrêté du 12 janvier 1993 qui réglementait les extractions, et à prendre un arrêté en date du 19 octobre 1998 interdisant toute extraction dans le lit de la rivière à l'exception de curages ponctuels limités en volume et dans le temps. Mais ce n'est qu'en janvier 2001 que cette interdiction est devenue effective après de nombreux reports et autorisations ponctuelles dans l'attente de trouver une solution alternative pour

l'approvisionnement en matériaux du sud de l'île actée par l'approbation du schéma départemental des carrières, le 9 juillet 2001.

En 2002, l'étude de la SOGREAH faisant suite au cyclone DINA constate que la crue a profondément modifié la morphologie du lit avec la création d'un chenal important entre les piles P5 et P8, la limite gauche du lit se situant un peu au delà de la pile P8, et avec un abaissement de l'ordre de 4 à 5m par rapport à 1998.

Compte tenu de la situation constatée en amont et en aval du pont, le rapport conclut que l'on peut encore s'attendre à un abaissement du lit qui pourrait atteindre la cote 25,5 NGR au droit des ponts.

L'étude suivante sur la morphologie et le régime hydraulique de la rivière a été réalisée par la SOGREAH au cours de l'année 2006, en réponse à la commande de la commune de St-Louis portant sur la faisabilité d'une protection de la berge rive droite en aval du pont. Cette étude tient compte des effets observés du passage de la tempête tropicale DIWA en mars 2006. L'analyse de la topographie du lit au droit des ponts a montré une certaine stabilité des fonds moyens et contrairement à ce qui était prévu dans l'étude de 2002, aucun signe d'exhaussement en aval, ce qui fait dire que les apports de matériaux charriés par la crue de DIWA avaient été piégés dans les zones déficitaires du lit et les fosses d'extraction situées en amont.

Cette analyse s'appuie sur le fait que les photographies aériennes ont mis en évidence la poursuite d'extractions illégales dans le lit vif de la rivière, notamment en amont du radier Ouaki, compromettant ainsi le retour de la rivière à un profil d'équilibre. En cas de poursuite des extractions, le rapport prévoit donc une poursuite de l'abaissement du profil en long au droit des ouvrages et une augmentation de leur vulnérabilité.

6.2 Évolution de la position des chenaux

A l'exception des très grosses crues provoquant une emprise complète du lit de la rivière, les écoulements se font préférentiellement dans des chenaux où se concentrent les courants et les effets d'érosion. La vulnérabilité de chaque pile est donc fortement liée à sa position éventuelle dans un chenal ou à son voisinage. Dans le premier cas, elle est plus dégarnie et exposée à des risques importants d'affouillements, dans le second cas elles est soumise au risque d'érosion de la berge du chenal et à une exposition plus directe dans le chenal.

Il serait vain de reproduire tout l'historique de la position des chenaux, tant leur variabilité est importante.

Toutefois une certaine stabilité peut être constatée pour le chenal situé au bordure de la rive droite passant aujourd'hui entre la culée C1 et la pile P2. Cette stabilité provient probablement de l'émergence à cet endroit de la coulée boueuse dans laquelle le chenal s'inscrit et qu'il érode petit à petit, mais de manière assez lente.

Par contre le chenal principal plus centré dans le lit a une position plus fluctuante : Alors qu'en 1993, le courant principal était plutôt axé sur les piles P7 et P8 (ce qui a conduit à renforcer les piles correspondantes du pont amont), on constate qu'après DINA en 2002, le chenal était centré sur les piles P6, puis qu'après DIWA en 2006 il était axé sur la pile P7 aval avec un biais sensible.

Au cours de GAMEDE, on a vu aussi la remise en activité du chenal longeant le rempart de la rive gauche qui avait été creusé par le cyclone Clotilda en 1987 et qui n'était plus actif. Le courant de ce chenal a détérioré les épis en gabions protégeant le remblai d'accès au pont dans sa partie amont. Ce chenal est aujourd'hui à sec, mais il a créé une érosion importante de la rive gauche en amont de l

l'ouvrage. De plus, sous l'ouvrage, l'érosion du lit a dépassé la pile P10 pour atteindre le chemin desservant le centre d'enfouissement, alors qu'au cours des crues précédentes l'érosion était restée bien en deçà (pied de P8 amont au cours de DIWA, entre P8 et P9 au cours de DIWA).

Ces constatations montrent la variabilité dans le temps de la position du chenal principal, avec une tendance à se rapprocher de la rive gauche, au point d'attaquer le remblai d'accès situé sur cette rive, tendance que l'on pourrait juger naturelle si l'on fait observer que ce remblai obstrue sur une grande longueur le lit naturel de la rivière.

Qu'en sera-t-il à la prochaine crue ? il est difficile de le prédire, même si l'on peut penser que l'évolution actuelle qui tend à éroder la rive gauche en amont de l'ouvrage risque de se poursuivre. La stabilité du remblai d'accès au pont en cas de crue importante de périodicité centennale, voire cinquantennale, est donc une question que l'on ne peut éluder.

7 Conclusion sur l'effondrement

Il ressort des études, des faits observés au cours des crues passées, et des constatations faites pendant et après le cyclone Gamede, que la ruine de l'ouvrage est très certainement la conséquence d'un affouillement de la pile P7.

Cet affouillement a été favorisé :

- par un approfondissement général du lit moyen de la rivière causé par les extractions de matériau non seulement en aval mais aussi en amont des ponts.
- par une évolution de la position du chenal principal vers la rive gauche qui s'est trouvée axée sur la pile P7 du pont aval à la suite du cyclone DIWA de mars 2006, et de plus avec un biais significatif.
- par une cote de fondation de la pile qui avait pu être jugée suffisante antérieurement, mais qui par suite des modifications dans la morphologie des fonds était devenue critique même pour des crues d'importance modeste.

Par suite de la ruine de la pile P7, les travées adjacentes qui ne pouvaient résister sans appui intermédiaire sont tombées et ont provoqué un déplacement horizontal des autres travées dans l'axe du pont en direction de la pile P7. Les piles ne pouvant s'opposer à ce déplacement en raison de leur constitution en maçonnerie, leur rupture a donc été la cause de la chute de l'ensemble du tablier.

8 Risques résiduels

L'évolution du lit de la rivière, tant en terme d'approfondissement général que de position des chenaux, augmente le risque pour l'ouvrage amont. La réactivation, lors de Gamede, de l'ancien chenal produit par le cyclone Clotilda (1987) le long de la rive gauche rend notamment les piles P7, P8, P9, P10 du pont amont plus vulnérables.

Il convient donc de réviser les conclusions du rapport de 2002 de la SOGREAH qui ne proposait, pour le pont amont, que des travaux à moyen terme sur les piles P3, P4 et P5.

Bien que les piles P7 et P8 aient été renforcées en 1993 et la pile P6 en 2003, la reconnaissance qui vient d'être faite sur la cote du toit de la coulée boueuse montre que cette protection n'a pas l'efficacité que l'on croyait avoir jusqu'à présent. La pile P5 n'est pas non plus à l'abri d'affouillements.

Ainsi, il convient de réactualiser l'étude de vulnérabilité du pont amont pour tenir compte de l'évolution du lit constatée au cours de Gamede et du résultat des reconnaissances géotechniques faites en juin dernier. Les piles les plus vulnérables doivent être confortées rapidement, et le maximum doit être fait avant la prochaine saison cyclonique. Si des priorités doivent être définies, il conviendra de le faire à partir du relevé topographique du fond du lit actuel, de la position et de la profondeur des chenaux et d'une analyse hydraulique sur les évolutions possibles des chenaux en amont de l'ouvrage.

9 Recommandations

Il ressort de l'analyse précédente les recommandations suivantes ayant pour objectif de prévenir le renouvellement d'un tel sinistre :

Pour la rivière St-Etienne :

1. Renforcer rapidement la protection de l'ouvrage amont, et traiter les piles les plus sensibles avant la prochaine saison cyclonique ;
2. Réparer et renforcer les épis du remblai d'accès pour les rendre plus résistants à une nouvelle crue importante ;
3. Assurer un suivi précis du lit de la rivière pendant et après chaque crue afin de noter la position des chenaux et la topographie du fond du lit, avec pour objectif de réévaluer le risque d'affouillement de chaque pile ;
4. Maintenir l'interdiction de toute extraction dans le lit (y compris en amont) et mettre en oeuvre tous les moyens de mettre fin aux extractions illicites ;
5. Concevoir le nouvel ouvrage avec des fondations profondes arrêtées à une cote suffisante pour être à l'abri de tout affouillement ;
6. Procéder à une évaluation du risque en cas de crue centennale, y compris sur la tenue du remblai d'accès à partir de la rive gauche.

Pour les autres rivières de l'île :

Sans avoir plus d'informations sur le cas des autres rivières de l'île, et pour les ouvrages dont la vulnérabilité a été reconnue en raison de leur assise dans des alluvions potentiellement affouillables, une bonne mesure de gestion devrait consister à procéder de manière systématique après chaque crue importante à un relevé précis de la situation du lit (en plan et en altitude), et à une réévaluation du risque. La liste des ouvrages soumis à une telle procédure devrait être formalisée.

10 Liste des personnes rencontrées

DDE

- Jean-Luc MASSON, directeur
- Marc TASSONE, directeur adjoint
- Ivan MARTIN, chef du service de la gestion de la route
- Vincent MALFERE, chef du service des grands travaux
- Yvan LEFEUVRE, chef de la CDOA par interim
- Franck ORGERIT, adjoint au chef de la CDOA
- Philippe DI BERNARDO, Agence Sud – UAUH
- Nicolas FREITAS, Coordonnateur de l'agence sud
- Jean TOUBLANC, chef du bureau Service de l'eau et de l'équipement des collectivités (SEECL)

DRIRE

- Thierry LE CORRE, responsable des carrières

SOGREAH

- Eric TIRIAU, responsable du pôle hydraulique

BRGM

- M. NEDELLEC

CETE Méditerranée

- Bernard BESCOND
- José-Luis DELGADO

SETRA

- Jean-Michel LACOMBE
- Thierry SAEZ

11 Liste des rapports consultés

<i>Auteur</i>	<i>Réf.</i>	<i>Date</i>	<i>Titre</i>
SOGREAH	32 4036 R1	00/08/1992	Extraction de matériaux dans le lit de la rivière St-Etienne
SOGREAH	514542 R2	00/10/1998	Etude des potentialités d'extraction dans la rivière St-Etienne
SOGREAH	2850016R2	00/09/2002	RN1-Protection contre les affouillements des ouvrages d'art de la rivière ST-Etienne
SOGREAH	4700186	00/01/2007	Protection de la berge rive droite de la rivière St-Etienne – Etude de faisabilité
BRGM		23/02/07	Diagnostic géologique sur les difficultés d'exploitation des captages du Bras de la Plaine depuis janvier 2007
SETRA-CETE d'Aix en Provence		08/03/07	Rapport de mission sur l'effondrement du pont aval du franchissement de la rivière St-Etienne à la Réunion
SETRA		27/06/07	Analyse du mécanisme d'effondrement du tablier
CETE d'Aix	Rapport provisoire	00/07/2007	Affouillement des appuis des ponts de la RN1 sur la rivière des Galets et la rivière St-Eienne

12 Photographies et plans

Sujet	Date de prise de vue
<i>Pendant GAMEDE :</i>	
1. Plan de situation	
2. Histogramme de la crue	20/03/2007
3. Vue générale du site après début des travaux du radier	19/03/2007
4. Vue générale après mise en service du radier	09/05/ 2007
5. Vue du tablier amont pendant la crue	26/02/2007
6. Vue vers la rive droite à l'emplacement de la pile P7 disparue	28/02/2007
7. Vue vers la rive gauche à l'emplacement de la pile P7 disparue	28 /02/2007
8. Vue de l'emplacement de l'ancienne pile P7 après décrue	01/03/2007
9. Avancée du tablier à la culée C11	01/03/2007
10. Vue de la pile P4 fracturée	01/03/2007
11. Vue aérienne du lit de la rivière après Gamede	~ 04/2007
<i>Situation antérieure :</i>	
12. Vue aérienne IGN après DINA	2003
13. Vue aérienne après passage de DIWA	05/03/2006
14. Vue des piles P7 amont et aval après DINA	~ 2002
15. Pile P7 aval à la fin de DIWA	09/03/2006
16. Pile P7 aval dans le chenal entre P7 et P8 amont	09/03/2006
17. Piles P8 amont et aval pendant DIWA	06/03/2006
18. Pile P7 aval après DIWA	06/09/2006
19. Piles P8 amont et aval après DIWA	06/09/2006
20. Vue de la coulée boueuse entre C1 et P2	~ 2002

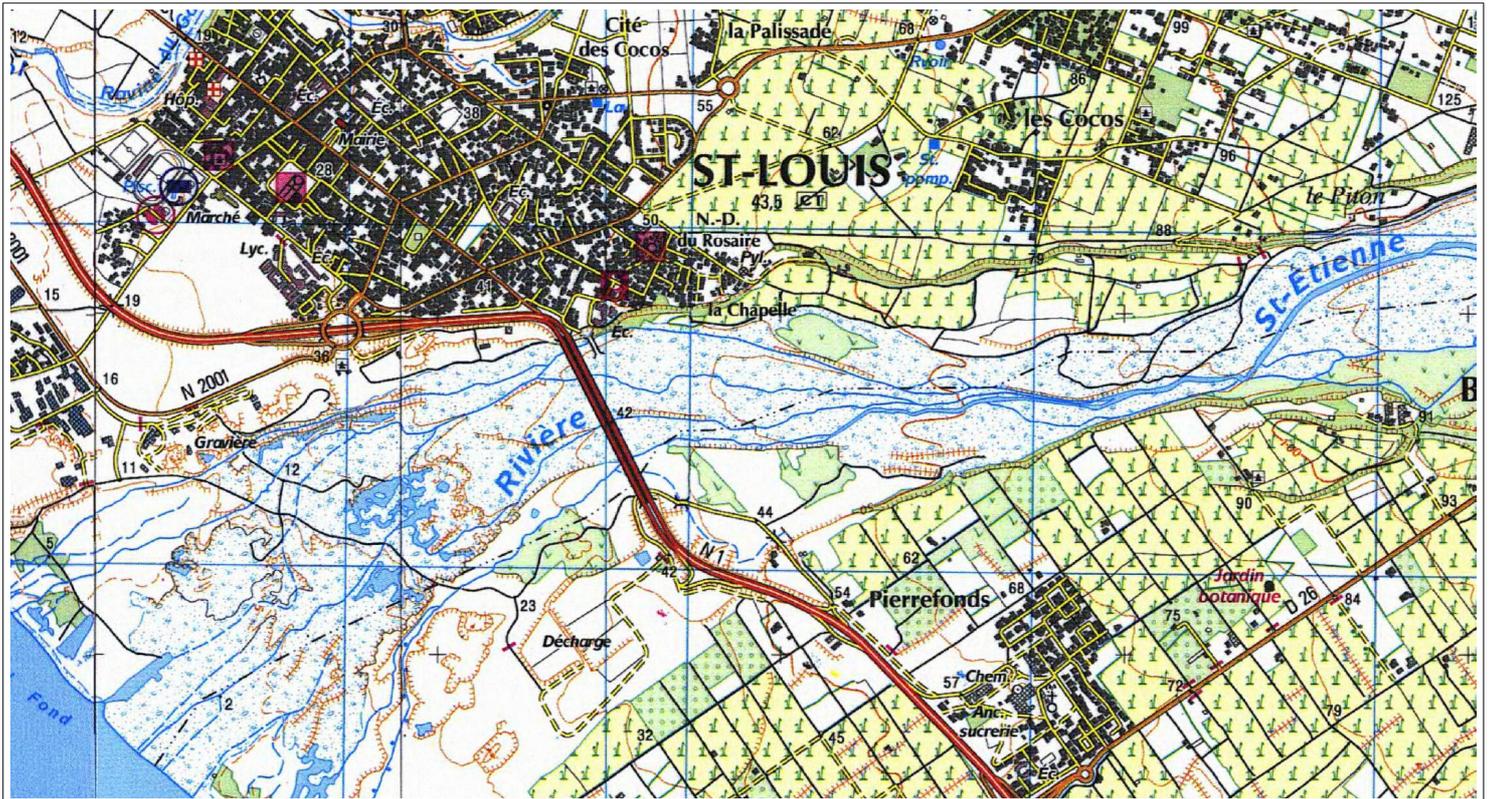


Photo 1 : Plan de situation

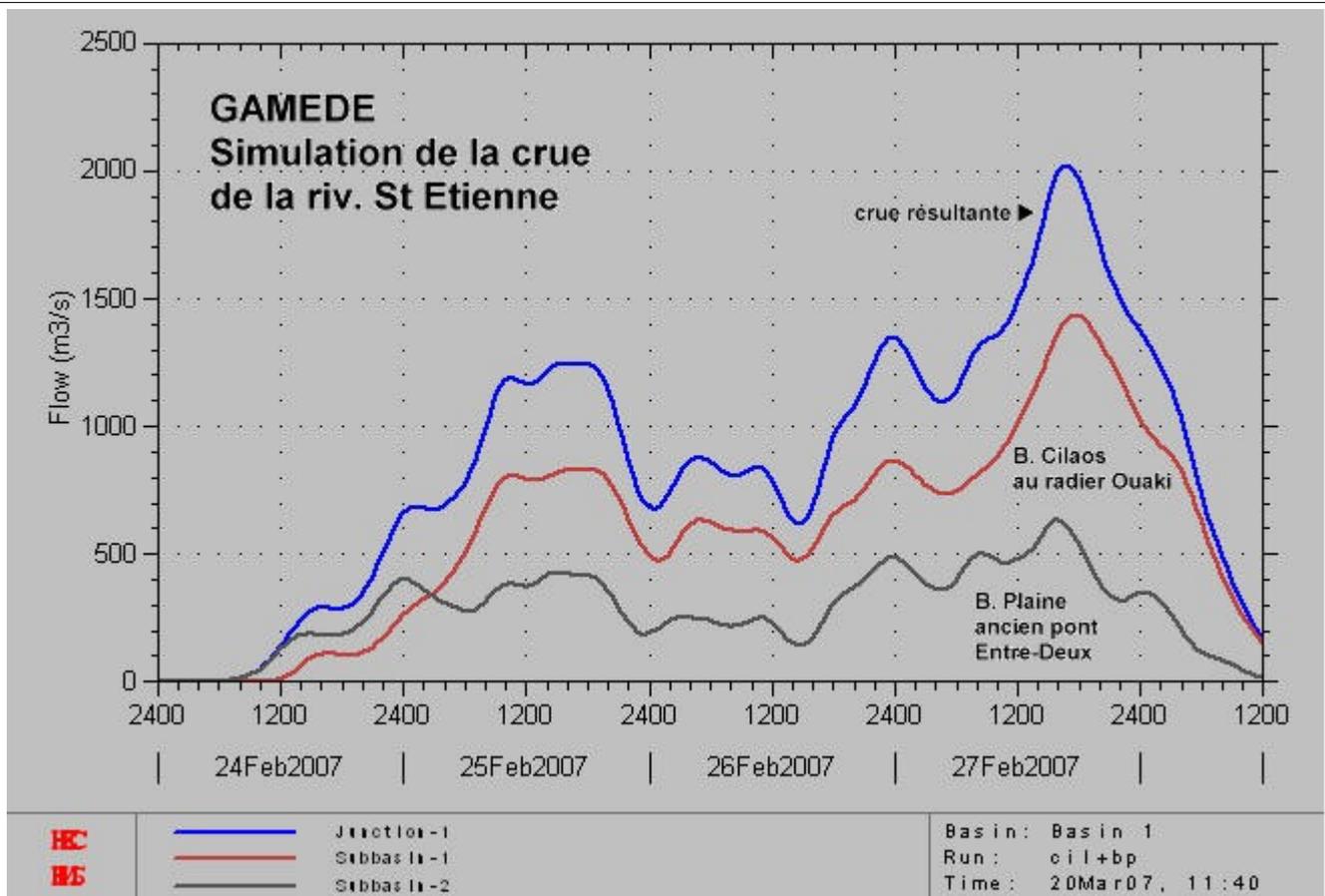


Photo 2 : Histogramme de la crue



Photo 3 : Vue générale du site après début des travaux du radier



Photo 4 : Vue générale après mise en service du radier



Photo 5 : Vue du tablier amont pendant la crue



Photo 6 : Vue vers la rive droite à l'emplacement de la pile P7 disparue



Photo 7 : Vue vers la rive gauche à l'emplacement de la pile P7 disparue



Photo 8 : Vue de l'emplacement de l'ancienne pile P7 après décrue



Photo 9 : Avancée du tablier à la culée C11



Photo 10 : Vue de la pile P4 fracturée



Photo 11 : Vue aérienne du lit de la rivière après Gamede



Photo 12 : Vue aérienne IGN après DINA



Photo 13 : Vue aérienne après passage de DIWA



Photo 14 : Vue des piles P7 amont et aval après DINA



Photo 15 : Pile P7 aval à la fin de DIWA



Photo 16 : Pile P7 aval dans le chenal entre P7 et P8 amont



Photo 17 : Piles P8 amont et aval pendant DIWA



Photo 19 : Pile P7 aval après DIWA



Photo 19 : Piles P8 amont et aval après DIWA



Photo 20 : Vue de la coulée boueuse entre C1 et P2

note à l'attention de

Monsieur Christian BINET,
ingénieur général des ponts et chaussées

ministère
des Transports
de l'Équipement
du Tourisme
et de la Mer



Conseil général
des Ponts
et Chaussées
Le Vice-Président

La Défense, le 16 mai 2007

Référence n° 005170-01

Par note du 23 mars 2007, le Ministre des transports, de l'équipement, du tourisme et de la mer (direction générale des routes) a demandé au Conseil général des ponts et chaussées de diligenter une **mission sur l'analyse des causes de l'effondrement du pont sur la rivière Saint-Etienne sur l'île de la Réunion.**

Je vous confie cette mission pour laquelle vous bénéficierez de l'appui des membres du réseau scientifique et technique. Elle est enregistrée sous le n° 005170-01 dans le système de gestion des affaires du CGPC.

J'attire votre attention sur le souhait du Directeur de disposer du rapport final pour le mois de juillet 2007.

Conformément à la procédure en vigueur, je vous demande d'adresser votre rapport de fin de mission au président de la 3^{ème} section et de m'en faire parvenir simultanément un exemplaire, aux fins de transmission au Ministre des transports, de l'équipement, du tourisme et de la mer (Directeur général des routes).

Signé

Claude MARTINAND

Tour Pascal B
92055 La Défense cedex
téléphone :
01 40 81 21 22
télécopie :
01 40 81 23 24
courriel :
Cgpc-sg
@equipement.gouv.fr

Copies à : M. le Président et M. le Secrétaire de la 3^{ème} section
M. le Coordonnateur de la MIGT 12

005170-01



La Défense, le

14/02/2007

ministère
des Transports
de l'Équipement
du Tourisme
et de la Mer



direction générale
des routes

**Le ministre des transports, de l'équipement, du
tourisme et de la mer**
à
**Monsieur le vice-président du Conseil général des
ponts et chaussées**

objet : Dommages causés par le cyclône Gamède sur l'île de la Réunion

Lors du passage le 25 février dernier du cyclone Gamède sur l'île de la Réunion, le pont routier aval sur la rivière St Etienne s'est effondré.

Les services ont d'abord géré les priorités que constituaient l'évaluation des dégâts, les expertises avant remise en service des ouvrages et le lancement des opérations de réparation ou de reconstruction.

Il convient maintenant d'analyser les causes de cet effondrement de façon à en tirer toutes les leçons utiles pour la conception des ponts similaires et pour la politique de gestion du patrimoine d'ouvrages (surveillance et entretien des ouvrages eux-mêmes et gestion de l'environnement du cours d'eau franchi – exploitation de gravières, endiguements).

Compte tenu des interrogations que suscite localement la catastrophe, cette analyse doit être conduite avec tout le recul et l'indépendance nécessaires.

Je souhaiterais pour cette raison qu'un membre du Conseil général des ponts et chaussées en soit chargé. Il disposera bien entendu de l'appui du réseau scientifique et technique.

Les résultats sont attendus pour juillet 2007.

Je vous serais donc reconnaissant de bien vouloir désigner un missionnaire.

Arche Sud
92055 La Défense cedex
téléphone :
01 40 81 12 39
télécopie :
01 40 81 12 55
courriel :
DGR@equipement.gouv.fr

Pour le ministre des transports, de l'équipement, du tourisme et de la mer
Le directeur général des routes

Secrétariat général
Bureau
Rapports
et Documentation
TOUR PASCAL B
92055 LA DEFENSE CÉDEX
Tél. : 01 40 81 68 12/ 45