

RIVIERE DES GALETS - ILE DE LA REUNION - 20 ANS D'EXPERIENCE DE GESTION DES RISQUES

RIVIÈRE DES GALETS REUNION ISLAND - 20 YEAR EXPERIENCE OF RISK MANAGEMENT

Francis Fruchart¹, Gilles Delphin², Sylvain Reynaud³, Christian Séraphine⁴, Joël Cadudal⁵,
Paul Bonnet⁶, Hervé Lemahieu⁷

RESUME

L'île de la Réunion détient les records mondiaux de pluviométrie. La rivière des Galets est une des plus puissantes de l'Ile, avec débits torrentiels très importants. La rivière est équipée d'imposants épis de protection et le cône de déjection aval d'un endiguement, protégeant une zone industrielle. Une maîtrise du risque de rupture des ouvrages en crue était donc indispensable. La maîtrise du risque a été abordée de manière pragmatique par ses différents volets: Estimation des risques et diminution de l'aléa rupture d'ouvrages ; Prise en compte de l'évolution morphologique imprévue ; Réduction de la vulnérabilité derrière les digues ; Travaux de réparation ou de confortement préventif des ouvrages ; Formation technique des équipes Les études théoriques se sont combinées avec les travaux de confortement et la surveillance entretien des ouvrages, dans un esprit d'anticipation, tout en maîtrisant la vulnérabilité derrière les ouvrages, en visant un risque raisonnable accepté. Toute cette démarche s'est déroulée dans un esprit de concertation et de collaboration entre partenaires complémentaires ce qui a conduit à une véritable maîtrise des risques naturels dans un univers torrentiel très hostile. Il conviendra de la poursuivre dans l'avenir. NB : cette publication relate une aventure humaine d'une dizaine de personnes pendant une vingtaine d'années. C'est avant tout un témoignage.

Mots clés : rivière torrentielle, risque, endiguements, mitigation, île de la Réunion

ABSTRACT

Close to Madagascar, the Reunion Island holds world records for pluviometry. 'La Rivière des Galets' (Pebble River) is one of the most powerful rivers on the island with huge discharges. Upstream banks have been equipped with imposing groynes while the downstream fan has been equipped with huge dykes, protecting an industrial area. Mastering the risk has been pragmatically addressed, developing several aspects for the last 20 years: Dyke break hazard assessment; Taking into account unexpected morphological evolution of the river; Vulnerability mitigation of the area behind the dykes; Repairing works and precautionary preventive reinforcement works; Structure monitoring ; Training. These different steps have been performed in close collaboration with complementary stakeholders. This approach has led to a comprehensive and consistent mastering of hydraulic risk.

Keywords: torrential river, risk, embankment, mitigation, Reunion Island

¹ Expert en morphologie, Direction de l'Ingénierie, CNR Compagnie Nationale du Rhône, Lyon France (e-mail : f.fruchart@cnr.tm.fr)

² Expert en génie civil, Direction de l'Ingénierie, CNR Lyon France

³ Ingénieur en hydraulique, Direction de l'Exploitation, CNR Lyon France

⁴ Chef du Service Travaux, ville du Port, Ile de la Réunion

⁵ Chef du département DEAL, Saint Denis, Ile de la Réunion

⁶ Retraité DDE, Surveillance travaux endiguement Rivière des Galets

⁷ Région Réunion, département Planning, Saint Denis

INTRODUCTION

L'île de la Réunion détient les records mondiaux de pluviométrie, ayant atteint 1825mm par jour (cyclone Denise 1960) ou encore 4869mm en 4 jours (cyclone Gamède 2007). La rivière des Galets est une des plus puissantes de l'île, avec des débits pouvant atteindre quelques milliers de m³/s avec écoulements torrentiels et vitesses de 10m/s, avec une capacité p érosive hors du commun.

La partie amont de la rivière est équipée d'imposants épis de protection, protégeant la commune de la Rivière des Galets. Le cône de déjection aval est équipé d'un endiguement assez étroit, destiné à gagner des terrains industriels constructibles, qui font cruellement défaut à la Réunion. Ces terrains dits 'exondés' restent soumis au risque de rupture de digues. Ces ouvrages datent des années 90.

Une maîtrise du risque de rupture des ouvrages en crue était donc indispensable.

Pour cela, un véritable partenariat s'est établi depuis une vingtaine d'années entre le SIVU regroupant les communes du Port et de Saint Paul, propriétaire des ouvrages, la DDE de la Réunion en charge de la surveillance et entretien des ouvrages, et la Direction de l'Ingénierie de la Compagnie Nationale du Rhône, agissant en tant qu'ingénieur conseil.

La maîtrise du risque a été abordée de manière pragmatique par ses différents volets:

- Estimation des risques et diminution de l'aléa rupture d'ouvrages

Une étude de risque de rupture des ouvrages a été menée. Pour cela, un modèle physique spécifique fond mobile a été réalisé au laboratoire CNR à Lyon en 1994. Suite à cette étude, les digues existantes ont été renforcées en tenant compte du risque de rupture mais aussi de la vulnérabilité à l'aval des digues.

- Prise en compte de l'évolution morphologique imprévue de la rivière des Galets

La morphologie de la rivière des Galets évolue constamment avec les crues. De ce fait, les risques changent. Un suivi des fonds par profils en travers est régulièrement pratiqué. Une étude morphologique a été réalisée en 2007 et a montré une dangereuse tendance à l'incision du lit, jusqu'à 10m de profondeur à certains endroits, mettant en péril les ouvrages, épis et endiguement, mais par dessus tout les fondations de deux ponts situés dans le secteur. Cette étude a proposé un renforcement préventif des différents ouvrages,

- Réduction de la vulnérabilité derrière les digues

Des instructions précises concernant la réglementation ont été introduites dans le Plan Local d'Urbanisme, définissant l'urbanisation et le type d'installation autorisée, de manière à éviter toute sur-catastrophe ou pertes en vie humaines en cas de rupture d'ouvrages,

- Travaux de réparation ou de confortement préventif des ouvrages

Des travaux divers ont été réalisés sous maîtrise d'œuvre DDE au fil des années visant à limiter les risques de rupture et maintenir les ouvrages en bon état: renforcement des digues et épis existants, terrassement derrière les digues visant à limiter les dégâts en cas de rupture, chenal d'ultime secours, mise en place de stocks d'enrochement, réparations très rapide suite à dégâts lors des cyclones,

- Entretien et surveillance des ouvrages

Surveillance et entretien des ouvrages ont été mis en place par la DDE de manière méthodique, avec visites d'inspection régulières, missions d'expertise CNR Ingénierie lorsque nécessaire,

- Formation des équipes

Plusieurs stages concernant surveillance et entretien des ouvrages ont été réalisés par CNR Ingénierie.

HISTORIQUE - UNE LONGUE MARCHÉ VERS LA CONSTRUCTION DES OUVRAGES

Les imposants ouvrages le long de la rivière des galets impressionnent les touristes visitant la Réunion. Ils ignorent le parcours du combattant et les années d'efforts qu'il a fallu pour décider de les construire. L'historique suivant en rend compte :

- 1879 : Construction du chemin de fer et creusement du port. C'est sur le delta formé par la rivière des Galets et la ravine à Marquet que s'installent les ouvriers, constituant ainsi le noyau de la future ville du port.

- 1886 : Inauguration du port de commerce de la Pointe des Galets.

- 1895 : Création de la commune du Port.

- 1905 : Un cyclone provoque une forte crue de la rivière des Galets: le remblai de la voie ferrée, haut de six mètres, est emporté sur une largeur d'environ trente mètres,
- 1926 : Le 26 avril, un cyclone dévaste l'île: *'La petite ville du Port est détruite en partie, le viaduc du chemin de fer qui traverse la rivière des Galets a été emporté, de nombreuses maisons détruites, des récoltes ravagées....'* raconte Pierre Griffé dans son livre: *'La ballade des Galets'*.
- 1932 : La commune du Port est sinistrée par le passage d'un cyclone: de nombreux édifices sont détruits par les vents mais aussi par les eaux de la rivière en crue.
- 1948 : Fort cyclone: débit annoncé comme *'égal au Rhône en crue'*.

La rivière des Galets, à plusieurs reprises, démontre sa fougue et menace la ville du Port. Ces crues, notamment en période cyclonique, provoquent régulièrement des dégâts, parfois considérables, aux habitations.

- Avant 1961 : Construction d'un épi sous le majorât de Léon de Lepervanche.
- 1965 : La DDE réalise une digue en terre à partir du piton Bâtard (point géologique naturel). Malheureusement, cette installation détourne les flots vers la ville du Port.
- 1967 : Le maire du Port, André Gontier, commande une étude à la SOGREAH (Société Grenobloise d'Etude et d'Aménagement Hydraulique) afin que la menace représentée par la rivière des Galets soit écartée.
- 1967 – 1968 : Premières études pour un système de défense par un ensemble de « murs-épis ». Le souci principal est la protection de la ville contre les crues. Mais les études débouchent sur des travaux aux coûts trop élevés.
- 1971 : Arrivée à la mairie du Port de l'équipe de Paul Vergès. Un schéma global d'aménagement de la commune est élaboré selon les orientations suivantes: insertion de la population dans la vie urbaine, éradication des bidonvilles et construction de quartiers neufs, création de zones d'activités en harmonie avec le développement urbain, changement du climat de la ville, ouverture sur la mer, définition d'un schéma de circulation simple, cohérent, efficace, conception global de l'urbanisation....

Mais la bonne réalisation de ces objectifs ne pouvait être sereinement envisagée sans que l'on prenne en compte le danger représenté par la rivière des Galets, les risques de crues contrariant notamment les projets d'extension du port. C'est pourquoi, la nouvelle municipalité insiste sur l'urgente nécessité de protéger par l'endiguement de la rivière des Galets, la population portoïse d'une part, les équipements d'Etat et régionaux d'autre part.

- 1980 : Le passage du cyclone Hyacinthe démontre de façon évidente le danger que représente pour la cité maritime la rivière des Galets: des logements au village du même nom sont emportés, le boulevard de la Marine est dévasté... Le projet d'endiguement de la rivière des galets est relancé. Le souci principal reste la protection de la ville mais un objectif complémentaire apparaît : récupérer des terrains aménageables.
- Le 6 février 1980, le conseil municipal du Port, réuni en séance extraordinaire dans le quartier SATEC (quartier directement concerné par les risques de crues) décide d'interpeller les pouvoirs publics afin qu'une protection efficace de la ville soit envisagée.
- 1981 : Le gouvernement met en place un Programme Pluriannuel d'Endiguement des Ravines.

La commune du Port s'adresse de nouveau à la SOGREAH afin que des solutions d'endiguement permettant de gagner des terrains aménageables sur le lit de la rivière soient trouvées.

ETUDES SUR MODELE PHYSIQUE ET REALISATION DES OUVRAGES

- 1982 : En août, il est décidé d'effectuer les études hydrauliques à l'aide d'un modèle physique à fond mobile, à l'échelle 1/125ème. Il est installé au Port dans un hangar de 3000 m². C'est sur ce modèle que sont étudiées plusieurs variantes puis mis au point la solution choisie.
- 1990 : Le 5 octobre, une première réunion est organisée à la Préfecture avec les élus des deux communes riveraines: Saint Paul et le Port. Ce premier contact permet par la suite aux services techniques et administratifs des deux collectivités de travailler ensemble.

- 1991 : Le 18 mars, une nouvelle réunion se déroule sous la présidence du Préfet, en présence de M. le Président de la Région. Au cours de cette entrevue, il est décidé de faire délibérer les deux conseils municipaux avant le 30 avril 1991 afin de définir la maîtrise d'ouvrage des travaux.
- 1992 : Le 17 janvier : pose de la première pierre pour des travaux d'endiguement qui dureront plus de deux ans. Les épis situés plus à l'amont seront construits en plusieurs phases.
- 1994 : *les ouvrages principaux tant espérés sont maintenant là. Ce n'est pas un point d'orgue final. Au contraire leur vie commence, ce dont les communes riveraines ont été immédiatement conscientes.*
- 1996 : Le 28 juin 1996 création, entre les communes du Port et de Saint Paul, d'un syndicat à vocation unique dénommé « SIVU de la Rivière des Galets » ayant pour objet: la gestion des ouvrages d'endiguement de la rivière des Galets, l'observation du lit de la rivière en amont, la surveillance et l'entretien du domaine public fluvial au droit des ouvrages dans le cadre d'une convention avec l'Etat.

DETAIL DES ETUDES ET TRAVAUX

Il à noter comme presque toujours que ce sont de gros dégâts qui ont poussé à la construction des ouvrages de protections. Les catastrophes semblent parfois nécessaires pour convaincre les décideurs alors que la prévention devrait s'imposer.

Les études basées sur les résultats du modèle physique préconisait la réalisation d'un chenal et de neuf murs-épis permettant de centrer l'écoulement de la crue et de récupérer par ailleurs des terrains à aménager. Il a été décidé pour des raisons budgétaires de réaliser les ouvrages en deux phases.

La première a consisté en la réalisation des tranches aval et intermédiaire permettant de récupérer des tiens constructibles, la seconde en la réalisation de la tranche amont. La maîtrise d'ouvrage a été mandatée à la SEMADER.

Pour les tranches aval et intermédiaire, la Maîtrise d'Ouvrage a confié à SOGREAH la réalisation des dossiers d'Avant Projet Détaillé et Consultation des Entreprises pour les tranches aval et intermédiaire. L'étude d'impact a été confiée au bureau d'étude BRL. Les travaux ont été confiés à l'entreprise DUMEZ. Le coût des travaux a été de 153 821 406.45 FFR TTC (environ 32 M€ actualisé 2011).

Le plan de financement a été calculé sur un montant de dépenses subventionables de 129 MF réparti comme suit: Etat 50%, Région 10%, Département 10%, Maître d'Ouvrage : 30% (le Port 70% - Saint Paul 30%), subvention FEDER 22 200 000 FFR, délai: 32 mois (entre mai 1992 à décembre 1994)

Pour la tranche Amont, la Maîtrise d'Ouvrage a confié au groupement BRL-SCP-SECMO. Les travaux ont été confiés à l'entreprise DTP Terrassement. Le coût des travaux a été de 89 millions FFR. Le financement a été le suivant: subvention Etat 50%, Région 30%, Maîtrise d'ouvrage 20% (70% le Port, 30% Saint Paul) ; délais : 42 mois (septembre 97 à décembre 2000)

On notera le très grand nombre d'organismes qui sont intervenus, aussi bien pour la technique que pour le financement, ce qui a demandé une grande pugnacité pour que le projet voie le jour.

LES OUVRAGES DE LA RIVIERE DES GALETS ET LES RISQUES ASSOCIES

La pluviométrie à l'Ile la Réunion

L'intensité des pluies à la Réunion est une des plus fortes du monde. Un bon exemple est le cyclone Gamède de février 2007. Plusieurs records mondiaux de pluviométrie ont été battus, détenus auparavant par d'autres cyclones sur l'Ile. La pluviométrie au cratère Commerson a été de:

sur 24 heures : 1625 mm :	le record mondial étant 1825 mm DENISE 1966
sur 48 heures : 2463 mm	le record mondial étant 2467 mm en 1958
sur 72 heures : 3929 mm	record mondial, le précédent était 3240 mm HYACINTHE 1980.
sur 4 jours : 4869 mm	record mondial, le précédent était 3551 mm HYACINTHE 1980
Records mondiaux sur 5, 6, 7, 8 et 9 jours: 4979 mm, 5075 mm, 5400 mm, 5510 mm et 5512 mm	

Les caractéristiques de la rivière de Galets

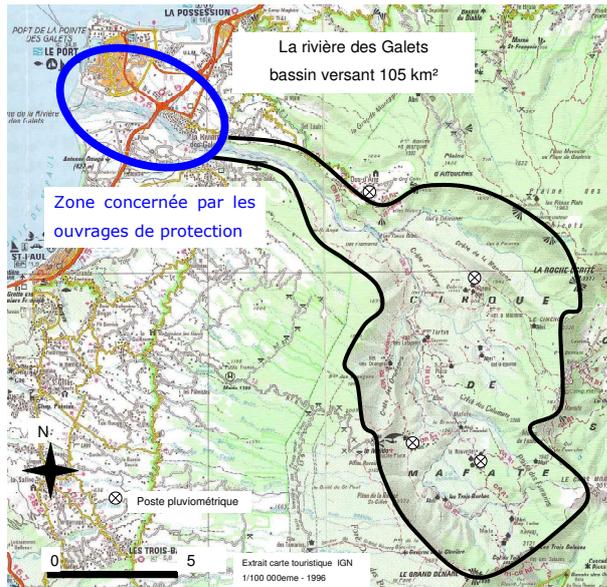


Fig. 1 Bassin versant de la Rivière des Galets et zone concernée par les ouvrages

Le bassin versant dénommé cirque de Mafate. Sa surface est de seulement 105 km². Il culmine à 3013m d'altitude au Gros Morne, à 30km de la mer, soit une pente moyenne de 10%.

A l'aval, les débits sont de 1570 m³/s pour Q10 et 2440 m³/s pour Q100, soit des débits spécifiques record de 15 et 23 m³/s/km².

La pente de la rivière dans la zone aval concernée est d'environ 2%, soit celle d'un torrent.

Les vitesses en crue atteignent 8m/s pour des petites crues et jusqu'à 10m/s (36km/h) pour les plus fortes.

Les matériaux transportés sont un mélange de matériaux fins et de très gros, constitués de basalte très dur, particulièrement abrasif et de forte densité (2.8 et +). Le diamètre médian est de 10cm, les plus gros blocs dépassent 1m de diamètre. Les plus fins produisent de l'abrasion, les plus gros des chocs, sollicitant énormément les ouvrages.



Fig. 2 Matériaux transportés par la Rivière des Galets sous le pont aval axe mixte, noter le blindage des piles

La morphologie de la rivière des galets en tant que rivière torrentielle est très particulière :

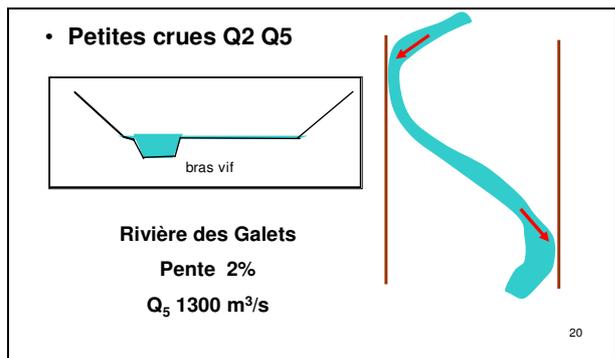


Fig. 3 Morphologie des petites crues

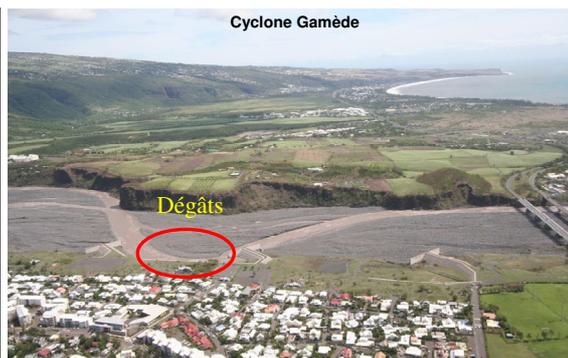


Fig. 4 Illustration cyclone Gamède 2007

Pour les petites crues, se forme un bras vif à méandre de vitesse déjà importante (5-8m/s) attaquant les berges avec un angle d'attaque voisin allant jusqu'à 45°, pouvant y créer de gros dégâts (voir photo ci avant).

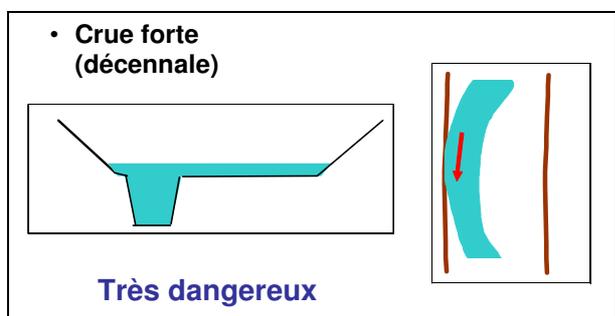


Fig. 5 Morphologie crue centennale

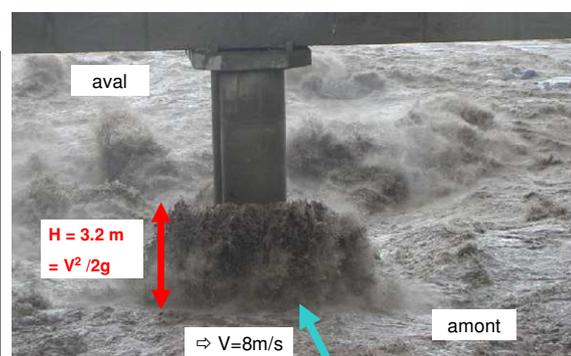


Fig. 6 Ecoulement torrentiel contre pile de pont

La crue centennale est encore plus dangereuse car le bras vif devient pratiquement rectiligne et de ce fait augmente encore sa vitesse, jusqu'à 10 m/s. Le risque majeur est alors l'attaque en pied des ouvrages. Une brèche dans une digue peut se créer. L'écoulement heurtant un obstacle, pile de pont par exemple a alors une capacité d'augmentation de niveau de 5m ! ($=V^2 / 2g$ pour 10m/s).

Le phénomène d'attaque en pied est particulièrement traître car en fin de crue, les bras vifs se rebouchent et ne laissent rien paraître des dégâts qu'ils ont pu occasionner. Des dispositifs simples ont été employés pour déterminer *a posteriori* la profondeur des bras vifs en crue.

Pente d'un torrent, débit d'un fleuve, vitesses colossales, matériaux énormes et abrasifs, morphologie peu engageante, le cocktail est réuni pour une sollicitation maximale des ouvrages: digues épis et ponts. La prudence s'impose en permanence.

Fort heureusement les fortes crues ne sont pas très fréquentes car associées uniquement aux cyclones passant sur l'île.

Les ouvrages

Ils ont été mis au point sur modèle physique au laboratoire Sogreah il y a maintenant 30 ans. Malgré le développement actuel des modèles mathématiques hydrauliques 1D, 2D voire 3D, et à fond mobile, on referait aujourd'hui un modèle physique. On notera aussi l'aspect démonstratif du modèle physique, qui a convaincu les décideurs des travaux à engager.

Des différences de comportement morphologique ont malgré tout été observées entre les résultats du modèle physique et la réalité.

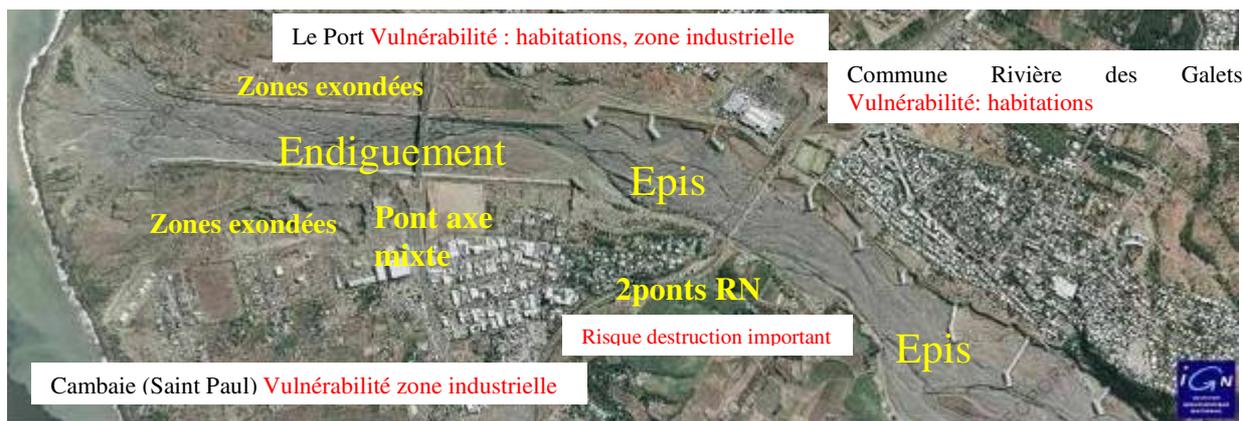


Fig. 7 Les ouvrages de protection de la rivière des Galets, endiguement et épis et vulnérabilité

La partie amont est constituée d'épis, la partie aval d'un endiguement fait de gros blocs de basalte percolés au béton, avec semelle en pied.



Fig. 8 Epi



Fig. 9 Partie endiguée (Cyclone Gamède 2007)

Dégâts survenus

A chaque grosse crue, les ouvrages souffrent, exemple de dégâts survenus pendant le cyclone Gamède 2007 :



Fig. 10 Destruction RD digue entre épis, Cf. Fig. 4 **Fig. 11** Souvèvement endiguement RG aval, Cf. Fig. 9

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 $1300\text{m}^3/\text{s}$ (crue quinquennale) en mars 2006 avec des ouvrages dimensionnés pour $3000\text{m}^3/\text{s}$.

Les dégâts observés restent pour le moment relativement modérés, n'ont pas générés de risques pour les riverains et le coût des réparations a été acceptable. Le maître d'ouvrage s'en est cependant inquiété et a souhaité connaître les causes des désordres et savoir si cette situation va perdurer, s'améliorer ou empirer. Une étude morphologique a donc été réalisée par CNR Ingénierie en 2007. Celle-ci a mis en évidence les points suivants :

Une incision inquiétante du lit

Le lit de la rivière s'est notablement enfoncé depuis la mise en service des ouvrages, atteignant 10m à l'amont de l'endiguement, ce qui est manifestement la cause des dégâts observés. Cet enfoncement conduit à des attaques en pied des fondations des ouvrages (endiguement, épis et piles des ponts) par les bras de la rivière en crue, sous-cavant les fondations, qui est le type d'attaque répertoriée comme la plus dangereuse.

L'enfoncement du lit s'effectue par un processus classique de basculement de la pente avec érosion régressive, c'est à dire qui se développe depuis l'aval de la rivière et progresse vers l'amont, au gré des crues. Actuellement l'érosion régressive a atteint les deux ponts et se propagent vers les épis situés plus en amont, tandis que l'endiguement aval semble moins sollicité.

L'étude morphologique a montré que le basculement de la pente est quasi le double de ce qui était prévu par le modèle physique de 1984. Les ouvrages, endiguement et épis, sortent donc bel et bien de la bande passante pour laquelle ils ont été conçus. Cette constatation a enclenché de nouveaux travaux de renforcement préventif. Il est donc nécessaire d'être réactif en s'adaptant en permanence à la réalité, d'anticiper autant que faire se peut les comportements futurs.

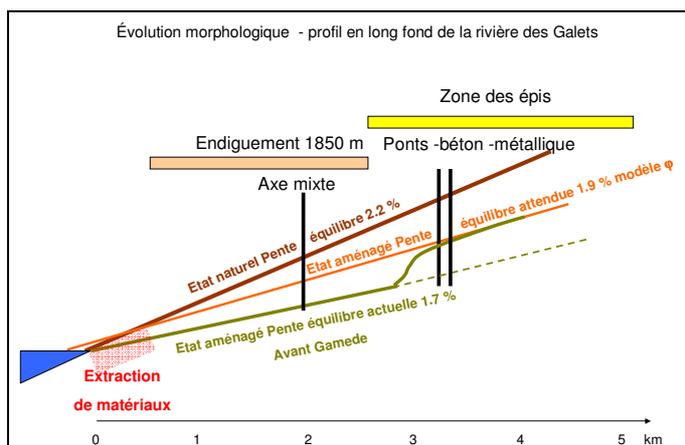


Fig. 12 Basculement de la pente de la rivière des Galets

La cause principale du basculement a pu être attribuée globalement à un manque d'espace de liberté (de mobilité) de la rivière endiguée, qui rejoint la mer pas un trajet plus court qu'à l'état naturel, facilité par un endiguement trop lisse contre lequel le bras vif vient se coller (photo fig. 9). Il aurait fallu des berges beaucoup plus rugueuses, repoussant les bras vifs et les obligeant à méandrer.

Travaux de confortement et précautions

Depuis la mise en service des ouvrages, des travaux ont été effectués :

- visant à limiter le risque de rupture
 - o construction d'un épaulement de sécurité le long des endiguements, limitant le risque de brèche. Pour cela une étude d'analyse de risque a été effectuée, basée sur des essais d'un nouveau modèle physique au 1/50, représentant une tranche d'endiguement. Il a été réalisé au laboratoire d'hydraulique de la CNR en 1994. Les essais ont conclu qu'il fallait impérativement élargir la crête de digue par un épaulement extérieur. Il a été immédiatement construit portant la largeur en crête à 10 m auquel s'ajoute l'épaulement de largeur variable : 25 m à l'amont, à 5m à l'aval,

- renforcement du pied des épis par des gabions, contre une attaque en pied par un bras vif, basé sur les essais sur modèle physique et sur les dégâts constatés sur le site.
- *visant à limiter les conséquences d'une rupture de digue*
 - pendage des terrains exondés derrière les digues, de manière à ramener le flot le long des digues en cas de rupture éventuelle,
 - construction d'un chenal d'ultime secours,
 - stock de très gros blocs le long des digues permettant la réparation très rapide d'une brèche, en cas de retour du cyclone (Firinga 1989) ou de l'arrivée d'un nouveau.

LIMITATION DE LA VULNERABILITE

En 2003 CNR Ingénierie a réalisé une étude de l'aménagement des terrains situés derrière l'endiguement pour le SIVU, ayant servi de base au Plan Local d'Urbanisme. 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.

Il a été décidé d'autoriser les installations classées au titre de la déclaration et d'interdire celles au titre de l'autorisation.

La déclinaison de ces principes a amené aux décisions pratiques suivantes, à titre d'exemple :

- Installations qui ont été refusées :

- *Centrale thermique*, non pour le risque de dégâts à la centrale en cas d'inondation, mais pour le fait que l'île sera alors en grande partie privée d'électricité pour une période indéterminée (principe: pas de sur catastrophe). Un site alternatif ne présentant pas ce risque a été trouvé,
- *Stock de produits chimiques*, car ceux-ci pourraient polluer la nappe phréatique, utilisée pour l'Alimentation en Eau Potable de la ville du Port.
- *Toute construction recevant du public de manière permanente*, tels que logement, hôtel hôpital, maison de retraite. Pour les installations industrielles ou artisanales fermées en cas de cyclone, il est demandé que les gardiens et leur famille quittent les lieux en cas de fortes crues.

- Installations qui ont été autorisées :

- *Cinéma*, car en période cyclonique, il est de fait fermé car les habitants de l'île ne sont pas autorisés à sortir de chez eux,
- *Installation de retraitement de ferrailles*, car si quelques pièces étaient entraînées vers la mer, ce serait sans grande conséquence.

Les municipalités riveraines se sont complètement approprié le principe du risque accepté quant à l'aménagement des zones soumises à risque de rupture de digue ou d'épis, avec un grand sens des responsabilités.

SURVEILLANCE ENTRETIEN DES OUVRAGES

La surveillance des ouvrages a été assurée par la DDE service SEECL depuis pratiquement la mise en service des ouvrages, jusqu'en 2011, où le statut de l'administration devenue DEAL ne permettait plus d'assurer cette tâche, qui vient d'être reprise par le bureau d'étude Sogreah.

La CNR a parallèlement depuis 2003 une mission d'appui confiée par le SIVU, mission reconduite jusqu'à ce jour. Cette mission consiste à donner un avis technique sur les mesures d'auscultation effectuées, à garantir l'intervention d'un expert, toutes affaires cessantes, en cas d'urgence (utilisé après dégâts occasionnés par le cyclone Gamède).

Dans le cadre de l'étude CNR 2003, les risques de rupture de l'endiguement longitudinaux, des épis et de la digue transversale ont été définis. Les zones concernées par l'inondation ont été délimitées puis prise en compte dans le cadre de la révision du PPRI Plan de Prévention des Risques d'inondation partiel (rivière des Galets).

1) Réduction de la vulnérabilité derrière les digues ; révision des documents de prévention

La ZERH Zone d'Exposition au Risque Hydraulique, au sens de l'article R 111.3 du code de l'Urbanisme a été définie par l'arrêté préfectoral n°2606 du 23 août 1991. Suite à la réalisation des travaux de protection, le Plan de Prévention des Risques d'inondation partiel (Rivière des Galets) a été révisé à compter de 2002.

La révision a été réalisée dans le cadre de la circulaire interministérielle du 30 avril 2002 relative à la politique de l'Etat en matière de risques naturels prévisibles et de gestion des espaces situés derrière les digues de protection contre les inondations et les submersions marines. Les risques d'inondation, notamment liés au risque de rupture des ouvrages de protection ont été pris en compte.

L'étude spécifique visant à ne pas aggraver la vulnérabilité derrière les ouvrages de protection (CNR 2003) a déterminé :

- une zone fortement exposée située entre les digues, dans une bande de sécurité (60m à partir de la bordure extérieure de l'endiguement), classée ZONE ROUGE,
- une zone exposée au risque résiduel d'inondation par rupture des ouvrages (zone attenante présentant une hauteur d'eau inférieure à 1m et une vitesse inférieure à 1m/s en cas de rupture de la digue, classée ZONE BLEUE

Cette révision a été conditionnée par l'organisation sans faille et à long terme de la surveillance et de l'entretien des ouvrages.

Le PPR révisé a été annexé au POS en 2004.

2) Mise en place de la surveillance des ouvrages

La mission de surveillance des ouvrages de la Rivière des Galets a été confiée par le SIVU (Syndicat à Vocation Unique) à la DDE (Direction Départementale de l'Equipement) en 2002.

Les garanties apportées par l'organisation ont porté sur:

- la mise en place d'une méthodologie de surveillance de type qualité,
- la réalisation de mesures et observations,
- l'analyse des données et diagnostic vis à vis des risques répertoriés de l'ouvrage,
- des propositions pour l'entretien courant et les opérations de confortement simple dont le diagnostic aura signalé la nécessité,
- la réaction rapide en cas de dégâts aux ouvrages.

Le programme de suivi comprend principalement :

- Une visite annuelle à la fin de la période cyclonique, soit en avril-mai. Cette visite comprend une inspection visuelle détaillée des ouvrages et des mesures menées directement par les agents chargés du suivi (hauteur remblai, verticalité ouvrages, contrôle géométrique de l'usure, suivi érosion des berges non protégées). Une visite de contrôle de même type est effectuée rapidement après chaque crue exceptionnelle (période de retour de 5ans ou $910\text{m}^3/\text{s}$). Cette action ne remplace pas la visite annuelle supra sauf si aucune crue significative (période de retour de 1an ou $576\text{m}^3/\text{s}$) n'apparaît entre la crue et la fin de la saison cyclonique.
- Visite simplifiée après chaque crue significative (période de retour de 1an, ou $576\text{m}^3/\text{s}$). Cette visite donne lieu, s'il n'y a pas de désordres significatifs, à une simple attestation de visite.
- Un dossier de surveillance annuel transmis au SIVU avant fin juin afin de pouvoir programmer d'éventuelles opérations de confortement avant la période cyclonique suivante.

D'autre part, un contrôle topographique du lit est préconisé tous les 3 ans préalablement à la visite annuelle. Il est réalisé à partir de 33 profils en travers qui seront implantés sur une représentation du site (photogrammétrie ou orthophotoplan) au 1/2000. Sur ce plan est tracé un axe de profil en long.

Pour permettre l'évaluation plus précise des débits, en 2004 des stations hydrologiques de mesures ont été mises en place sur le Bras St Suzanne et la Rivière des Galets.

Cette organisation basée sur la professionnalisation de l'ensemble des acteurs qui doivent être sensibilisés aux caractéristiques des ouvrages et aux risques potentiels. Les actions de formation spécifiques pour ces agents ont été nécessaires. La communication régulière entre le SIVU et le prestataire chargé du suivi est essentielle.

Des stages réguliers de formation ont été réalisés par CNR Ingénierie, à la Réunion et en Métropole, stages théoriques concernant l'hydraulique et la morphologie torrentielles et stages pratiques concernant la surveillance et l'entretien des ouvrages.

3) Réduction du risque de rupture - Entretien des ouvrages

Pour garantir la pérennité de l'ouvrage, le SIVU programme les travaux d'entretien et de réparation en dehors de la saison cyclonique et les réparations dès que l'intervention est possible.

Après une période calme de 2000 à 2005, les travaux de réparation ont été fréquents depuis 2006, notamment en :

- 2006 Tempête tropicale DIWA : Travaux de confortement en rive gauche (210m), Travaux de confortement en rive droite sur 92 m pour un coût de 254 000 €ht,
- 2007 Cyclone Gamède: Travaux de confortement des épis 4, 5, 6, 8, 9 et de la digue en rive droite sur 150 m) pour un coût de 970 000 €ht.

Ces réparations importantes doivent être réalisées rapidement entre la fin de la saison cyclonique et le début de la suivante. Pour permettre cette réactivité le SIVU a contractualisé un marché à bon de commande pour la réalisation de ces travaux. Ces travaux autorisés dans le cadre de procédure d'urgence au titre de la loi sur l'eau seront couverts par une autorisation définitive au titre du code de l'environnement en 2012. Cette organisation a été efficace pour la réalisation de travaux d'extrême urgence notamment en décembre 2009 lors de la découverte de cavités non identifiées lors de la visite annuelle. Les travaux de confortement ont été réalisés en moins de quinze jours (36 000 €HT).

Remerciements

Nous tenons tous à exprimer notre gratitude à M. Langenier, Maire du Port, Président du SIVU, toujours à l'écoute de l'équipe technique, attentif aux risques encourus par ses administrés, qui a impulsé une dynamique sans laquelle, surveillance et entretien des ouvrages, Plan Local d'Urbanisme des terrains exondés, n'auraient pu voir le jour.

Concernant la CNR, pendant ces 20 dernières années, 8 spécialistes différents ont eu la chance d'intervenir sur la problématique de la rivière des Galets, avec missions sur place. Tous ont appris énormément sur le plan technique, l'île de la Réunion étant un formidable laboratoire concernant les phénomènes naturels, qu'ils ont appris à aborder avec beaucoup de modestie. Certains se sont même retrouvés en plein cyclone Gamède, moment dangereux mais inoubliable (voir photo fig. 13).

Les relations avec nos interlocuteurs, élus, services techniques des communes, services de l'Etat, ont toujours été excellentes, avec de leur part beaucoup d'écoute et de sens des responsabilités, ce qui nous a permis d'exercer avec efficacité notre métier d'ingénieur conseil; lesdits conseils ayant été en permanence écoutés.

Quelques photos pendant le cyclone Gamède en 2007 :



Fig. 13 Minuit pont axe mixte vent 150m/h



Fig. 14 Rivière des Galets vitesse 8 puis 14m/s



Fig. 15 Pont métallique, embase partiellement détruite



Fig. 16 Pont RN

CONCLUSION

Les études théoriques se sont combinées avec les travaux de confortement et la surveillance entretien des ouvrages, dans un esprit d'anticipation, tout en maîtrisant la vulnérabilité derrière les ouvrages, en visant un risque raisonnable accepté.

Cette démarche a anticipé d'une vingtaine d'années les études de dangers maintenant obligatoires en France. L'expérience acquise pour la Rivière des Galets peut être considérée comme un exemple pour d'autres ouvrages de l'Ile de la Réunion comme pour certains de la France métropolitaine ou autre pays de par le monde.

Toute cette démarche s'est déroulée dans un esprit de concertation et de collaboration entre partenaires complémentaires ce qui a conduit à une véritable maîtrise des risques naturels dans un univers torrentiel très hostile.

Cette démarche a été facilitée par l'évidente culture du risque des décideurs réunionnais comme des habitants de l'Ile, habitués à la conduite à tenir en cas de cyclone, de crues ou vents violents, ou encore d'éruption volcanique.

Les ouvrages vieillissent petit à petit, ils n'ont pas encore subi de très grosses crues dangereuses. Il ne faut donc pas baisser la garde, mais continuer inlassablement surveillance et entretien des ouvrages ainsi que bien sûr contrôle strict des constructions derrière les digues.

L'humilité doit continuer à s'imposer vis-à-vis des phénomènes naturels observés. Le budget d'entretien doit suivre, il sera toujours un très bon investissement pour l'avenir comme tout investissement dans la sécurité.