

# Confortement des endiguements de la Rivière des Galets sur l'île de la Réunion

## Conception et mise en œuvre de blocs artificiels attachés

### *Remediation of dykes of the Riviere des Galets on Reunion Island – Conception and implementation of attached concrete blocks*

J. Vanwarreghem<sup>1</sup>, F. Fruchart<sup>2</sup>, J. Aubonnet<sup>1</sup>, J.-B. Bruzy<sup>3</sup>, A. Quanquin<sup>1</sup>

<sup>1</sup> BRLingénierie, Nîmes, [julien.vanwarreghem@brl.fr](mailto:julien.vanwarreghem@brl.fr)

<sup>2</sup> Easy Hydro, Lyon, [fruchart.lyon@gmail.com](mailto:fruchart.lyon@gmail.com)

<sup>3</sup> Territoire de la Côte Ouest, le Port, [jean-baptiste.bruzy@tco.re](mailto:jean-baptiste.bruzy@tco.re)

#### Résumé

Le concept et le développement de blocs artificiels solidement attachés entre eux par des câbles font l'objet d'un brevet déposé par Francis FRUCHART, expert en hydraulique et morphologie et BRLingénierie. Ce procédé correspond à un réel besoin pour la protection par endiguements sur l'île de la Réunion, sachant que les vitesses en crue peuvent dépasser 10 m/s et qu'aucun bloc libre naturel ou artificiel présent sur site n'est stable.

Le Syndicat Intercommunal à Vocation Unique (SIVU) de la Rivière des Galets, remplacé par le Territoire de la Côte Ouest en janvier 2018 (loi NOTRe, et transfert de compétence GEMAPI), a retenu ce dispositif pour renforcer l'endiguement actuel, qui date de 1993 et nécessite un sérieux confortement.

Les études de conception sont terminées et les travaux débuteront en septembre 2018, sur un secteur de 250 à 300 m environ sur chaque rive. Les travaux engagés pourront être présentés à l'occasion du colloque Digue 2019.

Ce procédé n'est pas réservé à l'île de la Réunion mais est applicable de par le monde à toutes rivières ou torrents à fortes vitesses, notamment lorsqu'il n'y a pas de gros blocs naturels de bonne qualité à proximité. Ce procédé fait l'objet de droits réservés : aucune utilisation ni diffusion ne peut être faite sans le consentement préalable des auteurs.

#### Mots-Clés

Bloc artificiel attaché, digue répulsive.

#### Abstract

The concept and development of artificial blocks attached to each other by cables, patented by Francis FRUCHART and BRLingénierie, corresponds to a real need for dyke

protection on Reunion island, knowing that the flood velocities can exceed 10m/s, particularly when no free natural on site or existing artificial block is stable.

The client is the Syndicat Intercommunal à Vocation Unique (SIVU) de la Rivière des Galets, institutionally replaced by the Territoire de la Côte Ouest (TCO) since January 2018. This solution was chosen to reinforce the existing dykes, made of mass cyclopean concrete, which required a serious reinforcement.

The Design is completed and the works will begin in September 2018, on a length of 250 to 300m on each bank. The works will be presented at the Colloque Digue 2019.

This process is not restricted to Réunion Island, but is applicable overseas to all rivers or torrents at high speeds, especially when there are no large natural blocks of good quality nearby. This process is under patent: rights are reserved, no use can be made without the prior consent of the authors.

#### Key Words

Attached concrete block, repulsive dyke.

#### Introduction

La Rivière des Galets [RdG] est une des plus puissantes de l'île de la Réunion, avec des débits pouvant atteindre plusieurs milliers de m<sup>3</sup>/s, un écoulement torrentiel et des vitesses en crue pouvant dépasser 10m/s, conférant à la rivière une capacité érosive hors du commun. Suite à de nombreux désordres provoqués par le passage de cyclones, BRLingénierie associé à Francis FRUCHART a proposé une solution de confortement par blocs artificiels attachés entre eux par des câbles afin de redonner aux endiguements de la rivière un caractère répulsif.

## Contexte

### 1.1 La Rivière des Galets

Le bassin versant du cirque de Mafate ne représente que 105 km<sup>2</sup>. Il culmine à 3 013 m d'altitude au Gros Morne, à 30 km de la mer, soit une pente moyenne de 10 %. Sa partie aval se rejette dans la mer entre les communes du PORT et de SAINT PAUL via un cône de déjection aval équipé d'un endiguement assez étroit, destiné à gagner des terrains industriels constructibles, qui font cruellement défaut à la Réunion. Ces ouvrages datent des années 1990.



FIGURE 1 : VUE DE LA PARTIE AVAL DE LA RDG

La pente de la rivière dans la zone aval concernée est d'environ 2 %, soit celle d'un torrent mais avec des débits bien supérieurs. La Rivière des Galets est une rivière torrentielle qui s'apparente plutôt à un fleuve torrentiel.

L'étude des événements passés montre que les vitesses peuvent atteindre jusqu'à 10 m/s (36 km/h) voire plus pour des débits de l'ordre 1 500 m<sup>3</sup>/s, correspondant à la crue décennale considérée comme la plus dangereuse.

Les matériaux transportés sont un mélange à la fois de sédiments fins et très grossiers, constitués principalement de basaltes très compacts, abrasifs et de forte densité (le plus souvent supérieure à 2,8). Le diamètre médian de ces sédiments est de 10cm, les plus gros blocs dépassent 1 m de diamètre.

Les plus fins produisent de l'abrasion, les plus gros des chocs, sollicitant énormément les ouvrages ainsi que le substratum et les berges formées dans les conglomérats (brèches).



FIGURE 2 : MATRICE SEDIMENTAIRE AUX ABORDS DU PONT

### 1.2 Hydrologie actuelle de la Rivière des Galets

L'île de la Réunion détient les records mondiaux de pluviométrie, ayant atteint 1 825 mm par jour (cyclone Denise 1960) ou encore 4 869 mm en 4 jours (cyclone Gamède 2007).

### 1.3 Historique des aménagements

Les aménagements historiques sont liés à l'urbanisation croissante sur le delta de la Rivière des Galets.

Suite à d'importants dégâts observés lors du passage du cyclone Hyacinthe (1980), le danger que représente la Rivière est rappelé aux yeux de tous. À la suite des crues liées à Clotilda en 1987, Firinga en 1989, et enfin Colina et Hollanda en 1993 et 1995, il a été décidé de réaliser d'importants travaux d'aménagements au droit de la partie urbanisée du cours d'eau.



FIGURE 3 : LES OUVRAGES DE PROTECTION DE LA RIVIERE DES GALETS ET LEURS EFFETS

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, sur une longueur de 1 850 m.



FIGURE 4 : PHOTO DE LA RIVIERE DES GALETS

Deux zones sont particulièrement vulnérables et vont être confortées en priorité en 2018 :

- La rive droite à l'amont de l'endiguement, zone très souvent attaquée par les bras vifs, qui a déjà été renforcée par un épaulement de sécurité en 1994,
- La rive gauche plus à l'aval, souvent attaquée, avec

une station d'épuration située juste derrière la digue.

### 1.4 Fonctionnement morphologique de la Rivière des Galets

Ce point est fondamental pour définir et améliorer les travaux de confortement. La morphologie et la forme des bras vifs ont été déterminées par le modèle physique d'ensemble Sogreah 1984-87, selon les débits suivants :

- Petites crues type 700 – 1 300 m<sup>3</sup>/s

• Petites crues Q2 Q5

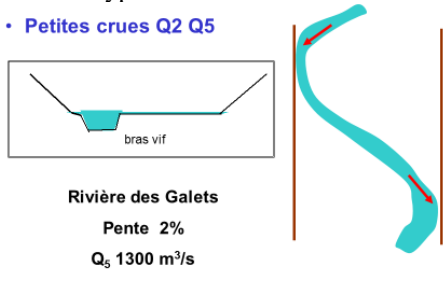


FIGURE 5 : MORPHOLOGIE RDG POUR PETITES CRUES

La vitesse pour ces petites crues est encore raisonnable mais le fort angle d'attaque des berges a déjà occasionné des dégâts importants aux ouvrages de la Rivière des Galets (Gamède, 2007), dégâts qui sont amplifiés par l'enfoncement anormal du lit.

- Crue forte type 1 570 m<sup>3</sup>/s (Q10)

• Crue forte (décennale)

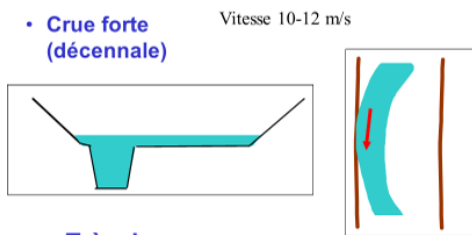


FIGURE 6 : MORPHOLOGIE RDG POUR 1 500 M<sup>3</sup>/S ENVIRON

La profondeur du bras vif est alors maximale, d'environ 5m. Les attaques en pied sont à craindre, compte tenu de l'enfoncement anormal du lit.

Ce débit correspond au débit de projet pour le

### dimensionnement des blocs attachés.

- Très forte crue type Q100

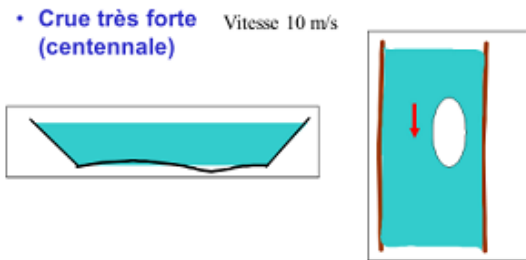


FIGURE 7 : MORPHOLOGIE RDG POUR CRUE CENTENNALE ET PLUS

Pour ce type de crue, comme indiqué sur le schéma ci-contre, le lit de la rivière est quasiment entièrement occupé par l'écoulement et de ce fait, les vitesses ont tendance à diminuer par rapport à une crue de type 1 500 m<sup>3</sup>/s.

### 1.5 Dysfonctionnement des ouvrages de la Rivière des Galets [1]

Le dysfonctionnement des ouvrages de la Rivière des Galets provient essentiellement d'un basculement exagéré de la pente. Le profil en long de la Rivière des Galets avant le cyclone Gamède est donné par le graphique suivant :

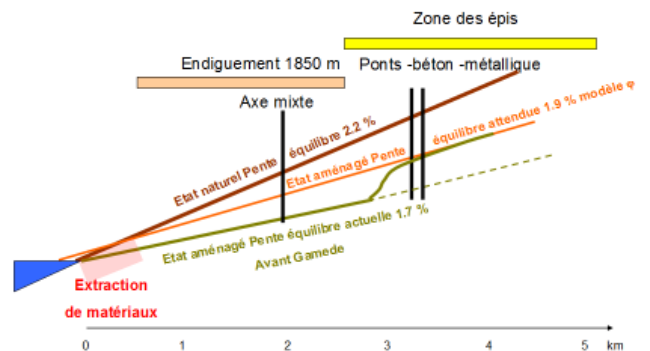


FIGURE 8 : ÉVOLUTION MORPHOLOGIQUE CNR – PROFIL EN LONG DE LA RIVIERE DES GALETS

La pente de la Rivière des Galets a fortement basculé (de 2,2 % naturel à 1.7 %), soit quasiment deux fois plus que ce qui était attendu par le modèle physique Sogreah de 1984 (1,9 % attendu).

Il en résulte une incision du lit et des attaques en pied importantes autant pour la partie endiguée que pour les épis. Ces attaques ont déjà eu lieu à plusieurs reprises dans le passé et il faut encore plus les redouter pour l'avenir.



FIGURES 9 ET 10 : DESTRUCTION RD DIGUE ENTRE EPIS ET SOUS-CAVEMENT ENDIGUEMENT RG AVAL

### 1.6 Causes de l'incision du lit [2]

La principale cause du basculement de la pente réside dans le caractère trop lisse des digues existantes. Le basculement est notablement amplifié par le fait que le libre parcours moyen amont-aval endiguement est réduit :

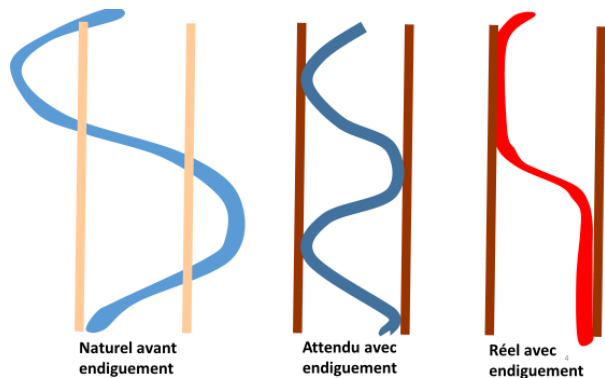


FIGURE 11 : INFLUENCE DE L'ENDIGUEMENT SUR LE MEANDREMENT DES BRAS VIFS © BRLINGENIERIE / F. FRUCHART

Il faut donc rendre les digues plus rugueuses.

### 1.7 Principe des digues répulsives [3]

Il a été proposé au SIVU dans le cadre des études d'Avant-

Projet d'appliquer le principe des « digues répulsives ». Ce principe a été proposé par F. Fruchart à Nantes les 6 & 7 Octobre 2014 au congrès de la Société Hydrotechnique de France SHF, « Small scale morphological evolution of coastal, estuarine and river systems ». L'article a été par la suite publié par la revue Houille Blanche. Le principe est de rendre la digue plus rugueuse que la rive opposée du bras vivif constituée d'alluvions. Le bras sera alors repoussé par la digue et non le contraire, l'obligeant à méandrer d'une rive à l'autre, à rallonger son parcours, donc à réduire le basculement de la pente et l'incision du lit. En fait, il s'agit d'inverser le processus actuel où les bras collent aux digues et que certains procédés de confortement avec des parois lisses aggraveraient encore.

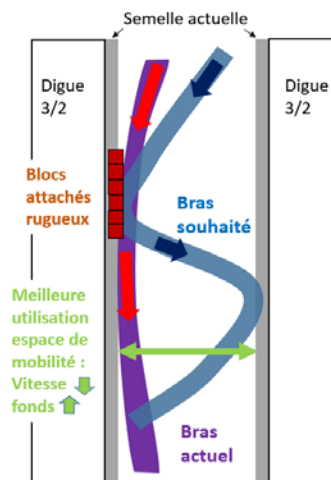


FIGURE 12 : EFFET DE DIGUES REPULSIVES SUR LES BRAS VIFS © BRLINGENIERIE / F.FRUCHART

### Détails du procédé [4]

L'aménagement consiste à renforcer les digues de la Rivière des Galets au droit des secteurs ayant subi des dommages sur deux zones de 250 ml et 300 ml. Ce confortement consiste à :

- Augmenter la rugosité de la semelle existante avec la construction de barrettes béton de 0,50 m de hauteur, ancrées dans l'ouvrage actuel tous les 12 ml ;
- Protéger le pied de la semelle sur 5 m de profondeur avec des blocs béton cubiques de 1,5 m de côté agencés de manière à assurer une pente à 3H/2V. Ces blocs seront mis en œuvre sur une couche filtre, elle-même disposée sur un géotextile ;
- Attacher les blocs entre eux sur chaque profil en travers et sur chaque profil en long par des câbles ;
- Créer un para fouille entre la semelle existante et les blocs en pied ;
- Remblayer la protection ainsi créée avec des matériaux de la rivière jusqu'au niveau initial.

Le profil type de la solution prévue est présenté ci-après :

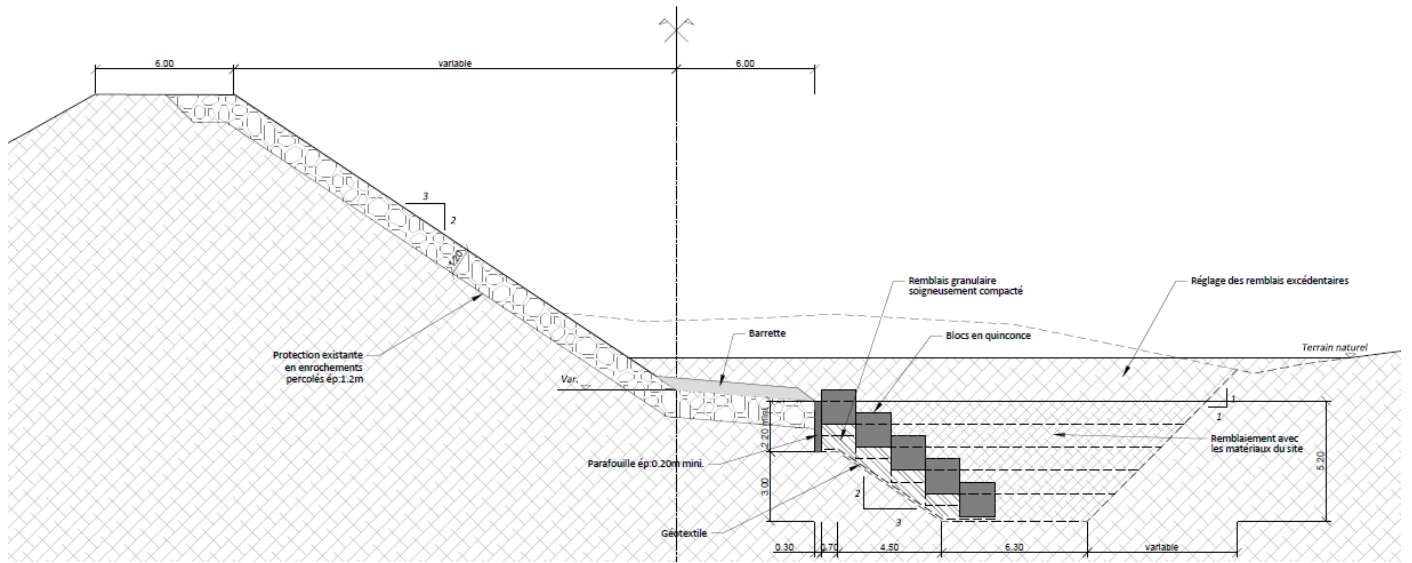


FIGURE 13 : PROFIL TYPE DU RENFORCEMENT DE LA DIGUE - ©BRLINGENIERIE

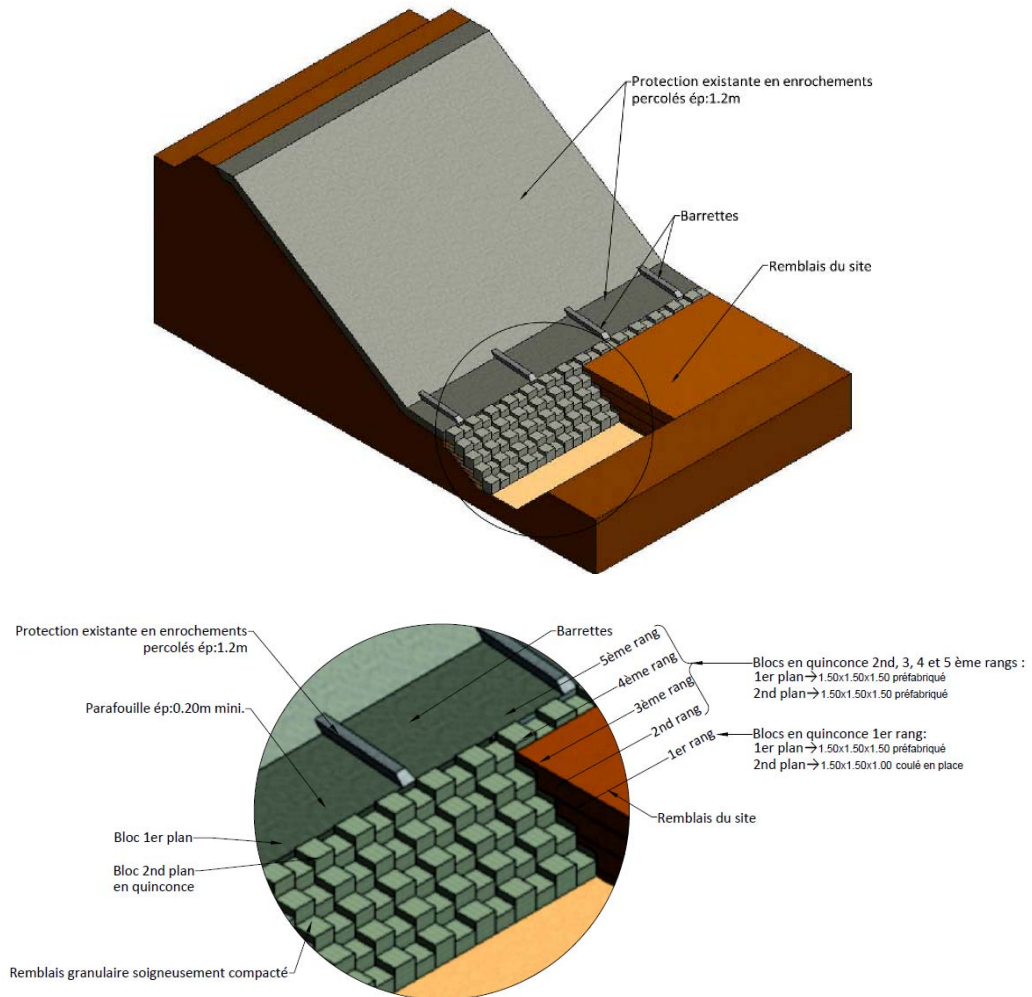


FIGURE 14 : VUE 3D DU PRINCIPE DE L'AMENAGEMENT © BRLINGENIERIE

Il s'agira de disposer les blocs en quinconce : chaque profil de blocs sera mis en place avec 50 cm de décalage vertical alternatif :

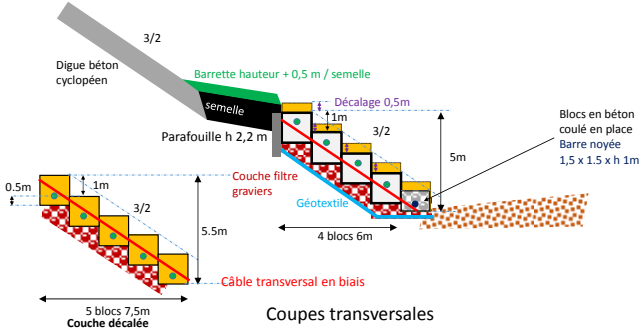


FIGURE 15 : SCHEMAS DE PRINCIPE DE L'AMENAGEMENT – © BRLINGENIERIE / F.FRUCHART

Ce procédé fait l'objet de droits réservés : aucune utilisation ni diffusion ne peut être faite sans le consentement préalable des auteurs.

## 2.1 Parafouille

La parafouille sera exécutée contre la semelle et jusqu'à 1 m environ sous sa sous-face afin de garantir la tenue des matériaux sous-jacents à la semelle.

## 2.2 Blocs artificiels

### 2.2.1 Différentes possibilités

De très nombreuses protections de berge existent de par le monde. Force est de constater que la plupart ne conviennent pas pour la Rivière des Galets du fait des pentes très fortes, des vitesses hors normes et du comportement très agressif des bras vifs.

Les blocs naturels ou artificiels libres ou percolés ont été très rapidement éliminés.

La possibilité d'utiliser des blocs artificiels maritimes destinés à résister à la houle a été envisagée. Cependant :

- Ces blocs maritimes sont conçus pour laisser beaucoup de vides entre les blocs où la houle va se dissiper. Or les blocs pour la Rivière des Galets doivent être sans vide interne et sans espace entre blocs, pour une meilleure stabilité (perte des matériaux sous-jacents provoquant un affaissement). De ce fait, le tétrapode par exemple n'est pas envisageable. De plus, il s'est révélé instable à la Réunion pour des protections provisoires de piles.
- Nombreux blocs maritimes sont posés de manière aléatoire. Cette mise en place aléatoire est exclue pour la Rivière des Galets puisque cela va également créer des vides non souhaités.

Le bloc cubique rainuré ou Antifer peut s'agencer sans trop de vides, moyennant une organisation précise, mais sa forme

légèrement pyramidale (fruit sur les faces périphériques) a conduit à l'abandonner.



FIGURE 16 : BLOCS CUBIQUES RAINURÉS – MISE EN PLACE ALEATOIRE A EXCLURE

Il est finalement apparu nécessaire de créer un bloc plus adapté conçu spécialement pour le projet, dit RdG (Rivière des Galets).

### 2.2.2 Blocs naturels attachés

Des essais sur modèle physique ont été réalisés en 2015 afin de protéger la culée Rive Droite du futur pont [5].

Alors que des blocs libres ne tenaient pas en pied de culée, des blocs basaltiques attachés entre eux, calés à moins 5 m/TN actuel se sont avérés stable après essais.

Cependant, des difficultés d'approvisionnement et de perçage des blocs pour le passage du câble ont conduit à abandonner cette solution.

### 2.2.3 Blocs RdG adoptés

Il est adopté un bloc cubique d'arête 1,5 m de poids 9 tonnes environ (d'autres tailles sont possibles). Le poids raisonnable permet une mise en place par les moyens de levage assez classiques.

#### ➤ Description du bloc

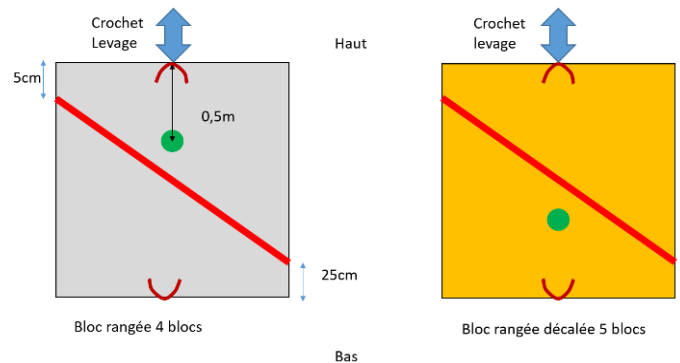


FIGURE 17 : CONFIGURATION DU BLOC RDG - © F.FRUCHART

Les blocs comprennent des réservations longitudinales horizontales et transversales pentées à 3H/V2 pour le passage des câbles.

Le bloc est prévu réversible afin d’être posé en quinconce tête-bêche, et ainsi diviser par 2 les réservations.

Des chanfreins sont disposés sur les faces des blocs de manière à ne pas cisailer le câble lors des déplacements inévitables des blocs.

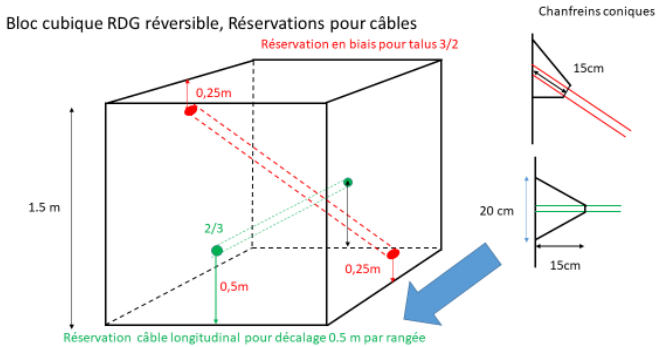


FIGURE 18 : BLOC RDG – RESERVATIONS POUR CABLE- © F. FRUCHART

➤ Pente du talus

Toutes les pentes de talus sont possibles, en adaptant les réservations pour les câbles :

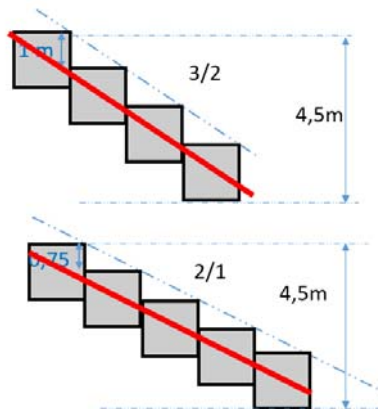


FIGURE 19 : TALUS 3H/2V ADOPTE ET 2H/1V © F.FRUCHART

**2.3 Blocs RdG coulés en place**

Des blocs seront coulés en place au niveau de la dernière rangée de l’aménagement, soit la rangée la plus basse, côté rivière. Chaque bloc coulé en place sur 1 m de hauteur viendra s’intercaler entre deux blocs préfabriqués, avec pose préalable d’une barre d’ancrage, conformément au schéma de principe ci-dessous :

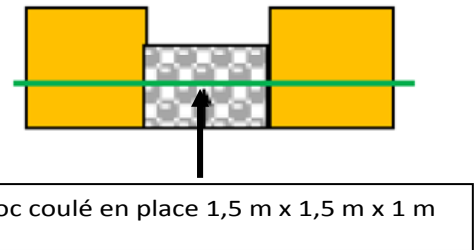


FIGURE 20 : BLOC COULE EN PLACE - © F. FRUCHART

Cette mise en place particulière permettra de disposer d’une poutre monolithique garantissant une meilleure résistance en cas d’affouillement supérieure à 5 m.

**2.4 Barrettes sur semelle**

Les barrettes devront être positionnées en face des blocs cubiques les plus hauts (en jaune sur le schéma de principe) et respecter un espacement 12 m, soit tous les 9 blocs. Après bouchardage des semelles et scellement de barres d’ancrage, la barrette sera coffrée et coulée en place pour dépasser de 50 cm. Un léger fruit sera donné afin d’obtenir une épaisseur en crête de 75 cm et 100 cm en pied.

**2.5 Agencement biseau en amont et aval du confortement**

La mise en place des blocs commencera et terminera sous forme d’un biseau en diminuant d’un bloc toutes les 2 rangées la protection mise en œuvre.

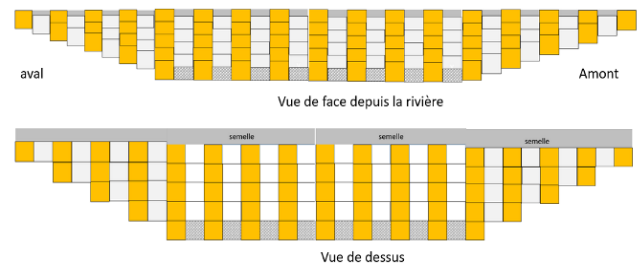


FIGURE 21 : AGENCEMENT DES BLOCS - © F.FRUCHART

**2.6 Équipements**

**2.6.1 Câbles et serres-câbles**

Les blocs béton seront reliés entre eux par des câbles inox de 24 mm de diamètre. Le câble sera dimensionné à la traction (250 kN) afin de résister notamment à l’affaissement de 10 cm d’un bloc par rapport à ses deux voisins et maintenir l’aspect rugueux de l’aménagement.

Un dispositif de type serre-câble est également prévu tous les trois blocs afin de limiter le jeu entre les blocs dans le cas où ceux-ci seraient amenés à bouger.

### 2.6.2 Barres d'acier

Concernant la rangée de blocs inférieure, soit la plus proche du lit de la rivière, le câble sera remplacé par des barres d'acier de type HA32 manchonnées entre elles. Ces barres sont dimensionnées au cisaillement (150 kN) pour reprendre un affouillement aux droit 3 blocs qui seraient maintenus par les blocs voisins.

### 2.6.3 Dispositif d'auscultation

Deux dispositifs d'auscultation sont prévus sur les zones de confortement :

- Des chaînes verticales permettant de connaître a posteriori la profondeur des bras vifs : le principe consiste à installer une chaîne dans le lit de la rivière comme explicité ci-après. Lors d'une crue, le bras vif creuse son lit puis se rebouche. Après la crue, il sera possible d'estimer la profondeur du bras vif en creusant pour retrouver la chaîne.

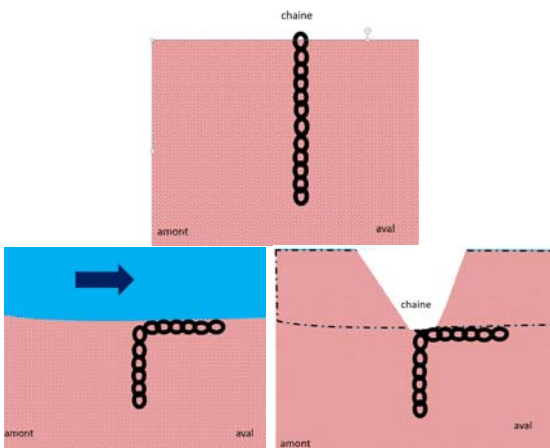


FIGURE 22 : FONCTIONNEMENT DU DISPOSITIF D'AUSCULTATION TYPE CHAÎNE

La chaîne sera enfoncée verticalement d'au moins 2,5 m devant le bloc le plus bas, selon une périodicité de 50 m.

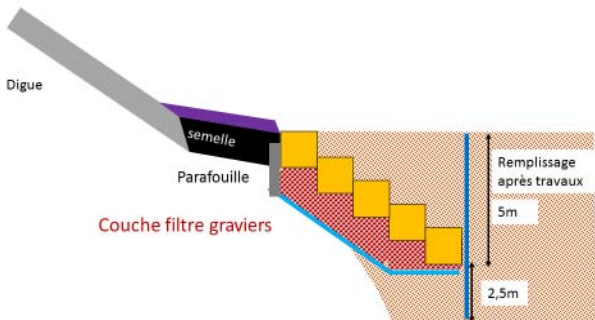


FIGURE 23 : APPLICATION DU DISPOSITIF D'AUSCULTATION TYPE CHAÎNE A LA RIVIERE DES GALETS - © F. FRUCHART

- Des câbles permettant de mesurer le déplacement du bloc le plus bas et sa rupture éventuelle : un câble sera mis en place dans une gaine où il pourra coulisser et sera attaché au bloc le plus bas.

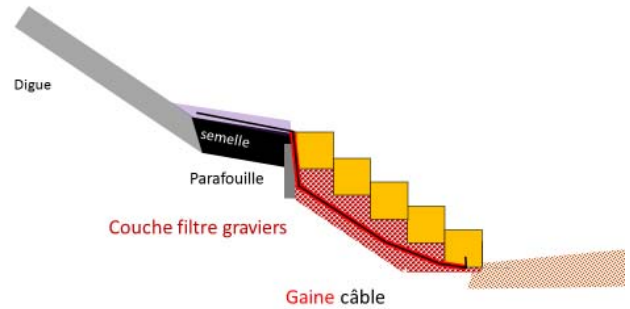


FIGURE 24 : APPLICATION DU DISPOSITIF D'AUSCULTATION TYPE CÂBLES A LA RIVIERE DES GALETS - © F.FRUCHART

Dans la partie haute, le câble est positionné à l'arrière de la barrette sur la semelle. Ainsi, si le bloc du bas bouge, il sera possible de mesurer en partie haute le déplacement.

La périodicité des câbles est identique aux chaînes.

### 2.7 Efficacité – objectif digues répulsives

- Quand il ne touche pas les berges, le bras vif unique ( $Q = 1\,500\text{ m}^3/\text{s}$ , pente = 2 %, coefficient de Strickler = 26) est de la forme :

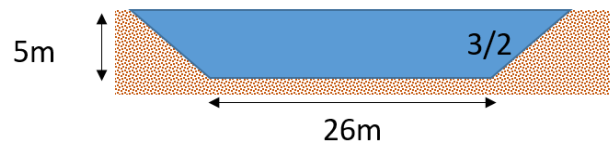


FIGURE 25 : CONFIGURATION DU BRAS VIF DECENNALE - © F. FRUCHART

La vitesse s'établit à 9 m/s.

- Pour la configuration actuelle de l'endiguement lisse, la rugosité moyenne passe de  $K = 26$  à  $K = 32$  (formule d'Einstein qui permet de moyenner  $K$  si  $K$  varie sur le Pmouillé), la vitesse moyenne de 9 m/s à 11 m/s, confirmant le facteur accélérateur de l'endiguement lisse.



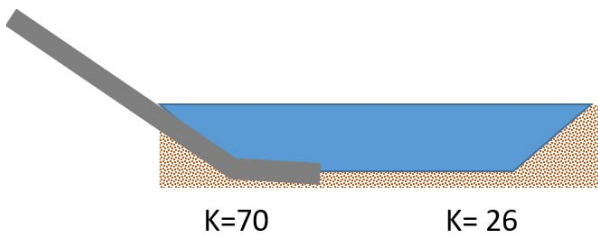


FIGURE 26 : CONFIGURATION DU BRAS VIF COLLE A LA DIGUE EXISTANTE - © F.FRUCHART

- Pour la configuration proposée, lorsque le bras vif entre en contact avec les protections rugueuses, la rugosité moyenne passe de  $K=26$  à  $K=23$  (formule d'Einstein), la vitesse de 9 m/s à 8 m/s, confirmant l'efficacité du système.

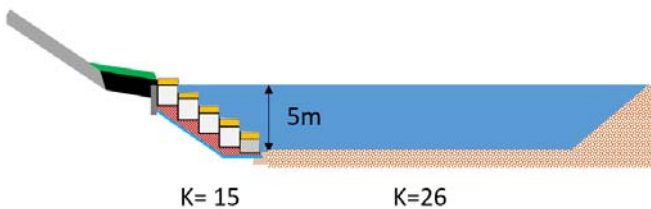


FIGURE 27 : CONFIGURATION DU BRAS VIF COLLE A LA DIGUE CONFORTE EN PIED - © F.FRUCHART

L'objectif de digue répulsive est donc atteint

## 2.8 Stade d'avancement du projet

Les études de conception sont terminées et les travaux ont débuté sous l'égide du TCO en septembre 2018 par une planche d'essais sur 10 ml de confortement :



FIGURE 28 : MISE EN ŒUVRE DE LA PLANCHE D'ESSAIS - © BRLINGENIERIE

## Conclusion

Ce procédé n'est pas réservé à l'île de la Réunion, mais pourrait être applicable :

- à toutes rivières, fleuves ou torrents à fortes vitesses
- lorsqu'il n'y a pas de gros blocs naturels de bonne qualité à proximité.

Il est souvent difficile voire impossible de produire de très gros blocs dans les carrières, du fait de la stratification dans le calcaire par exemple ou de fissures naturelles ou provoquées par les tirs de mine.

Les normes concernant les enrochements naturels sont par ailleurs de plus en plus drastiques (résistance au choc, absence de fissures, résistance à la gélivité...). De ce fait, les carrières agréées sont maintenant souvent éloignées des sites de travaux. Or le transport grève alors notablement les coûts. Au Bangladesh, exemple extrême, il n'existe aucune carrière d'enrochement à ciel ouvert, alors que les besoins en protections de berges sont énormes.

Les blocs artificiels attachés comme présentés sont donc une alternative technique, mais aussi économique pour les protections de berges, pour les dispositifs de dissipation d'énergie.

## Remerciements

BRLingénierie et Francis Fruchart remercient leurs Maîtres d'Ouvrages successifs qui ont accompagné la démarche : SIVU de la Rivière des Galets (Messieurs les élus du Syndicat et opérationnels particulièrement Mme Nassor-Calichiana, MM. Séraphine et Bruzy) et désormais TCO (Mesdames et Messieurs les élus de la collectivité et leurs services, particulièrement MM. Lebon et Bruzy) pour leur soutien et leur confiance dans la mise en œuvre de cette solution de confortement particulière.

## Références

- [1] Rivière des Galets, Étude morphologique, Compagnie Nationale du Rhône, juillet 2007.
- [2] MOE relative au renforcement et à l'adaptation des ouvrages d'endiguement suite aux évolutions morphologiques du cours d'eau, Avant-Projet, BRLingénierie - Easy Hydro, juillet 2017
- [3] Small scale morphological evolution of coastal, estuarine and river systems », Congrès de la Société Hydrotechnique de France SHF, Octobre 2014, et publication dans la revue Houille Blanche.
- [4] MOE relative au renforcement et à l'adaptation des ouvrages d'endiguement suite aux évolutions morphologiques du cours d'eau, Projet, BRLingénierie - Easy Hydro, septembre 2017
- [5] Modèle physique pour la protection de la culée rive droit du futur pont de la Rivière des Galets, Compagnie Nationale du Rhône pour la Région Réunion - Direction de Grands Travaux, 2015