

Travaux

n° 823

- La Route des Tamarins : un élément fondamental du système de transport et de déplacement à la Réunion

- Projet de la section 1 : Saint-Paul / RD 10

- Section 2 : Saint-Paul - RD10 / L'Etang Salé - RD17

- Section 2 : Ouvrages d'art non courants

- Section 1. Le viaduc et la tranchée couverte de Saint-Paul

- Section 1. Les viaducs de la Savane

- Section 1. Tunnel du Cap-la-Houssaye

- Ravine des Trois Bassins. Un pont en béton à précontrainte extradossée

- Ravine des Trois Bassins. Un pont à deux arcs convergents

- Grande Ravine. Un pont à effet d'arc limité et contrôlé

- Géologie et géotechnique

- Actions des vents cycloniques sur les ouvrages d'art

Route des Tamarins

Sommaire

Travaux
numéro 823

octobre 2005

Route des Tamarins

éditorial

Patrick Bernasconi

1

actualités

8

matériels

18

PRÉFACE

Paul Vergès

23

◆ La Route des Tamarins : un élément fondamental du système de transport et de déplacement à la Réunion
- *The "Route des Tamarins" : a fundamental element for the travel and transport system in Reunion Island*
M. Le Bloas, G. Morlet, M. Kahan

24

◆ Projet de la section 1 : Saint-Paul/RD 10
- *Project of the first section : Saint-Paul/RD10*
Divers auteurs

33

◆ Section 2 : Saint-Paul - RD10/L'Etang Salé - RD17
- *Section 2 : Saint-Paul - RD10/L'Etang Salé - RD17*
P. Barbier

44

◆ Section 2 : Saint-Paul - RD10/L'Etang Salé - RD17.
Ouvrages d'art non courants
- *Section 2 : Saint-Paul - RD10/L'Etang Salé - RD17.*
Linking structures
E. Barlet

52

◆ Section 1 : Saint-Paul/RD10. Le viaduc et la tranchée couverte de Saint-Paul
- *Section 1 : Saint-Paul/RD10. Saint-Paul viaduct and cut and cover trench*
H. Oudin-Hograindeur, M. Brethomé, M. Kahan, Fr. Zirk

61

◆ Section 1 : Saint-Paul/RD10. Les viaducs de la Savane
- *Section 1 : Saint-Paul/RD10. The "Savane" viaducts*
I. Amami, J. Daquin, Ch. Maître, J. Mossot, H. Oudin-Hograindeur

74

◆ Section 1 : Saint-Paul/RD10. Tunnel du Cap-la-Houssaye
- *Section 1 : Saint-Paul/RD10. Cap-la-Houssaye Tunnel*
Divers auteurs

83

◆ L'ouvrage d'art exceptionnel de franchissement de la ravine des Trois Bassins. Un pont en béton à précontrainte extradossée

92



Notre couverture

Savane du Cap-la-Houssaye.
Site du tunnel et des viaducs

© Richard Bouet / DDE de la Réunion

DIRECTEUR DE LA PUBLICATION

Patrick Bernasconi

RÉDACTION

André Colson et Mona Mottot
3, rue de Berri - 75008 Paris
Tél. : (33) 01 44 13 31 83
colsona@fnfp.fr

SECRÉTAIRE DE RÉDACTION

Françoise Godart
Tél. : (33) 02 41 18 11 41
Fax : (33) 02 41 18 11 51
francoise.godart@wanadoo.fr

VENTES ET ABONNEMENTS

Agnès Petolon
10, rue Clément Marot - 75008 Paris
Tél. : (33) 01 40 73 80 05
revuetravaux@wanadoo.fr

France (11 numéros) : 180 € TTC
Etranger (11 numéros) : 225 €
Etudiants (11 numéros) : 75 €
Prix du numéro : 25 € (+ frais de port)

MAQUETTE

T2B & H
8/10, rue Saint-Bernard - 75011 Paris
Tél. : (33) 01 44 64 84 20

PUBLICITÉ

Régie Publicité Industrielle
Martin Fabre
61, bd de Picpus - 75012 Paris
Tél. : (33) 01 44 74 86 36

Imprimerie Chirat
Saint-Just la Pendue (Loire)

La revue Travaux s'attache, pour l'information de ses lecteurs, à permettre l'expression de toutes les opinions scientifiques et techniques. Mais les articles sont publiés sous la responsabilité de leurs auteurs. L'éditeur se réserve le droit de refuser toute insertion, jugée contraire aux intérêts de la publication.

Tous droits de reproduction, adaptation, totale ou partielle, France et étranger, sous quelque forme que ce soit, sont expressément réservés (copyright by Travaux). Ouvrage protégé : photocopie interdite, même partielle (loi du 11 mars 1957), qui constituerait contrefaçon (Code pénal, article 425).

Editions Science et Industrie S.A.
3, rue de Berri - 75008 Paris
Commission paritaire n° 0106 T 80259



Sommaire

octobre 2005

Route des Tamarins

Dans les prochains numéros

- Plates-formes aéroportuaires
- Terrassements
- Routes et Travaux urbains
- Ponts
- Le Havre
- Port 2000
- International
- Environnement
- Réhabilitation



- *The exceptional engineering structure crossing the Trois Bassins ravine. A curved prestressed concrete bridge*

J. Frappart

102



◆ L'ouvrage d'art exceptionnel de franchissement de la ravine des Trois Bassins. Pont à deux arcs convergents

- *The exceptional engineering structure crossing the Trois Bassins ravine. Bridge with two converging arches*

Y. Maury, M.-V. Peron, N. Mayeur

110



◆ Le viaduc de la Grande Ravine. Un pont à effet d'arc limité et contrôlé

- *The viaduct of the Grande Ravine. A bridge with a limited and controlled arch effect*

J.-E. Croiset, J. Ryckaert, A. Spielmann, Gr. Viel

117



◆ Géologie et géotechnique à la Réunion : les particularités du sous-sol de l'île volcanique

- *Geology and geotechnics on Reunion Island : the specific features of the volcanic island's subsoil*

B. Bescond, P. Azémard, B. Gaudin

126

◆ Actions des vents cycloniques sur les ouvrages d'art de la Route des Tamarins

- *Hurricane wind actions on the large bridges of the Tamarins highway*

G. Grillaud, Ch. Barré, M. Kahan

répertoire
des fournisseurs

134

**ABONNEMENT
TRAVAUX**

Encart après p. 48

INDEX DES ANNONCEURS

| | | | |
|---|------------------|--------------------------------|------------------|
| AMMANN | 19 | ICE | 10 |
| ARCADIS | 2 | IDETEC | 9 |
| ARCELOR RPS | 2È DE COUVERTURE | RAZEL / BILFINGER BERGER | 4 |
| BET FAVIER VERNE ET ASSOCIÉS | 8 | SAMT | 6 ET 7 |
| BOURBON INGÉNIERIE INFRASTRUCTURES..... | 21 | SBTPC | 11 |
| CERT | 13 | SCETAURROUTE..... | 4È DE COUVERTURE |
| COLBOND GEOSYNTHETICS..... | 81 | SECMO OI | 20 |
| DEMATHIEU ET BARD | 81 | SEGC | 16 |
| GTOI..... | 42 ET 43 | SGTPS | 22 |
| HEAVEN CLIMBER MÉDITERRANÉE..... | 73 | SOLANGE MOUNY TRAVAUX | 82 |
| | | SYNDICAT DES ÉRUPTIFS | 31 |



Viaducs Fleurimont dans la savane du Cap-la-Houssaye

La Réunion, petite île au cœur de l'océan Indien, est confrontée, à l'aube du XXI^e siècle, à des défis considérables.

Le premier défi est celui de la transition démographique : aujourd'hui, la Réunion abrite 766 000 personnes. A l'horizon 2020, la population réunionnaise sera de 1 million d'habitants. La Réunion subira également les effets des changements climatiques, et des conséquences en termes d'aménagement du territoire. Enfin l'impact de la mondialisation frappera fortement une économie insulaire et vulnérable comme celle de la Réunion.

Dans les 20 ans qui viennent, la Réunion connaîtra ainsi des mutations profondes. C'est dans ce contexte et face à ces perspectives que le Conseil régional a résolument choisi d'inscrire son action dans le cadre d'une politique de grands chantiers.

La collectivité entend ainsi dynamiser le marché intérieur réunionnais. Elle souhaite que l'investissement reste à un haut niveau, afin de générer de l'emploi pour les Réunionnaises et les Réunionnais et de l'activité dans le secteur du BTP.

Pour financer ces grands projets, la Région a engagé des contrats de réservation d'emprunts avec des partenaires nationaux et régionaux, pour un montant global de 350 millions d'euros, ou européens



■ PAUL VERGÈS

Président
du Conseil Régional
de La Réunion

Député au Parlement
Européen

(Banque européenne d'investissement) pour un montant de 200 millions d'euros...

Le chantier de la Route des Tamarins s'inscrit dans cette politique de grands travaux. Sa vocation est multiple. Il s'agit bien évidemment de rééquilibrer le territoire, entre le Nord et le Sud de l'île, tout en permettant d'une part une meilleure circulation dans l'Ouest. D'autre part, cette route va permettre l'aménagement des territoires situés à mi-hauteur, indispensables pour accueillir une partie des 300 000 habitants supplémentaires que la Réunion connaîtra dans moins de 25 ans.

Ce chantier de la Route des Tamarins va générer la création de plus de 1 500 emplois. La Région et ses partenaires ont lancé, bien en amont des premières consultations techniques, une réflexion d'anticipation sur les besoins en main

d'œuvre afin de bâtir un plan de formation pluriannuel pour l'ensemble des corps de métiers destinés à travailler sur ce chantier.

Avec la livraison de la Route des Tamarins, la Réunion aura ainsi amorcé la réalisation d'une route de moyenne altitude, autour de l'île.

Ce chantier de la Route des Tamarins, comme le projet de Tram Train, sont des éléments structurant le développement durable.

La Route des Tamarins : un du système de transport et à la Réunion

La Route des Tamarins s'inscrit comme le dernier maillon de 33,7 km d'une ossature routière à quatre voies reliant les principales villes de la Réunion. Décrétée d'utilité publique le 3 mai 2002, elle est aujourd'hui en pleine phase de lancement des travaux. Nous avons choisi ce moment charnière pour faire un point sur cette opération ambitieuse au travers d'une série d'articles du présent numéro de la revue *Travaux*. Dans les pages qui suivent nous donnons les principaux enjeux et les grandes lignes de l'organisation du projet. Les articles suivants décrivent le projet routier dans ses différentes séquences puis les ouvrages d'art majeurs de l'infrastructure. Nous terminons ce numéro en mettant l'accent sur les particularités géologiques, géotechniques ainsi que sur les conditions climatiques extrêmes de la Réunion et leur impact sur les études.

■ LES ENJEUX DE LA ROUTE DES TAMARINS

Les déplacements à la Réunion

"Rien de plus difficile que de modeler pour l'homme un terrain pentu, raviné, difficile : même avec les moyens modernes, la moindre route, à La Réunion, est un exploit technique. Sûr que les ingénieurs, parfois, rêvent de Beauce et de vastes plaines..." ainsi s'exprime Daniel Vaxelaire, écrivain et historien, dans son ouvrage "La Réunion, 4 siècles de défis" édité en 2003 à l'initiative de la DDE. Sûr que parmi ces défis multiples, la route des Tamarins en constitue un remarquable!

C'est au fil de ces quatre siècles d'existence récente de La Réunion qu'une armature de transport primaire reliant les grandes villes de la côte a pu être bâtie. D'une part une liaison entre Saint-Denis (le chef-lieu au nord de l'île) et Saint-Pierre (au sud-ouest de celle-ci), d'autre part entre Saint-Denis et Saint-Benoît (au nord-est). Après les routes empierrées des XVIII^e et XIX^e siècles, ce furent les liaisons ferrées du début du XX^e siècle.

Malheureusement, à La Réunion comme ailleurs l'avènement de l'automobile a entraîné inéluctablement l'abandon et le démantèlement de la voie ferrée au début de la deuxième moitié du XX^e siècle. En contrepartie, a été entreprise la modernisa-

tion de l'arc routier structurant reliant Saint-Benoît à Saint-Pierre via Saint-Denis sur environ 150 km : une route à 2 x 2 voies aux caractéristiques autoroutières.

La section la plus urgente a d'abord été réalisée : celle reliant Saint-Denis à Saint-Paul, dans l'ouest, via Le Port. Elle relie notamment le chef-lieu et ville principale de l'île au seul port de commerce de celle-ci : l'intérêt économique est évident. Cette section, performante en niveau de service en temps "normal", voit malheureusement ses capacités amoindries dès que des épisodes pluvieux importants s'abattent sur sa partie orientale. Ces pluies augmentent en effet le risque de chutes de pierres ou d'éboulements venant de la falaise qui surplombe la route sur 20 km. Un système de gestion astucieux et efficace, consistant à basculer la circulation sur la chaussée du côté "mer" pendant une période limitée écarte la plus grande partie du risque. Mais la route n'offre plus aux usagers que 2 voies dans un sens et une voie dans l'autre. La technique consistant à offrir aux usagers les 2 voies de circulation dans le sens le plus chargé et donc d'adapter le profil en travers selon les heures de la journée n'évite pas la formation de bouchons dans le sens défavorisé. Des études sont actuellement menées pour décider de la meilleure solution pour s'affranchir de cette contrainte.

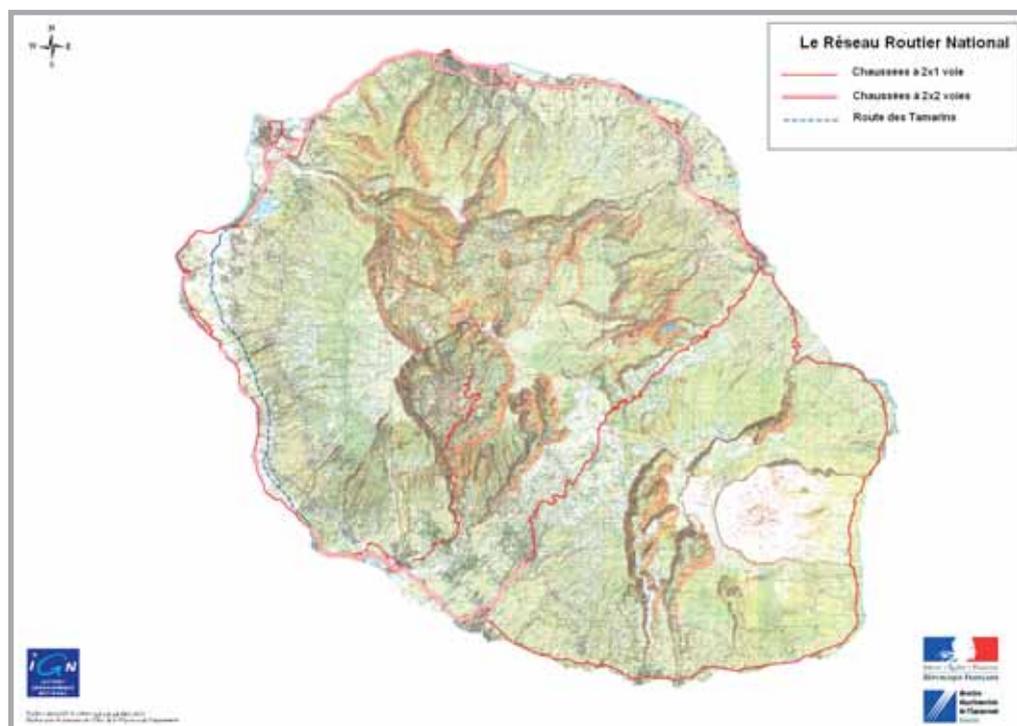
L'arc nord-est reliant Saint-Denis à Saint-Benoît a ensuite été réalisé ainsi que la section sud-ouest entre L'Étang-Salé et Saint-Pierre.

La Route des Tamarins constitue le chaînon de 34 km manquant entre Saint-Paul et L'Étang-Salé (figure 1).

Entre temps, la forte poussée démographique (la population de l'île passera de 780 000 habitants aujourd'hui à 1 million en 2025) et le développement rapide de la motorisation des ménages ainsi que l'existence de ce dernier tronçon de route bidirectionnelle dans l'ouest, encadré par des sections à 2 x 2 voies ont provoqué un développement progressif mais continu des engorgements de l'axe routier dans l'ouest et des bouchons devenant maintenant intolérables pour les usagers (figure 2).

Deux décisions ont alors été prises par les pouvoirs publics et principalement par la Région Réunion, collectivité ayant en charge l'aménagement du territoire et disposant à la fois des ressources pour concrétiser sa politique en matière de déplacement (elle gère le Fonds d'investissement routier et des transports alimenté par une taxe sur les carburants) et des moyens juridiques pour agir (avant même la mise en œuvre des lois de décentralisa-

Figure 1
Réseau routier national de la Réunion
National road network of Reunion Island



élément fondamental de déplacement

Michel Le Bloas
DIRECTEUR
DÉPARTEMENTAL
DDE de la Réunion



Gilbert Morlet
DIRECTEUR
D'OPÉRATION
DE LA ROUTE
DES TAMARINS
DDE Réunion



Michel Kahan
CHEF DU SERVICE
DES GRANDS TRAVAUX
DDE de la Réunion



| | |
|------------------------------|--|
| 1990 | Étude du Schéma d'aménagement régional (SAR) et réflexion sur le réseau routier. |
| 14-juin-91 | Le Conseil régional approuve le principe d'une concession pour la liaison Saint-Paul / Saint-Leu. |
| 16-avr-93 | Le Conseil régional approuve le projet d'un tracé à mi-pente. |
| 21-avr-94 | Le ministre de l'Équipement décide le principe d'une liaison autoroutière concédée. |
| 3-juin-94 | Le préfet notifie une étude de l'autoroute. |
| 26-juil-94 | Par arrêté préfectoral, la liaison autoroutière entre Saint-Paul et L'Étang-Salé devient un "projet d'intérêt général". |
| 14-nov-96 | Le ministre de l'Équipement approuve l'avant projet sommaire autoroutier. |
| 26-juin-98 | Abandon de l'autoroute à péage et choix d'une route express libre d'accès ; le Conseil régional décide de financer l'opération sur le Fonds d'investissement routier et des transports (FIRT). |
| 11-oct-00 | Le ministre de l'Équipement approuve l'avant-projet sommaire modificatif. |
| Décembre 2000 à janvier 2001 | Enquête publique. |
| Octobre et novembre 2001 | Enquête complémentaire sur les modifications au projet (sur le Cap la Houssaye et à Piton Saint-Leu / Bois de Néfles). |
| 3-mai-02 | Décret déclarant l'opération d'utilité publique. |
| 21-jan-03 | L'État délègue une partie de la maîtrise d'ouvrage à la Région. |
| mai-03 | Début des travaux (pistes de chantier du secteur Grande Ravine). |
| oct-03 | Notification du premier marché de rétablissement de communication : rétablissement du chemin Thénor. |
| mars-04 | Notification du premier gros marché de terrassement (entre la RD10 et la ravine Trois-Bassins) et du premier marché " d'ouvrages d'arts non courants " (ponts sur les ravines de l'Hermitage, du bras de l'Hermitage et de Cocâtre). |

Principales dates de l'opération

Key dates of the project

Figure 2
Carte des trafics à ce jour
Traffic map at the present time

tion, l'Etat lui octroie de larges délégations de maîtrise d'ouvrage).

La première décision, a été de lancer un ambitieux programme de développement des transports en commun, seule solution permettant d'éviter une fuite en avant consistant à créer plus de routes, plus de rues et plus de parkings pour répondre à la croissance de la demande de déplacements. Le projet de "tram-train" est l'élément essentiel de ce programme.

La seconde décision est de terminer au plus vite la liaison routière à 2 x 2 voies entre Saint-Denis et Saint-Pierre : le développement incessant des capacités routières serait irresponsable, mais méconnaître le fonctionnement en système des moyens de transports et négliger d'offrir aux usagers, particuliers ou professionnels un réseau performant et moderne sur le plan de la sécurité routière le serait aussi. C'est ainsi qu'a été prise la décision de construire au plus vite la Route des Tamarins.

Un axe de développement pour les Hauts

La Route des Tamarins fait partie des équipements majeurs inscrits au Schéma d'aménagement régional (SAR) approuvé en 1995. Elle vise le double objectif de développer les hauts de l'ouest tout en répondant aux besoins de déplacements entre les deux régions du nord-ouest et du sud-ouest de l'île. Sur les cinq communes traversées par la Route des Tamarins, Saint-Paul, Trois-Bassins, Saint-Leu, Les Avirons et L'Étang Salé vivent environ 113 000 ha-

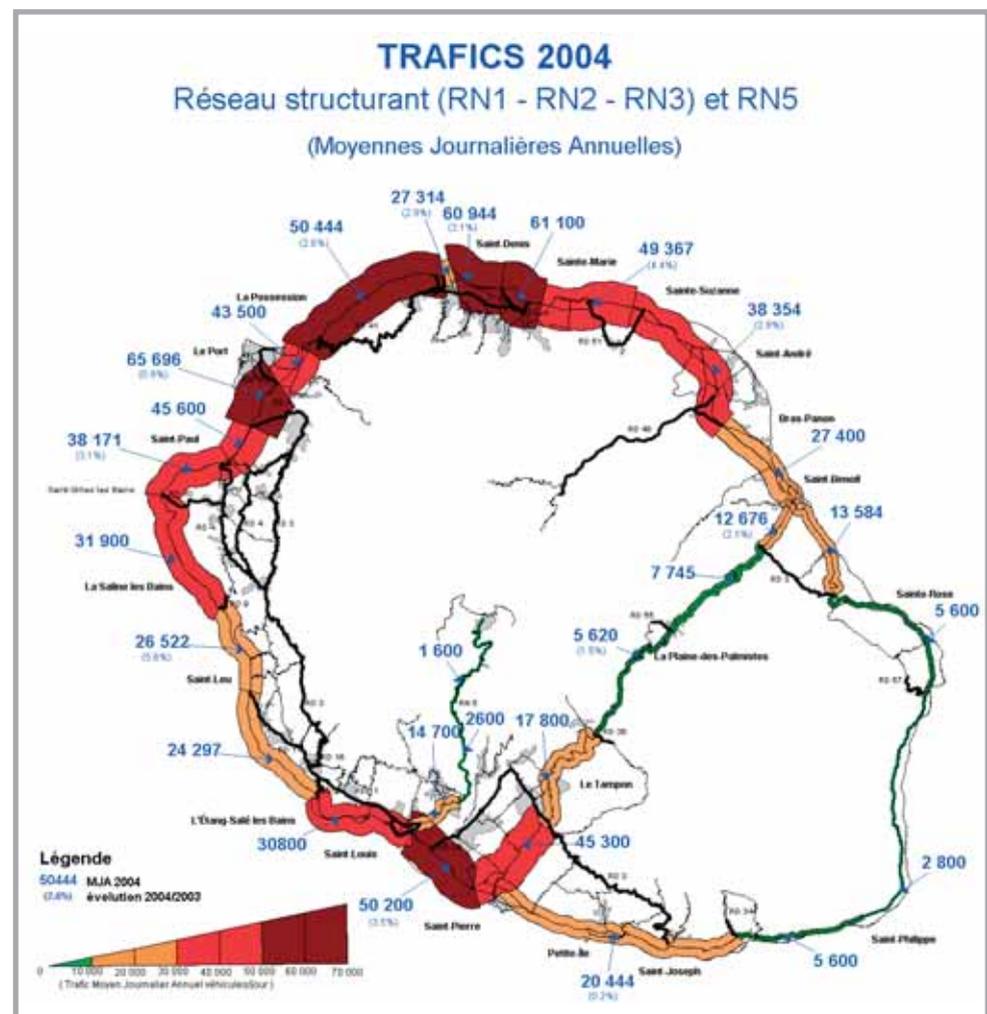


Figure 3
Tracé de la future
Route des Tamarins
sur la côte ouest de l'île
*Alignment of the future
Route des Tamarins highway
on the West Coast
of the island*



© Photo Noor Ah Khoon

bitants : 30 % sur le littoral, 40 % à mi-pente et 30 % dans les Hauts. On trouve ici la justification d'un itinéraire à mi-pente qui permet de desservir directement 70 % de la population de l'ouest (littoral et mi-pente) au moyen de barreaux de raccordement à la route littorale et qui facilite l'accessibilité des Hauts grâce à un programme d'amélioration de leurs dessertes routières.

En 2025, la Réunion comptera 300 000 habitants de plus. Les bourgs des Hauts seront alors facilement accessibles et offriront de nouveaux espaces pour un développement durable.

Descriptif du projet

Le tracé à "mi-pente", approuvé en 1994 dans un concept autoroutier, par le ministre de l'Équipement, après une large concertation locale, figure donc au schéma d'aménagement régional. Le projet part du niveau de la mer à Saint-Paul puis monte à des altitudes comprises entre 200 et 300 m jusqu'à Saint-Leu pour redescendre sur le littoral à l'Étang-Salé-les-Bains (figure 3).

La Route des Tamarins franchira une centaine de ravines, certaines très profondes et inaccessibles par le bas. C'est donc une route pour une large part en ouvrages : on en compte une centaine au total dont de nombreux ouvrages hydrauliques, une vingtaine d'ouvrages courants, une vingtaine d'ouvrages non courants dont neuf ponts monotravées à culées contrepoids franchissant des ravines de 60 à 100 m d'ouverture, un tunnel à deux tubes de 300 m, deux tranchées couvertes et quatre ouvrages qualifiés d'exceptionnels pour leurs caractéristiques techniques et la qualité des sites qu'ils traversent. Du nord au sud, on citera :

- ◆ le viaduc de Saint-Paul de 750 m de long, sinueux, élevant la route du niveau de la mer jusqu'au plateau surplombant la ville de Saint-Paul ;
- ◆ le pont de Trois-Bassins de 350 m, sans doute le plus visible de la côte ;
- ◆ le pont franchissant la Grande Ravine de 300 m d'ouverture et profonde de 170 m ;
- ◆ le pont franchissant la Ravine Fontaine de 200 m d'ouverture et profonde de 110 m.

Ces ouvrages sont d'autant plus techniques qu'ils

sont dimensionnés pour des conditions météorologiques tout à fait exceptionnelles (crues et vents cycloniques) et sont fondés sur des sols très hétérogènes constitués d'alternances de coulées basaltiques franches et de lit de scories.

Le relief chahuté impose par ailleurs une gestion performante des mouvements de terre (environ 4 millions de mètres cubes de déblais) et de l'échéancier de réalisation des ouvrages et des terrassements.

C'est aussi une route "paysage" dans la mesure où elle s'inscrit dans un environnement de qualité et qu'elle fait l'objet d'un traitement architectural et paysager soigné. C'est aussi une route "balcon" qui offrira des points de vue particulièrement intéressants sur le littoral mais aussi sur des espaces encore méconnus des Réunionnais comme la savane du Cap La Houssaye.

Cette route de 33,7 km, supportera un trafic compris entre 40 000 et 69 000 véhicules par jour en 2015. Son statut est celui d'une voie express, gratuite. Elle compte quatre voies de circulation (plus des voies pour véhicules lents dans les secteurs à forte pente) et neuf systèmes d'échange (diffuseurs) dénivelés :

- ◆ Saint-Paul (RN1, centre-ville, RD6, RD5) ;
- ◆ Plateau-Cailou (RD6) ;
- ◆ l'Éperon (RD10 route du théâtre) ;
- ◆ L'Hermitage (vers La Saline-les-Hauts et La Saline-les-Bains) ;
- ◆ Le Barrage (RD9) ;
- ◆ Les Colimaçons (RD12) ;
- ◆ Stella (RD11) ;
- ◆ Le Portail (desserte de Piton Saint-Leu) ;
- ◆ L'Étang-Salé (diffuseur actuel).

Le projet se veut respectueux de l'environnement, prévoit des protections contre le bruit, un réseau d'assainissement et de drainage sécurisé contre la pollution, s'attache à respecter la faune et la flore. L'insertion paysagère a été soignée et s'adapte aux différentes séquences qui se succèdent rapidement le long du parcours : milieu urbain de Saint-Paul, savane du Cap La Houssaye, champs de cannes des Hauts de Saint-Gilles, planèze à forte pente de Trois-Bassins visible depuis la côte, milieu périurbain de Saint-Leu et forêt de l'Étang-Salé.

■ CONSTRUIRE LA ROUTE DES TAMARINS, UN CHALLENGE POUR LA RÉUNION

De la maîtrise d'ouvrage

Pour un département d'outremer comme la Réunion – une île éloignée de 10 000 km de la métropole, éloignée des grands pôles économiques mondiaux, mener à bien le plus rapidement possible mais sans coûts excessifs, une opération de 850 millions d'euros (70 M€ d'études et de maîtrise d'œuvre, 31 M€ d'acquisitions foncières et de relogements et 749 M€ de travaux) pose de nombreux problèmes nouveaux. Si la capacité financière de la Région Réunion, maître d'ouvrage par mandat délivré par l'Etat, est saine, et a permis de mobiliser les emprunts nécessaires à la réalisation, l'importance de l'investissement, qui triple pendant trois ans le montant habituellement affecté aux routes nationales de l'île perturbe notablement plusieurs secteurs. Cela a été notamment le cas pour les administrations et les institutions judiciaires, pour les services de l'Équipement et de la Région, et pour le marché des travaux publics et des fournisseurs.

Les administrations et les institutions judiciaires intervenant dans les acquisitions foncières ont vu doubler voire tripler pendant un temps très court le volume d'affaires à traiter. Ainsi des services des domaines chargés des évaluations, ainsi du tribunal de grande instance jugeant les indemnités d'expropriations et de même pour le tribunal administratif fixant les indemnités d'occupation temporaires, sans oublier les services de l'Équipement et de la Région liquidant et mandatant les dépenses correspondantes. Pour préparer ces acquisitions, un marché d'opérateurs fonciers a bien été passé, mais certaines opérations ne peuvent évidemment être "externalisées".

Le management d'une pareille opération justifiait une organisation spécifique. La création de la direction d'opération de la Route des Tamarins répond à cette nécessité. Elle s'inspire de l'organisation mise en place par les sociétés d'autoroutes pour mener à bien leurs projets.

C'est une unité de petite taille dont les tâches consistent principalement à piloter les maîtres d'œuvre, alimenter les services chargés de publier les appels d'offres et d'organiser les séances de la commission d'appels d'offres, liquider les pièces de dépenses, préparer les rapports soumis à l'approbation des assemblées délibérantes, et plus généralement de regrouper toutes les informations concernant le projet, les rediffuser après traitement et "tirer toutes les ficelles" concourant à le faire avancer. Elle a aussi un rôle très important vis-à-vis de l'extérieur : contacts avec les maires et les services des communes concernées, contacts avec le Conseil général, contacts avec les riverains du projet ou les personnes expropriées.

PRINCIPAUX ÉLÉMENTS RELATIFS AUX ACQUISITIONS FONCIÈRES

Trois enquêtes parcellaires ont été nécessaires pour lancer les travaux au plus tôt compte tenu de l'avancement des études :

- 1^{re} et 2^e enquêtes portant sur deux secteurs de la route
 - 513 parcelles
 - 300 propriétaires pour 323 ha d'emprises
 - 340 parcelles en procédure d'expropriation, soit 70 % de la totalité
 - 173 parcelles traitées à l'amiable, soit 30 %
 - 12 arrêtés de cessibilité
 - 12 ordonnances d'expropriation
 - 13 transports sur les lieux avec le juge de l'expropriation
 - 239 jugements
 - 30 appels
 - 14,5 M€ d'indemnités
- 3^e enquête portant sur des ouvrages annexes (aménagements paysagers, hydrauliques et acoustiques)
 - 250 parcelles concernées dont une grande partie déjà touchée par les deux premières enquêtes
 - 120 propriétaires pour 86 ha d'emprises
 - 11 arrêtés de cessibilité
 - 11 ordonnances d'expropriation (en attente)
 - 8 transports sur les lieux
 - les jugements sont en cours
 - les indemnités sont évaluées à 2,5 M€

Si aucun remembrement n'est prévu, des échanges de terres agricoles consacrées pour l'essentiel, à la canne à sucre, seront organisés par le biais de la SAFER.

Par ailleurs, plusieurs points durs font l'objet de traitements particuliers :

- la route traverse en tranchée couverte un quartier à Piton Saint-Leu. Une opération de relogement à proximité accompagne le projet routier ;
- le viaduc Saint-Paul est fondé sur l'emplacement de l'Établissement public de santé mentale de la Réunion qui a été reconstruit ailleurs avant le début des travaux ;
- le projet passe sur l'école primaire de Stella à Saint-Leu qui doit également être reconstruite ;
- 80 familles sont relogées.

S'il s'agit là de très fortes contraintes pour la réalisation de l'ouvrage, il faut noter que la Route des Tamarins ouvre des possibilités d'aménagement de la côte ouest, d'ores et déjà soumise à une très forte pression foncière et qui accueillera une proportion non négligeable des 300 000 habitants supplémentaires que comptera la Réunion dans 20 ans (aujourd'hui, l'île dénombre 700 000 habitants). C'est un enjeu fort des années à venir, sans doute en compétition avec la préservation de la canne à la Réunion.

Cette direction d'opération est coiffée d'un "comité de direction de projet", véritable instance stratégique donnant les orientations à suivre à la direction d'opération et prenant les décisions particulièrement délicates. Ce comité est le reflet de la maîtrise d'ouvrage. S'agissant de construire une route nationale, c'est donc l'Etat qui est maître d'ouvrage de premier rang. Mais, en vertu d'un décret de mars 2002, dans les départements d'outremer, l'Etat peut mandater la Région pour remplir la



Figure 4
Synoptique du projet
avec allotissement

*Block diagram
of the project
with breakdown
of work sections*

plupart des missions de maîtrise d'ouvrage, à l'exception du contrôle technique (le préfet doit aussi donner un accord préalable à la passation des marchés). Ce mandat a effectivement été donné à la Région Réunion, ce qui est d'ailleurs cohérent avec les modalités de financement de l'opération. La Région est en effet gestionnaire du fonds d'investissement routier et des transports. Ce fonds a notamment pour vocation d'investir sur les routes nationales. Dans ce comité de direction de projet siège donc les représentants de l'Etat, le DDE et son adjoint, représentant le préfet, le président de la commission chargée des travaux de la Région,

représentant le président de la Région, et le directeur général des services de la Région, assisté par un ou plusieurs directeurs de ses services. Depuis le début du projet, la direction d'opération a eu à régler de nombreux problèmes inhérents à ce type d'affaire. Son défi actuel est de faire en sorte que les marchés de travaux soient passés dans de bonnes conditions. A la mi-2005, plus de 400 millions d'euros de travaux devraient être engagés. A la fin de l'année, ce sont presque tous les marchés qui devraient être lancés, pour un montant total supérieur à 749 millions d'euros.

Organisation des études

Les études amont et l'enquête publique

Les études préalables à la DUP ont été conduites par le réseau technique de l'Équipement (CETE Méditerranée, notamment) sous le pilotage de la DDE qui a également conduit la concertation, l'instruction mixte et assuré le lancement de l'enquête publique.

Un financement par recours à la concession avait été demandé, dès 1991, par le Conseil régional. Après une étude plus fine montrant en particulier l'impossibilité d'adossement à une société d'autoroute métropolitaine, le directeur des Routes a proposé à la Région, courant 1997, de financer sur le FIRT une première section Saint-Paul/RD 10 - l'Ermitage-les-Bains, à classer en voie express. Le 26 juin 1998 la nouvelle équipe du Conseil régional a pris acte de l'abandon de la concession et confirmé le projet dans son intégralité jusqu'à l'Étang Salé.

La traversée du site préservé de la savane du Cap la Houssaye a été l'objet d'un débat entre services déconcentrés de l'État. Une mission du CGPC s'est rendue à cet effet à la Réunion en octobre 1998 pour proposer une solution acceptable. Validé par les deux ministres, son rapport a servi de base aux études modificatives qui ont abouti à l'approbation de l'APS le 11 octobre 2000.

La concertation et l'information ont repris dans la même période, arrivant à un large consensus des collectivités sur les options.

L'enquête publique (de la totalité du projet à 2 x 2 voies avec statut de route express) s'est déroulée du 13 novembre 2000 au 12 janvier 2001. L'avis de la commission d'enquête a été favorable avec deux réserves : revenir à un tracé droit à travers le Cap la Houssaye avec un échangeur complet à Plateau Caillou, et une traversée de Piton Saint-Leu - Bois de Nèfles en tranchée couverte. Le projet a donc été repris en tenant compte de ces modifications, et une enquête publique complémentaire, portant sur celles-ci, s'est déroulée du 22 octobre 2001 au 23 novembre 2001. L'avis de la commission d'enquête a cette fois été favorable sans réserve. Le décret déclarant le projet d'utilité publique a été signé le 3 mai 2002.

L'assistance à la maîtrise d'ouvrage

La direction d'opération est assistée de prestataires internes ou externes pour les missions de maîtrise d'ouvrage qui lui sont dévolues :

- ◆ foncier : bureau administratif et foncier du service des grands travaux de la DDE qui s'appuie sur des opérateurs fonciers (SEM locales) ;
- ◆ planning et ordonnancement : Algoé ;
- ◆ conseil en organisation et suivi des coûts : Autoroutes du Sud de la France ;
- ◆ communication : services de la Région et de la DDE ;
- ◆ architecture et paysage : architecte et paysagiste conseils de la DDE et atelier de travail réunissant les services déconcentrés compétents de l'État ;
- ◆ contrôle technique : Setra, CETE, CETU ;
- ◆ études relevant de la maîtrise d'ouvrage (géotechnique, vent) : bureaux d'études pilotés par la DDE.

Organisation de la maîtrise d'œuvre

Le projet a été découpé en deux sections :

- ◆ la maîtrise d'œuvre de la 1^{re} section, comprise entre Saint-Paul et la RD10, est assurée par la direction départementale de l'Équipement (service des grands travaux) ;
- ◆ la maîtrise d'œuvre de la deuxième section, comprise entre la RD10 et Etang-Salé est assurée par Scetauroute.

Trois ouvrages importants de la deuxième section ont fait l'objet de concours de maîtrise d'œuvre complète. Il s'agit :

- ◆ du franchissement de la Ravine Trois-Bassins dont la maîtrise d'œuvre a été attribuée au groupement Arcadis/Thalés/Berlottier pour une solution en béton à précontrainte extradossée (à noter qu'une solution à deux arcs convergents a également été étudiée par le groupement Ingerop-Mayeur-Morris-Rennaud) ;
- ◆ du franchissement de la Grande Ravine, dont la maîtrise d'œuvre a été attribuée au groupement Setec-TPI/Spielmann pour un pont à béquille à effet d'arc contrôlé ;
- ◆ du franchissement de la Ravine Fontaine dont la maîtrise d'œuvre a été attribuée au groupement Greish/Tremblet/Coyne & Bélier/Zirk/Deleuze pour un pont en arc.

La direction d'opération coordonne l'action des maîtres d'œuvre.

Allotissement des travaux

L'allotissement des travaux résulte des contraintes techniques, d'une volonté d'efficacité et d'un souhait de la collectivité de permettre aux entreprises locales de pouvoir participer à la compétition en vue de l'attribution des marchés (figure 4). Un certain nombre de marchés préparatoires aux grands travaux ont été lancés en ce sens dès la mi-2003. Les principaux marchés de terrassements, ouvrages

d'art courants et de rétablissement de communication (TOARC) dont certains incorporent également équipements et chaussées sont au nombre de six. Les ouvrages d'art non courants font l'objet de lots d'un ou plusieurs ouvrages en fonction de leur importance et des contraintes d'exécution :

- ◆ viaduc et tranchée couverte de Saint-Paul ;
- ◆ viaducs de la Savane (six ouvrages dont quatre du même type) ;
- ◆ tunnel du Cap la Houssaye ;
- ◆ dix-huit ouvrages non courants regroupés en huit lots sur la section 2 ;
- ◆ viaduc de Trois-Bassins ;
- ◆ pont de la Grande Ravine ;
- ◆ pont de la Ravine Fontaine.

Calendrier de réalisation

Les premiers travaux préparatoires et de rétablissements ont débuté à la mi-2003. Les premières grandes consultations se sont également déroulées en 2003 et au début 2004 et ont donné lieu à des offres assez sensiblement supérieures aux estimations. Certains marchés ont néanmoins abouti suite à des négociations, d'autres ont été relancés en consultation. Les travaux ont démarré pleinement en 2005.

L'objectif est aujourd'hui de livrer l'ensemble de la Route des Tamarins à la fin 2008 ou au début 2009.

Impact sur l'économie et l'emploi

Ce projet est actuellement l'un des chantiers routiers les plus importants sur le réseau national non concédé. Par rapport à une activité déjà soutenue à la Réunion (comprise entre 60 et 70 M€ sur les seules routes nationales), l'opération représente un quasi doublement de l'activité des travaux publics sur l'île.

Aussi, ce chantier devrait mobiliser les emplois directs suivants (estimation de la FNTP, avec sans doute aujourd'hui un léger décalage dans le temps) :

- ◆ 800 à 1 000 pour 2005 ;
- ◆ 1 500 à 2 000 pour 2006 ;
- ◆ 1 500 à 2 000 pour 2007 ;
- ◆ 800 à 1 000 pour 2008.

Ces emplois se composent à 15 % d'encadrement et à 85 % d'ouvriers et d'ouvriers qualifiés. Ce chantier fera se développer de nombreux métiers qui vont nécessairement se structurer et gagner en qualité.

Parallèlement, un programme d'actions de formation a été mis en œuvre par la Région à l'instigation de la DDE en liaison avec l'ANPE et divers autres organismes (CCIR, la Chambre métiers, IUT génie civil, RSMA...) pour qu'ils se positionnent sur l'élaboration de formation.

Ces formations sont axées sur trois secteurs "génie civil", "ouvrages d'art", "terrassements généraux et VRD". L'objectif est de former des chefs de

LA ROUTE DES TAMARINS EN QUELQUES CHIFFRES

- 33,7 km de route express entre Saint-Paul et L'Étang-Salé
- La portion en 2 x 3 voies mesure 21 m de large
- Entre Saint-Paul et le RD10 : deux chaussées de 10,5 m de large
- Entre le RD10 et L'Étang-Salé : deux chaussées de 7 m de large
- 9 échangeurs routiers (Saint-Paul, Plateau Caillou, l'Eperon, l'Héritage, le Barrage, les Colimaçons, Stella, Le Portail, L'Étang-Salé)
- 850 millions d'euros d'investissements (70 M€ d'études et de maîtrise d'œuvre, 31 M€ d'acquisitions foncières et de relogements, 749 M€ de travaux)
- 4 ouvrages d'art exceptionnels
- 3 tunnels
- 23 ponts non courants
- Plus de 120 ravines traversées
- 409 hectares d'emprise foncière

chantier, des chefs d'équipe, des géomètres, des conducteurs d'engins, des préposés aux tirs, des chauffeurs *dumpers*, des mécaniciens, etc. Ils seront partie active de ce grand projet.

Plus de 400 personnes ont été formées grâce à un financement de la Région Réunion et les programmes de formation se poursuivent.

La Route des tamarins est donc non seulement un projet vital pour permettre la "décongestion" du réseau routier à La Réunion mais elle est aussi un véritable vecteur du développement économique local.

■ CONCLUSION

Nous sommes aujourd'hui en 2005, 5 ans après le lancement réel de ce grand projet et à 3 ou 4 années de son achèvement, et nettement plus loin que le milieu du gué... Quel bilan d'étape ?

La première impression est que l'ouvrage, bien que tardif et difficile avance rapidement. La déclaration d'utilité publique, on l'a vu, ne date que de mai 2002 ; trois ans plus tard les deux tiers des marchés de travaux ont été conclus ou sont en cours de notification. Ce n'est pas si mal vu du côté des responsables.

Du côté des usagers et des milieux économiques la perception est évidemment différente : toute opération importante d'infrastructure arrive trop tard et met trop de temps à se réaliser alors que les embouteillages quotidiens dans l'ouest paralysent la vie de l'île. Il est vrai qu'un engagement plus en amont du programme aurait aussi permis d'éviter les récentes augmentations des prix du BTP et la montée des recours juridiques, deux points qui ont fait perdre plus d'une année à l'opération.

Désormais, l'essentiel est de tenir le projet au plan de sa qualité, de son coût et de le livrer au plus tard en 2009. L'organisation solidaire mise en place à La Réunion entre le Conseil régional, les services de la DDE et une forte organisation des maîtres d'œuvre, ont permis d'engager avec succès l'essentiel de l'opération. Nul doute que malgré les aléas encore à venir, les changements institutionnels attendus de la décentralisation, cette équipe qui avance et qui gagne, offrira très bientôt à La Réunion le "bipôle qui lui manque", l'alliance assurée par un axe moderne et sûr entre ses deux principales cités, Saint-Denis et Saint-Pierre.

Suivez la Route des Tamarins sur Internet

◆ Sur le site de la DDE de la Réunion :

<http://www.reunion.equipement.gouv.fr/rdt/>

◆ Sur le site du Conseil régional :

<http://www.regionreunion.com/>

ABSTRACT

The "Route des Tamarins" : a fundamental element for the travel and transport system in Reunion Island

M. Le Bloas, G. Morlet, M. Kahan

The "Route des Tamarins" is the last link, 33.7 km long, of the four-lane highway backbone connecting the main cities on the periphery of Reunion Island. Declared of public utility by decree of May 3rd 2002, the project is now at a stage where most construction works are being launched. We took the opportunity of this critical time to review, in the following articles, the main data of this ambitious project. The following pages develop the main issues and the organisation structure of the project. Follow the description of the different sequences of the road project and highlights on the major bridges and tunnels. We end up with an emphasis on the specific geological, geotechnical and extreme wind conditions encountered in Reunion Island and their impact on the studies.

RESUMEN ESPAÑOL

La Carretera de los Tamarindos : un elemento fundamental del sistema de transporte y de desplazamiento en La Reunión

M. Le Bloas, G. Morlet y M. Kahan

La Carretera de los Tamarindos corresponde al último tramo de 33,7 km de infraestructura vial de tres carriles que permite poner en comunicación a las principales ciudades de La Reunión. Declarada de utilidad pública el 3 de mayo de 2002, esta carretera está hoy en día en plena fase de inicio de las obras. Hemos elegido este momento decisivo para levantar un balance sobre esta ambiciosa operación mediante una serie de artículos en el presente número de la revista *Travaux*. En las páginas dedicadas se detallan los principales retos y las grandes líneas de la organización del proyecto. Los demás artículos describen el proyecto vial en sus distintas secuencias y, a continuación las importantes obras de fábrica de la infraestructura. Esta entrega acaba haciendo hincapié respecto a las particularidades geológicas, geotécnicas

así como en las condiciones climáticas extremas de La Reunión y su impacto en los estudios.

Projet de la section 1 : Saint-Paul / RD10

La première section de la Route des Tamarins s'étend sur les 6 km les plus au nord du projet entre le centre de la ville de Saint-Paul et la RD10, dite Route du Théâtre. Succession d'ouvrages (viaducs, tranchée couverte, tunnel), elle compte pour le tiers du montant de l'opération. Elle se compose de deux séquences bien distinctes, l'une très urbaine au niveau de la mer dans le bas de Saint-Paul, l'autre s'inscrivant dans un paysage de savane sur un plateau surplombant la ville, unique à la Réunion, les deux étant reliés par le viaduc de Saint-Paul, le plus important ouvrage de la route. Nous retraçons ici l'historique de cette partie de projet, les contraintes techniques et environnementales et les solutions apportées.

■ PRÉSENTATION GÉNÉRALE

Le découpage en deux sections de la Route des Tamarins résulte de l'organisation du projet, de sa maîtrise d'œuvre, mais aussi de séquences techniques ou environnementales bien distinctes. La première section qui s'étend du nord du centre-ville de Saint-Paul à la RD10, dite Route du Théâtre, au sud, concentre bon nombre d'enjeux et de difficultés techniques (figure 1).

Dans le secteur de Saint-Paul ville, la Route des Tamarins reprend et élargit la RN1 actuelle et organise les échanges avec le centre historique de la ville en requalifiant la "Chaussée Royale" en un boulevard urbain.

La route s'élève ensuite du niveau de la mer vers Plateau-Caillou et le quartier de l'Éperon jusqu'à une altitude de 213 m au moyen notamment du viaduc de Saint-Paul, l'ouvrage le plus important de la route. La traversée de la savane du Cap la Houssaye qui surplombe les remparts de Saint-Paul est une succession d'ouvrages (viaducs et tunnel). Cette section de 6 km représente pour cette raison près du tiers du coût de l'opération. Sa maîtrise d'œuvre a été confiée à la DDE qui s'est appuyée sur le réseau technique de l'Équipement, mais aussi sur des sociétés d'ingénierie privées pour la réalisation des études.

Les évolutions du projet

Du fait de son relief, des différentes expositions aux conditions climatiques, l'île de la Réunion rassemble sur une surface réduite une très grande variété de paysages. Le site de la savane du Cap la Houssaye est unique en son genre sur le département et a suscité une attention particulière et un véritable débat interministériel sur la solution à adopter pour le franchir.

Ainsi, parallèlement à l'adoption par le Conseil Régional du principe de réalisation de la route dans son intégralité, financée localement sur le Fonds d'Investissement Routier et Transport et sur les fonds européens, les ministères de l'Équipement et de l'Environnement confiaient au Conseil Général des Ponts et Chaussées une mission d'expert-



Figure 1
Vue en plan
de la première section
de la Route des Tamarins
*Plan view of the first
section of Route
des Tamarins highway*

Hélène Oudin-



Hograindleur
CHEF DE PROJET
PREMIÈRE SECTION
DDE de la Réunion

Franck Lafond



TECHNICIEN SUPÉRIEUR
PRINCIPAL
SERVICE DES GRANDS
TRAVAUX
DDE de la Réunion

Michel Kahan



CHEF DU SERVICE
DES GRANDS TRAVAUX
DDE de la Réunion

Bertrand Folléa

PAYSAGISTE
Cabinet Folléa-Gautier

Frédéric Zirk



ARCHITECTE
URBANISTE
Cabinet Faup et Zirk

Pierre-Guillaume

Dezeuze
ARCHITECTE URBANISTE
Cabinet Dezeuze

Figure 2
Tracés haut
et bas
dans le secteur
de la savane

High and low
alignments
in the savanna
sector



Tableau I
Caractéristiques
du tracé en plan
et du profil en long
Characteristics
of the horizontal
alignment
and longitudinal
profile

| | | Valeurs du projet | Limite Ictaal (L2) |
|--|---------------------|----------------------|-----------------------|
| Rayon minimal en plan : | | 500 m | 400 m |
| Rayon minimal en profil en long : | En angle saillant : | 6 000 m | 6 000 m |
| | En angle rentrant : | 4 800 m | 3 000 m |
| Pente maximale : | | 6% | 6% |
| Différence des cotes projets aux extrémités de la section : | | 210 m | / |

Figure 3
Rétablissement
de l'itinéraire
côtier
Restoration
of the coastal
route



tise, afin d'analyser les caractéristiques du projet et de proposer des solutions d'insertion dans le site. Les conclusions, rendues en mars 1999, demandaient que le tracé contourne le site sensible de la savane en amenant la route à proximité de la frange urbaine de Plateau-Caillou (figure 2). D'autres modifications sur le diffuseur de Saint-Paul centre et sur le quartier de Bois de Nêfles à Saint-Leu étaient également visées.

Des études d'avant-projet sommaire modificatif (APSM) ont donc été engagées à partir de 1999. Le tracé particulièrement sinueux ne permettait pas

de réaliser la bretelle de sortie vers Plateau-Caillou en venant du Sud, pour des raisons de sécurité.

Le projet de la Route des Tamarins a ensuite été soumis à enquête publique, du 13 novembre 2000 au 12 janvier 2001. En mars 2001, la commission d'enquête a émis un avis favorable à la déclaration d'utilité publique des travaux de cette opération, sous réserve de la modification du projet sur deux secteurs dont celui de la savane du Cap la Hous-saye, pour y intégrer un échangeur complet à Plateau-Caillou et une traversée plus directe du site tout en préservant ses qualités paysagères. Le ministère de l'Équipement a décidé de suivre l'avis de la commission d'enquête.

Après une phase d'études sur ces points nouveaux, une enquête complémentaire à l'enquête initiale s'est déroulée en octobre-novembre 2001, qui s'est conclue par un avis favorable cette fois sans réserve.

Le décret d'utilité publique a été signé le 3 mai 2002.

Un dossier d'optimisation de l'APSM, prenant en compte les modifications demandées au cours de la première enquête publique a été établi en mars 2002 et transmis à la Direction des Routes pour approbation le 25 avril 2002.

Caractéristiques techniques

Description générale

Le projet comporte deux secteurs bien distincts, l'un dans le bas de Saint-Paul, constitué du diffuseur et d'importants travaux d'aménagements urbains, l'autre sur le plateau surplombant la ville et la côte, dit secteur de la "Savane", que le projet traverse à l'aval des quartiers de Plateau-Caillou et de l'Éperon.

Le tracé débute à Saint-Paul Ville, 150 m avant l'origine de la première bretelle de sortie du premier diffuseur, au droit de la rue Lambert. Il se superpose à la RN1 actuelle pour le sens du nord vers le sud et s'étend en remblai au-dessus de l'étang Saint-Paul pour le sens du sud vers le nord. Le profil en long est, là, calé de façon à s'approcher au mieux de la chaussée existante. Le profil en travers comprend 2 x 2 voies de 3,50 m chacune, deux bandes d'arrêt d'urgence de 2,50 m et un terre-plein central de 3 m. Après avoir franchi la RD6, la Route des Tamarins se développe en rampe (pentes de 6 à 4 %) jusqu'à la fin de la section 1, de façon à atteindre la cote 213 m NGR environ, au droit de la RD10. Du fait de ces fortes pentes, cette partie comporte une voie spécialisée pour les véhicules lents, aussi bien en sens montant qu'en sens descendant. Dans cette zone avec voies pour véhicules lents, le profil en travers comprend dans chaque sens, une bande dérasée droite de 1 m, la voie véhicules lents, de 3,50 m, deux voies de 3,50 m chacune, une bande dérasée gauche de 1 m. Le tracé dans la savane est dicté principale-

ment par des exigences paysagères exprimées lors des enquêtes publiques (cf. paragraphe "Résultats de l'enquête publique et engagements du maître d'ouvrage").

La géométrie résulte du choix de la catégorie L2 de l'ICTAAL 2000.

Caractéristiques du tracé en plan et du profil en long

Cf. tableau I.

Échanges et rétablissements

La section comporte trois diffuseurs complets.

Le diffuseur de Saint-Paul permet de desservir le centre de Saint-Paul, la gare routière, via la Chaussée Royale, le quartier de Grande Fontaine (côté Etang Saint-Paul), la RD6 qui monte jusqu'au quartier de Plateau-Caillou (rampes de Plateau-Caillou). Le diffuseur de Plateau-Caillou permet de desservir Plateau-Caillou et les quartiers entre la RD6 et la RD10. Il est raccordé au haut de la RD6 par un échangeur dénivelé, dit échangeur de RD6.

Le diffuseur de l'Éperon permet d'accéder au quartier de l'Éperon ou de redescendre sur le front de mer par la RD10 (Route du Théâtre).

Les voies rétablies sont les suivantes :

- ◆ la Chaussée Royale (RN1A), doublée dans le cadre du projet ;
- ◆ les routes départementales : RD5 (quartier Grande Fontaine/gare routière), la RD6 (Ravine Bernica/rue Poivre), la RD6 (à Plateau-Caillou), la RD10 ;
- ◆ la RN1 : la Route des Tamarins constituera la nouvelle RN1. L'itinéraire côtier, passant devant le Cap la Houssaye en particulier, sera accessible par la Chaussée Royale (dans le sens nord-sud) et la voie de rétablissement de l'itinéraire côtier (RIC) passant derrière l'Église de Saint-Paul Ville, dans le sens sud-nord (figure 3).

Service à l'usager, installation d'exploitation, trafic

Un centre d'entretien et d'intervention (CEI) est prévu au niveau du diffuseur de l'Éperon. Il permettra notamment d'accéder très rapidement au tunnel du Cap la Houssaye.

Les trafics attendus à l'horizon 2015 sur les voies principales (en considérant l'hypothèse de mise en service du barreau de l'Hermitage) sont les suivants (véhicules/jour) :

- ◆ RN1 au nord de la Route des Tamarins : 108 100 ;
 - ◆ Route des Tamarins entre Saint-Paul Ville et le diffuseur de Plateau-Caillou : 89 600 ;
 - ◆ Route des Tamarins entre le diffuseur de Plateau-Caillou et le diffuseur de l'Éperon : 72 200 ;
 - ◆ RD6 : 9 900 ;
 - ◆ RD10 côté montagne du diffuseur de l'Éperon : 21 000 ;
 - ◆ RD10 côté mer du diffuseur de l'Éperon : 19 900.
- La circulation très difficile aujourd'hui sur les rampes de Plateau-Caillou (RD6) sera ainsi divisée par deux,

ce quartier étant alors desservi directement par un diffuseur de la Route des Tamarins.

La principale difficulté réside dans le fonctionnement des échanges avec le centre-ville de Saint-Paul. Une modélisation dynamique a été effectuée, afin de dimensionner le diffuseur et de vérifier l'écoulement correct du trafic sur l'ensemble des voiries connexes : Chaussée Royale, RD5, RD6, itinéraire côtier. Une des bretelles (de sortie vers Saint-Paul en venant du nord) a dû ainsi être rejetée à 400 m au nord du diffuseur principal. Tous les carrefours seront gérés par des feux.

■ CONTRAINTES ENVIRONNEMENTALES

Résultats de l'enquête publique et engagements du maître d'ouvrage

Les principales recommandations exprimées dans les conclusions des deux rapports d'enquête portent sur les points suivants :

- ◆ mesures contre le bruit : le trafic induit par la nouvelle route et son élévation au-dessus de la ville constituera une source de nuisance complémentaire pour les riverains de l'actuelle RN1, au bas de la falaise. Une protection à la source par murs ou écrans antibruit fixés sur le viaduc sera donc mise en place. En complément, une protection de façade a été installée sur l'école Rosalie Javouhey avant le démarrage des premiers travaux ;
- ◆ mesures d'intégration du viaduc de Saint-Paul très présent à la limite d'une zone urbaine et d'une zone naturelle de fort intérêt patrimonial, à proximité de la Grotte des Premiers Français : l'architecte et le paysagiste du projet ont travaillé en collaboration avec un atelier regroupant les différents services de l'État (DRAC, DIREN, SDAP) et la Région, afin de tenir compte des enjeux du site. Ainsi, la culée nord du viaduc a été placée de façon à ne pas obérer la vue sur la ravine Bernica, site inscrit et ancienne promenade des Saint-Paulois, et sa travure a été adaptée pour dégager l'espace autour du bâtiment administratif de l'hôpital psychiatrique du XVIII^e siècle. Du fait de son décalage par rapport à la ravine Bernica et de la pente limitée à 6 %, le viaduc entre dans une tranchée située 30 m environ sous la crête de la falaise surplombant la ville. Pour des raisons de protection phonique du quartier de Youlou Panga situé au-dessus, la tranchée est couverte. Cela permet également de recréer la ligne de crête et de limiter l'impact sur le paysage. Un des enjeux forts est la reconstitution du rempart au-dessus de la tête nord de la tranchée couverte, très visible depuis le centre de Saint-Paul et depuis la route ;
- ◆ la traversée de la savane du Cap la Houssaye doit faire l'objet d'un traitement paysager particu-

LES PRINCIPAUX INTERVENANTS "ÉTUDES"

Maître d'œuvre

DDE, Service des Grands Travaux

Etudes générales d'APS

CETE Méditerranée

Etudes générales d'APSM

Scetauroute

Etudes géologiques et géotechniques

CETE Méditerranée/LRPC

Etudes générales de projet

Ingérop/DDE

Etudes du viaduc de Saint-Paul

Setra

Etudes de la tranchée couverte de Saint-Paul

Setra (EPOA)/CETE Méditerranée (POA)

Etudes du tunnel du Cap la Houssaye

CETU (EPOA) - Scetauroute (POA)

Etudes des viaducs de la Savane (Fleurimont et Bras-Boucan Canot)

Arcadis

Paysagiste

Bertrand Folléa

Architectes

Frédéric Zirk/Pierre-Guillaume Dezeuze

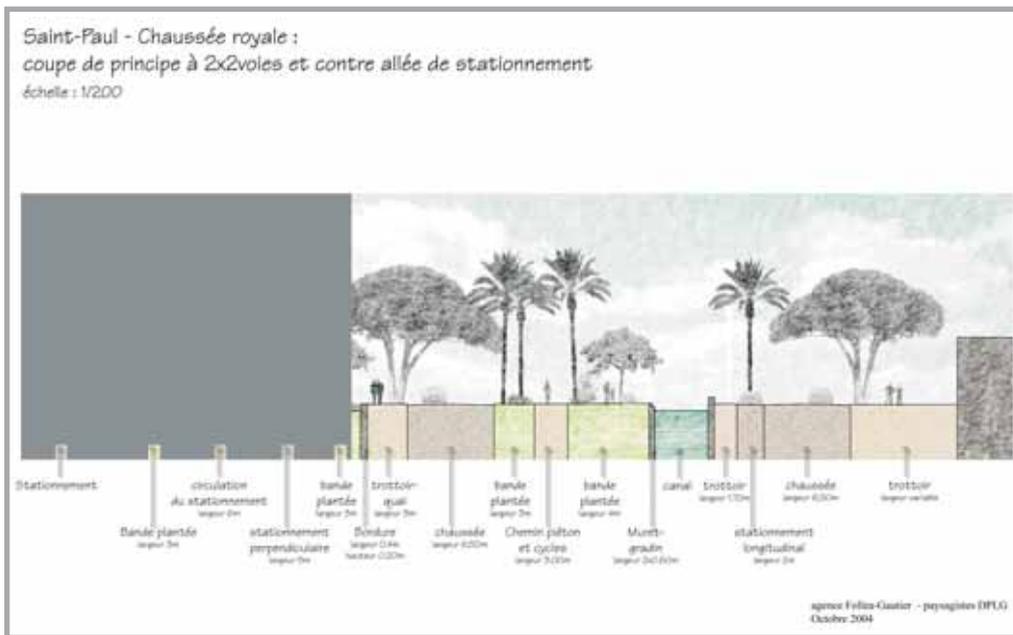


Figure 4
Profil en travers type des aménagements du bas de Saint-Paul
Typical cross section of development work in lower Saint-Paul

Figure 5
Promenade
vers la Ravine Bernica
depuis la Chaussée
Royale
Public walk
toward Bernica Ravine
from the "Chaussée
Royale"

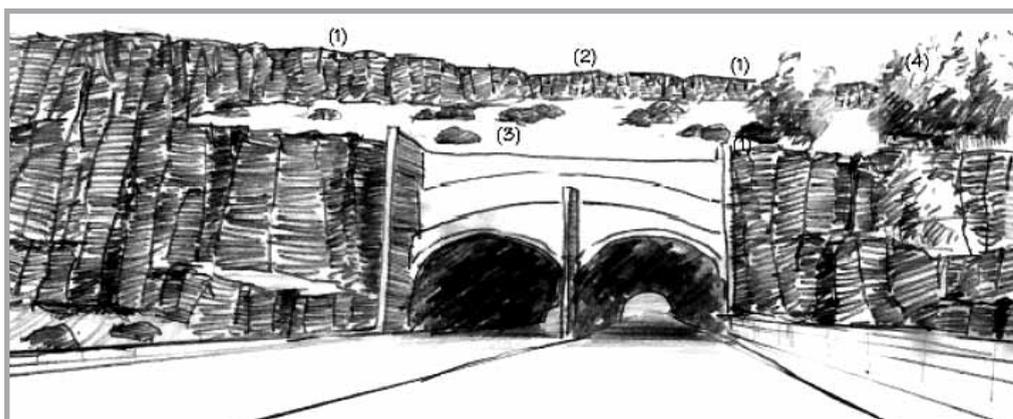


Figure 6
Tête nord de la tranchée couverte
Northern portal of the cut-and-cover tunnel

lièrement soigné. Une attention particulière sera apportée à la préservation de la faune endémique et le tracé devra éviter les tables rocheuses utilisées par les pailles en queue pour se reproduire ;
◆ par ailleurs, au cours de l'instruction mixte, la DRASS a demandé à ce que les rejets des eaux après traitement dans les bassins de décantation soient effectués hors des périmètres de protection et à l'aval hydraulique des captages et que soient installés des postes de mesure de la qualité de l'air à proximité de la route dans les zones urbaines.

PROJET PAYSAGER ET ARCHITECTURAL

La DDE et le Conseil Régional se sont adjoints les services d'un paysagiste et d'un architecte pour la définition du projet. Le concours a été attribué au groupement constitué du cabinet Folléa-Gautier pour le volet paysage, des cabinets Faup et Zirk et Dezeuze pour le volet architectural et de Sogelerg (aujourd'hui Thalès) pour une assistance technique à la conception.

Séquence urbaine de Saint-Paul ville

Les principes qui ont guidé l'aménagement sont les suivants :

- ◆ la Route des Tamarins doit rester une voie discrète malgré ses dimensions, perméable aux échanges et circulations locales malgré sa situation ;
- ◆ le diffuseur de Saint-Paul constitue une porte d'entrée de ville ne perturbant pas les liaisons entre les quartiers de Grande Fontaine (côté montagne) et Saint-Paul centre (côté mer) via la RD5 ;
- ◆ les études ont montré que la Chaussée Royale, axe structurant et historique de Saint-Paul côté montagne, ne suffirait pas à écouler le trafic induit par le futur diffuseur et ceci, quelle que soit la configuration de ce dernier. Il a donc été décidé de la doubler en un boulevard urbain de part et d'autre du canal Bernica. Le paysagiste Bertrand Folléa a proposé un projet de qualité, que la Commune s'est appropriée, comportant outre quatre à six voies de circulation, de confortables trottoirs ombragés, une piste cyclable et un espace tampon entre le boulevard et la Route des Tamarins que la mairie a souhaité convertir en un parking paysager dans l'attente du futur transport en commun régional (tram-train) pour lequel des espaces ont été préservés (figure 4) ;
- ◆ Bernica : la ravine ancienne est réhabilitée et sa liaison à Saint-Paul centre est assurée par un axe de promenade débouchant sur une terrasse au niveau de la digue de protection (figure 5) ;
- ◆ la tête de la tranchée couverte : un ouvrage dessiné et intégré, qui respecte la silhouette, les cou-

leurs et les textures de la falaise : création d'une "boîte" d'accueil de la Route des Tamarins dans la falaise, en béton sombre, avec des piédroits en excroissance englobant la culée et le glacis au-dessus des deux voûtes de la tranchée couverte ; cicatrisation entre la boîte créée et la falaise naturelle par une reconstitution des enrochements (figure 6).

Savane du Cap la Houssaye

La traversée de la savane du Cap la Houssaye (photo 1) se caractérise par l'importance du traitement paysager qui doit y être apporté. Le site est en effet en cours d'acquisition par le Conservatoire du Littoral. Ce traitement paysager, qui s'effectue essentiellement au niveau de la morphologie et du choix des matériaux, a été une condition au passage de la Route des Tamarins dans cette savane. Les ateliers de travail provoqués à l'issue de la remise du premier rapport de la commission d'enquête publique, ateliers regroupant les différents partenaires concernés par le projet (maître d'ouvrage, DDE, DIREN, SDAP, DRAC, DAF, architecte et paysagiste conseils de la DDE, équipe de maîtrise d'œuvre) ont conclu qu'un tracé direct dans la savane, ne comportant qu'un tunnel au niveau du Cap la Houssaye, n'était acceptable que sous réserve d'une ambition forte et respectée jusqu'au niveau de la réalisation des travaux dans le traitement paysager. Le tracé suit donc au plus près le terrain naturel. Pour se faire, les deux chaussées se séparent et se décalent en altitude dès la sortie de la tranchée couverte pour se rejoindre peu avant le diffuseur de l'Éperon. Cette séparation est également imposée par les contraintes techniques de creusement du tunnel. En plan, le tracé est relativement sinueux : déporté vers la mer au sortir de la tranchée couverte pour rejoindre rapidement le niveau du terrain naturel et limiter ainsi les déblais, il se rabat ensuite côté montagne pour contourner au plus juste le périmètre de protection du dépôt d'explosif de la Réunion ; il franchit ensuite la Ravine Fleurimont par deux viaducs parallèles puis traverse la croupe du Cap la Houssaye par un tunnel à deux tubes ; la partie sud du tracé contourne par l'aval deux tables rocheuses, véritables repères du paysage de la savane, et franchit à 40 m d'altitude la Ravine Bras-Boucan Canot (figure 7).

Ce choix de tracé a reçu un avis favorable de la commission d'aménagement du Conseil Régional en juillet 2001. Les passages en déblai (figure 8) sont traités en canyon, avec une table rocheuse en tête de déblais, un profil concave avec quelques blocs en dessous ; ce profil permet d'éloigner les zones de chute de blocs de la plate-forme routière ; les larges pièges à cailloux créés en pied permettent de s'affranchir fréquemment de la réalisation de fossés hydrauliques en tête de déblais.



Photo 1
Savane du Cap la Houssaye
Cap La Houssaye savanna



Figure 7
Traversée de la savane du Cap la Houssaye
Crossing the Cap La Houssaye savanna

Figure 8
Profil en déblai
Earth cut profile

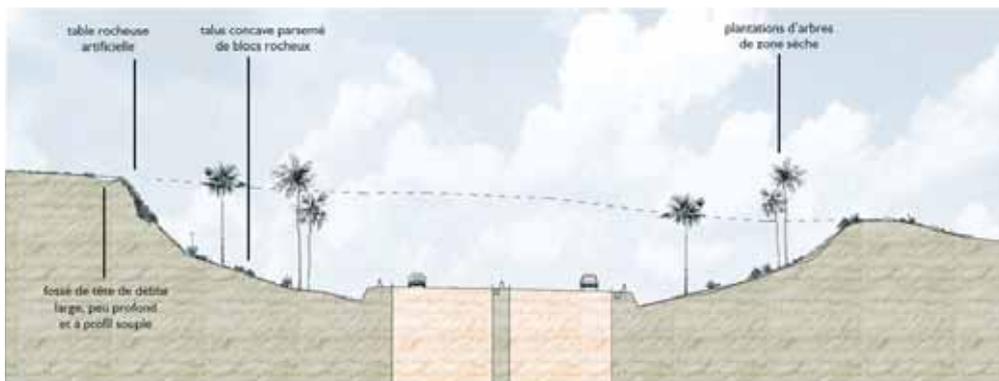


Figure 9
Profil
en remblai
*Backfill
profile*

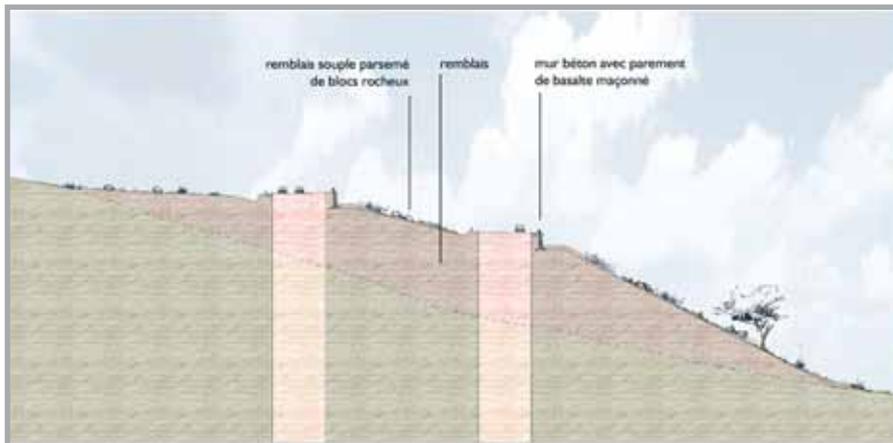
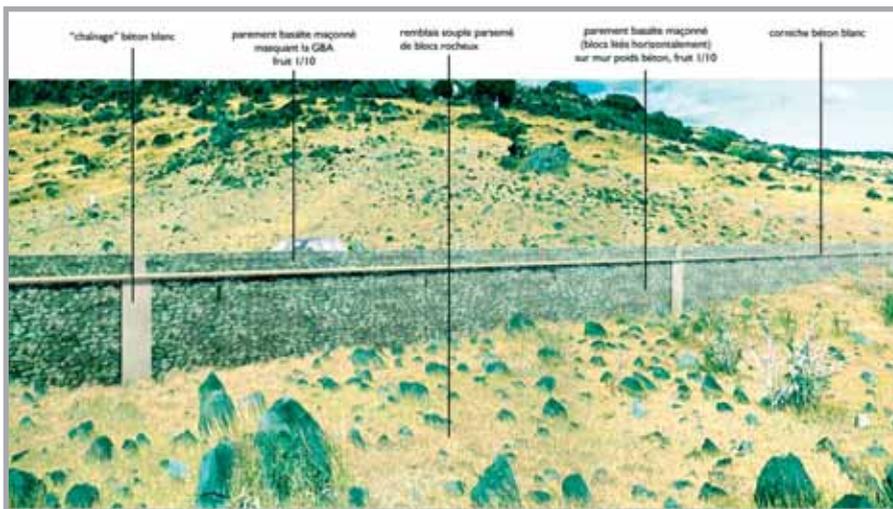


Figure 10
Murs
maçonnés
"pays"
*Local style
brick walls*



Les remblais (figure 9) sont traités en terrasses, avec un mur maçonné de soutènement et des remblais complémentaires de rattrapage du terrain naturel en pied, permettant ainsi de donner un meilleur effet d'assise de l'infrastructure et un effet de terrasse ouverte sur le paysage.

Dans la pratique, les murs maçonnés (figure 10) n'ont pas de fonction de soutènement, les remblais étant constitués, en partie latérale, de massifs en sols renforcés ; ces maçonneries n'ont qu'un rôle de parement du massif en sol renforcé.

En pied de maçonnerie, des remblais d'aspect naturel permettent de rattraper le terrain naturel en douceur.

Les ouvrages hydrauliques, de rétablissement des écoulements naturels, les bassins de décantation et de retenue, s'intègrent, dans la mesure du possible, dans la topographie du site : entonnements voûtés, maçonneries, bassins déformés pour limiter les entailles dans le relief.

Les matériaux utilisés sont de préférence minéraux plutôt que métalliques, dispositifs de retenue en béton désactivé en particulier.

Les matériaux issus du chantier de la Route des Tamarins/section 1 étant largement excédentaires (~ 600 000 m³ d'excédents), il est proposé, en

concertation avec le Conservatoire du Littoral et le paysagiste, de profiter de ces matériaux pour dessiner des limites plus claires et plus lisibles pour les espaces naturels du Cap la Houssaye, pour rehausser, bomber davantage des croupes existantes dans la savane, assouplir certains grands talus de remblais.

Plantations

La Route des Tamarins traverse deux contextes radicalement opposés, malgré la très faible distance parcourue :

- ◆ l'un des rares milieux humides de l'île d'une part, avec l'Étang de Saint-Paul en passe de devenir réserve naturelle ;

- ◆ et le seul espace désertique de savane ouverte de l'île d'autre part, avec le Cap la Houssaye en cours d'acquisition par le Conservatoire du Littoral.

Le choix végétal d'accompagnement de la Route des Tamarins répond à ce principe d'exacerbation des contrastes :

- ◆ à Saint-Paul : ombre, fraîcheur, exubérance, foisonnement, générosité, fertilité, eau, tons verts et bleus, plusieurs étages de végétation, jardin de production, présence marquante de cocotiers ;

- ◆ dans la savane : luminosité, sécheresse, économie de l'eau, ouvertures visuelles, tons chauds jaunes, oranges et rouges, arbres silhouettes isolés ou par bouquets, présence minérale de rochers de basalte sombre, présence marquante du latanier.

Les plantations à Saint-Paul Ville s'adaptent aux différents secteurs. Pour le diffuseur, il s'agira de cocotiers (transplantations d'arbres existants) et pour la Chaussée Royale d'arbres d'alignement (arbres à pluie), de palmiers décoratifs le long des stationnements et des arbres variés (palmiers royaux, phœnix, papayers, orangers citrus, kumquats) dans le terre-plein central.

La perspective de la promenade Bernica se recrée au moyen de palmiers royaux en alignement accompagnés de goyaviers fleurs, plumbagos bleus, grenadiers, orangers citrus et de haies (buis pays, bambous nains).

Le rétablissement de l'itinéraire côtier au pied du viaduc de Saint-Paul sera bordé de plantes grimpanes sur les murs antibruit et de jardins d'eau successifs sous le viaduc (songe, papyrus, jonc...). Les essences retenues dans la savane sont :

- ◆ dans les zones de déblais (sortie tranchée couverte) : de grands arbres silhouettes, lataniers, baobabs... ;

- ◆ au niveau du diffuseur de Plateau Caillou : des lataniers, benjoints, brachychitons... ;

- ◆ au niveau des fonds de vallons et des ouvrages hydrauliques : des arbres et arbustes ;

- ◆ au niveau des crêtes et des versants : des aloès, baobabs... ;

◆ au niveau du diffuseur de l'Éperon, côté savane, des arbres silhouettes ; côté urbanisé, des flamboyants, des bois d'arnette...

Traitement des ouvrages d'art

Le traitement architectural des ouvrages non courants, viaduc de Saint-Paul, viaducs et tunnels de la savane, est décrit dans les articles spécifiques de ce même numéro.

En ce qui concerne les ouvrages courants, le parti général s'observe sous deux aspects :

◆ l'ouvrage par rapport aux riverains, la vision recherchée est celle de la tradition réunionnaise, avec des murs "pays", des corniches et des éléments frontaux blancs, des parements habillés de pierres locales, des piles en béton brun foncé ;

◆ l'ouvrage par rapport à l'utilisateur, la vision recherchée étant celle d'ouvrages contemporains simples, se raccordant par des murs en retour au terrain adjacent et encadrés de façon claire par des éléments frontaux blancs. Les détails de superstructures seront clairs (béton blanc) ou colorés (figure 11).

LES CONTRAINTES TECHNIQUES ET LEURS SOLUTIONS

Foncier

Outre les acquisitions foncières usuelles, deux opérations de relogement ont été nécessaires. La plus importante concerne le viaduc de Saint-Paul qui traverse l'emprise de l'Établissement Public de Santé Mentale de la Réunion. Cet hôpital a dû être déplacé à quelques kilomètres de là. La conduite d'opération de cette reconstruction a été assurée par la DDE.

Par ailleurs, une vingtaine de familles du bas de Saint-Paul ou du secteur de l'Éperon ont dû être relogées. Plusieurs propositions leur ont été faites, parmi lesquelles deux opérations de logement social évolutif.

Compte tenu de la pression foncière considérable à la Réunion et en particulier dans l'Ouest de l'île, ces démarches ont pesé lourdement sur les délais de l'opération Route des Tamarins.

Géologie et géotechnique

La section 1 de la Route des Tamarins se développe sur trois grands ensembles géomorphologiques :

◆ la zone de l'étang de Saint-Paul, sur une plaine côtière (altitude 2 à 4 m) : les sols sont constitués de limons et d'ensembles sablo-graveleux de remplissage de l'étang ; la nappe est systématiquement proche, la zone est inondable (la route actuelle et la future forment une digue protégeant le centre

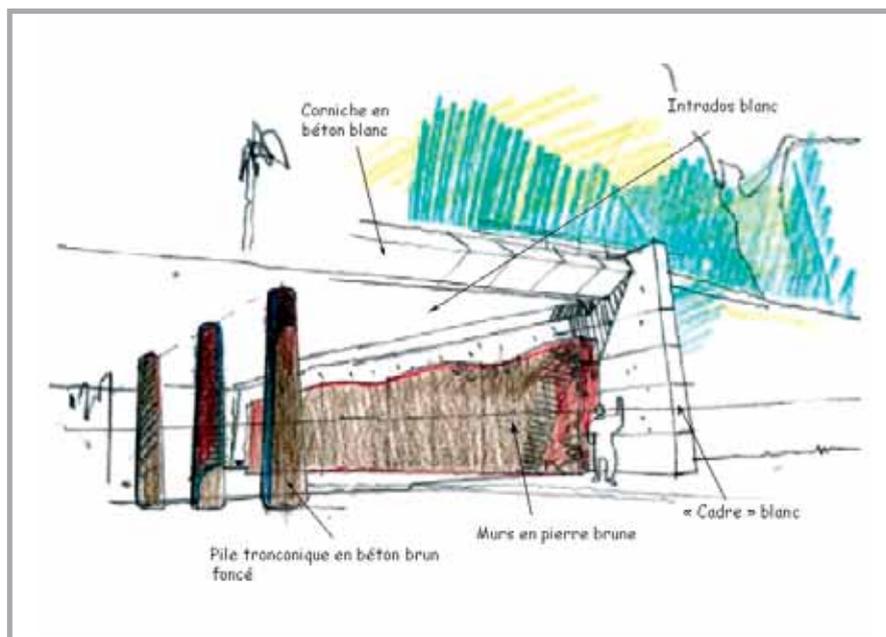


Figure 11
Architecture type
des ouvrages courants
*Typical architecture of civil
engineering structures
along the highway*

de Saint-Paul des débordements de la Ravine Bernica) ;

◆ la zone du plateau rocheux de Plateau-Caillou, jusqu'à la ravine Fleurimont, limitée au nord par une falaise de 80 m de hauteur : une succession de coulées remplit de larges vallées creusées dans les coulées antérieures ;

◆ la zone vallonnée du Cap la Houssaye, entre la ravine Fleurimont et la ravine Saint-Gilles (altitude 150 à 200 m) : les terrains rencontrés sont des Brèches de Saint-Gilles ; en amont du tracé, un ensemble de coulées épaisses de Mugéarites forme des entablements (altitude 200 m environ) limités par de petites falaises (les deux "tables rocheuses" identifiées au stade des études précédentes en particulier).

De façon très synthétique, au vu des qualités des sols de fondation, deux types de fondation sont prévus : profondes dans la zone du bas de Saint-Paul, pour les ouvrages courants comme pour le viaduc de Saint-Paul et superficielles dans la zone de la savane, pour les ouvrages courants comme pour les viaducs.

Risques naturels

Les risques de chutes de blocs sont monnaie courante à la Réunion. Ils ont été étudiés dans trois zones :

◆ le long de la falaise du Rempart de Saint-Paul : des dispositifs de protection contre les chutes de blocs seront installés afin de protéger les appuis et le tablier du viaduc de Saint-Paul : écrans déflecteurs, filets pendus ;

◆ au niveau des déblais dans la savane : des trajectoires types de blocs ont été repérées d'après les morphologies de déblais prévues ; ces morphologies sont favorables à des chutes limitées et

à un impact avant la route; une protection des parois par un système grillage voire clouage/béton projeté, de larges caniveaux/pièges à cailloux en pied de déblais, et des dispositifs de retenue latéraux en déblais permettent de se prémunir des risques de chutes de blocs sur la chaussée;

- ◆ au niveau de la "table rocheuse" surmontant la rive droite de la ravine Bras-Boucan Canot : une expertise a permis de conclure que cette falaise ne constituait pas un risque pour le viaduc de Bras-Boucan Canot à proximité.

Hydraulique

Entre Saint-Paul Ville et la RD10, la Route des Tamarins intercepte un nombre limité de ravines. La transparence hydraulique de la route est assurée par des ouvrages, courants ou non courants, et par des ouvrages hydrauliques. Les ouvrages hydrauliques sont dimensionnés pour une crue centennale; de type cadre fermé (2 m x 2 m minimum pour faciliter l'entretien), ils comportent une vanne prévue pour les charriages éventuels (1 m minimum). Le principe d'aménagement de ces ouvrages hydrauliques consiste à conserver la pente de la ravine dans le cas de remblais et à recréer la rugosité naturelle du lit à l'intérieur. Le radier des ouvrages est soit un radier béton, soit un radier protégé par des enrochements constituant un radier d'usure. En amont des ouvrages, des entonnements sont prévus pour mieux collecter les eaux. Des chutes sont prévues dans le cas d'ouvrages en déblai. En aval des ouvrages, des protections de la ravine en enrochements sont mises en œuvre ainsi que, dans certains cas, des ouvrages de dissipation d'énergie.

Interfaces avec la canalisation d'irrigation du littoral ouest (ILO)

Le projet de la Route des Tamarins interfère avec la conduite de basculement des eaux d'Est en Ouest en trois zones : au niveau de Saint-Paul Ville, au niveau du diffuseur de Plateau-Caillou, au niveau de l'échangeur de RD6.

Après concertation avec le Conseil Général, propriétaire de cette conduite (diamètre 1 600 à 1 400 mm sous 20 bars de pression), il est apparu que le déplacement de cette conduite ne pouvait être envisagé.

Le tracé a donc été calé de façon à toujours franchir la conduite en remblai, le maintien de la conduite durant une phase d'excavation étant impossible. Pour éviter les surcharges et les tassements éventuels dus aux nouveaux remblais, la conduite sera coiffée d'une dalle appuyée bien au-delà de la conduite, soit sur des micropieux dans les zones compressibles, soit sur des longrines en béton reposant sur le rocher dans le secteur de la savane.

Chantier sous trafic

Le secteur de Saint-Paul ville est d'une circulation particulièrement difficile dès avant les travaux. Les quatre voies qui se réduisent à deux sont saturées tous les soirs. Les travaux ne peuvent s'envisager qu'avec un phasage qui offre une surcapacité dès le début. C'est ainsi que la bretelle de sortie en venant du nord sera ouverte en premier lieu pour offrir une alternative à l'entrée dans Saint-Paul. La Chaussée Royale sera doublée rapidement et une déviation avec un ouvrage provisoire sur la RD6 sera mise en place pour maintenir le trafic de transit vers le sud. Des feux viendront également réguler le trafic sur la Chaussée Royale.

■ ALLOTISSEMENT DES TRAVAUX

Le viaduc et la tranchée couverte de Saint-Paul ont été regroupés en un seul marché compte tenu de l'interface forte entre la culée sud du viaduc et la tranchée.

Les viaducs franchissant les ravines Fleurimont et Bras-Boucan Canot forment quatre ouvrages de structure identique et ont été regroupés dans le marché des "Viaducs de la savane".

La construction du tunnel a été séparée en un marché préparatoire de terrassement des têtes et un marché du tunnel proprement dit.

La complexité des aménagements du bas de Saint-Paul et les contraintes de trafic justifient l'unicité du marché de terrassements, ouvrages d'art courants, rétablissements de communication et chaussées (TOARCC). Une déviation de la RN1 actuelle entre la RD6 et l'hôpital psychiatrique a néanmoins été anticipée pour permettre le démarrage du viaduc.

Les travaux de terrassements et d'ouvrages courants de la savane faisaient initialement l'objet d'un marché unique (TOARCC). Le diffuseur de l'Éperon en a été extrait de façon à permettre au Conseil Général de finaliser les études d'une déviation de la RD10 s'y raccordant. Par ailleurs, le Conseil Régional a souhaité ouvrir les travaux du secteur de

LES PRINCIPALES QUANTITÉS DE LA PREMIÈRE SECTION

- 6 km de 2 x 2 voies auxquelles s'ajoute une voie pour véhicules lents dans chaque sens
- Déblais : 1 900 000 m³
- Remblais : 1 400 000 m³
- 1 780 m de tablier d'ouvrages non courants (viaduc de Saint-Paul, viaducs Fleurimont et Bras-Boucan Canot)
- Une tranchée couverte de 150 m et un tunnel à deux tubes d'environ 300 m chacun
- Neuf ouvrages d'art courants (hors ouvrages hydrauliques)
- Coût estimé des travaux : 280 M€ (valeur janvier 2004)

Attribution des marchés de travaux

Award of works contracts

| Marchés de travaux attribués à fin juillet 2005 | Attribués en : | À : (mandataire souligné) |
|--|----------------|--|
| Terrassements expérimentaux | juin-03 | GTOI |
| Déviations de la RN1 | mai-04 | SBTPC |
| Piste principale de chantier | nov-04 | <u>Sogéa</u> / Ouest Concassage |
| Viaducs de la Savane (Fleurimont, Bras Boucan Canot) | juin-04 | <u>Demathieu & Bard</u> - GTOI |
| Terrassements des têtes de tunnels | mars-04 | Sogea |
| Tunnel du Cap la Houssaye | mai-05 | <u>Spie Batignolles TPCI</u> - Razel |
| TOARCC de Plateau Caillou | juin-05 | <u>GTOI</u> - Sogea - SBTPC - Demathieu & Bard |
| Viaduc de Saint-Paul | juin-05 | <u>Razel</u> - Eiffage TP - Eiffel - Matière - Bilfinger Berger - Heaven Climber |

l'Éperon à une plus large concurrence locale. Au total, il y a aura donc trois marchés, le TOARCC de Plateau-Caillou et deux marchés dans le secteur de l'Éperon : l'un pour les ouvrages, l'autre pour les terrassements.

Viendront ensuite les contrats de culture et de plantation et les marchés d'équipements et de finitions.

■ CONCLUSION

Modeste par sa longueur, de seulement 6 km, la première section de la Route des Tamarins concentre néanmoins des enjeux très forts. Jusqu'à ce jour ce furent, bien sûr, des enjeux techniques avec les viaducs, la tranchée couverte et le tunnel, mais aussi fonciers avec le relogement d'un hôpital et de nombreuses familles.

Le projet que nous avons présenté ici est issu d'une très large concertation avec les partenaires locaux : la Commune en premier lieu avec laquelle le projet mûrit depuis de nombreuses années, le Département, les autres services de l'État (DIREN, DAF, DRAC, DRASS, Domaines, SDIS,...) et bien entendu la Région et la DDE, maîtres d'ouvrage.

C'est un projet éminemment attendu par les Réunionnais. Les premiers travaux sont aujourd'hui lancés et visibles de tous, ce qui rend l'opération véritablement crédible aux yeux du grand public. Les enjeux aujourd'hui sont la bonne gestion de ces importants marchés et l'association des usagers de la route et des riverains au déroulement des travaux par un important volet de communication.

ABSTRACT

Project of the first section : Saint-Paul/RD10

Various authors

The first section of the "Route des Tamarins" extends over 6 km on the northern part of the project. It is made of a series of viaducts and underground structures (tunnels and a cut and cover) and therefore accounts for one third of the project cost. It splits into two different sequences : one, at sea-level, in the surroundings of Saint-Paul city center, the other, on a plateau overseeing the city, in a "savane" landscape not to be seen anywhere else in Reunion Island. In the present article, we review the historical development of the project, its technical and environmental constraints and the solutions that were brought about.

RESUMEN ESPAÑOL

Proyecto del tramo 1 : Saint-Paul/Carretera Departamental 10

Autores diversos

El primer tramo de la Carretera de los Tamarindos discurre por los 6 km ubicados más al norte del proyecto entre el centro urbano de la ciudad de Saint-Paul y la carretera departamental 10, denominada Carretera del Teatro. Sucesión de estructuras (viaductos, falso túnel, túnel), esta carretera supone una tercera parte del importe de la operación, que consta de dos secuencias perfectamente distintas, una sumamente urbana a nivel del mar en la parte baja de Saint-Paul, y otra que se inscribe en un paisaje de sabana en una meseta que domina la ciudad, única en La Reunión, siendo ambas puestas en comunicación por el viaducto de Saint-Paul, que corresponde a la estructura más importante de la carretera. Se recuerda en este artículo el historial de esta parte del proyecto, los imperativos técnicos y medioambientales así como las soluciones aportadas.

Section 2 : Saint-Paul - RD17

L'article présente une description générale de la deuxième section de la Route des Tamarins : Saint-Paul - RD10/l'Etang Salé - RD17. Après avoir rappelé le contexte et les enjeux, en matière de trafic notamment, l'auteur décrit rapidement le cadre géographique, humain et environnemental dans lequel s'inscrit cette section, et fait le point de l'attribution des marchés et de l'avancement des travaux.

■ PRÉSENTATION GÉNÉRALE

La section 2 : Saint-Paul - RD10/l'Etang Salé - RD17 s'étend sur une longueur de 27,7 km. L'origine de la section se situe à peu de chose près à l'intersection de la route avec la RD10 où elle se raccorde à la section 1, et son extrémité se situe au diffuseur de L'Etang Salé existant (RD17) où elle se raccorde à la déviation existante de L'Etang Salé, mise en service en 1996.

La section traverse, du nord au sud, les cinq communes suivantes :

- ◆ Saint-Paul ;
- ◆ Trois Bassins ;
- ◆ Saint-Leu ;
- ◆ Les Avirons ;
- ◆ L'Etang Salé.

■ SECTION COURANTE

La section 2 de la Route des Tamarins est une 2 x 2 voies, à chaussées séparées, avec statut de voie express sans carrefours ni accès riverains.

Les caractéristiques géométriques sont celles d'une voie de catégorie L2 de l'ICTAAL, correspondant à une vitesse de référence de 100 km/h.

La section courante comporte deux chaussées de 7,00 m, deux BAU de 2,50 m, un TPC de largeur variable intégrant deux BDG de 1,00 m et divers

dispositifs de retenues : glissière béton DBA, muret créole, ou glissières DE2. Entre les ravines de Trois Bassins et Grande Ravine, secteur où la pente transversale est importante, un profil en travers à chaussées décalées en altitude de 3 m a été retenu (figure 1).

Le tracé suit au mieux le terrain naturel, en fonction des contraintes locales (topographie, environnements naturel et humain) afin d'offrir la meilleure intégration possible dans le site. Les courbes de la route sont le plus souvent d'un rayon supérieur à 900 m et ne sont pas déversées. Le rayon minimum (déversé) est de 600 m en plusieurs points particuliers.

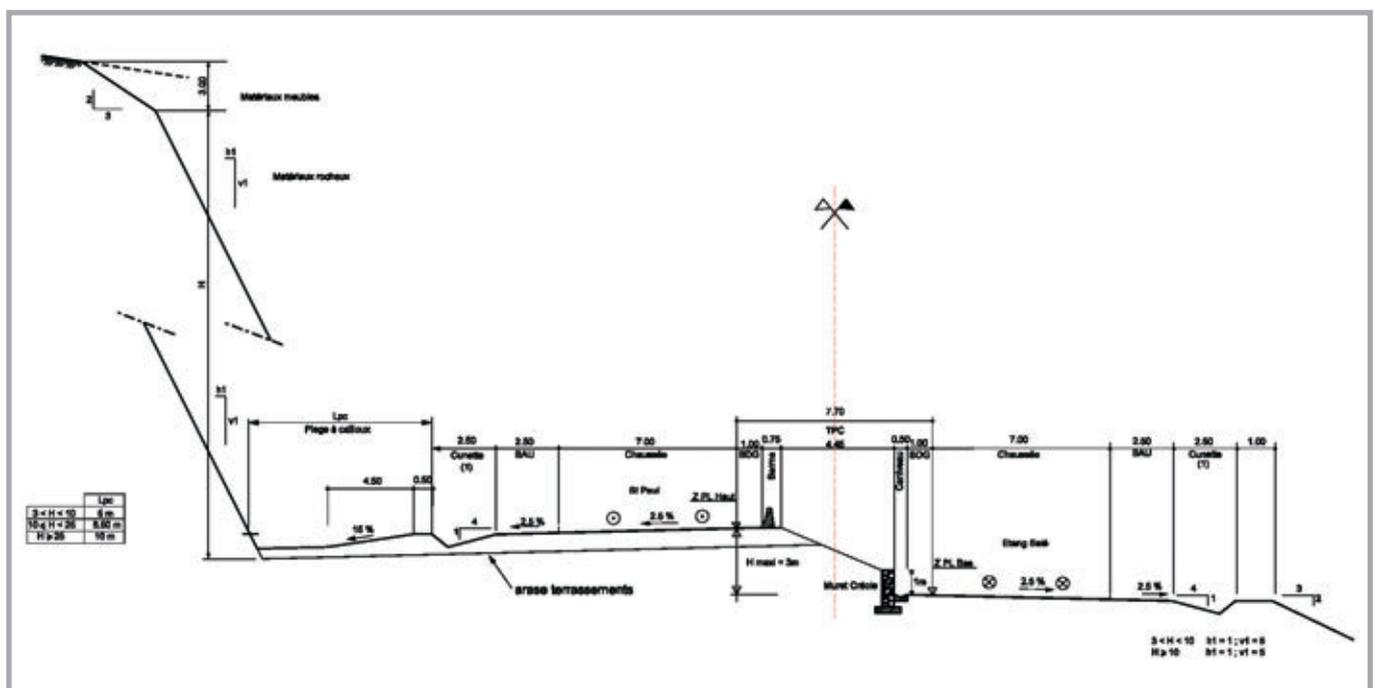
■ TRAFICS

Les études de trafics conduisent à prévoir sur la section 2 en 2020, horizon de l'étude, un trafic variant selon les sections de 65 000 à 40 000 uvp/h, la section la plus chargée étant celle située le plus au nord entre la RD10 et l'Hermitage (figure 2).

■ FONCIER, HABITAT

A partir de la ravine Saint-Gilles et jusque celle de Trois Bassins, la route se situe à une altitude de 220 à 310 m et traverse une zone agricole consa-

Figure 1
Profil en travers
chaussées
décalées
Cross section
of staggered
roadways



RD10 / L'Etang Salé -

Paul Barbier



DIRECTEUR DE PROJET
Scetauroute

créée essentiellement à la culture de la canne à sucre. Ensuite, entre la ravine de Trois Bassins et celle de Fontaine à Saint-Leu, la route s'accroche à flanc de pente, dans une zone naturelle et offre des vues somptueuses sur les zones littorales de Trois Bassins et de Saint-Leu.

Entre la ravine Fontaine et Piton Saint-Leu, la route des Tamarins traverse une zone d'habitat diffus sur les pentes urbanisées au-dessus de Saint-Leu. De nombreuses cases sont touchées et il a fallu monter plusieurs opérations de relogement (photo 1). De Piton Saint-Leu à l'extrémité du projet, la route parcourt de nouveau une zone agricole irriguée, puis après avoir franchi les ravines des Aviron et de Ruisseau, traverse la forêt domaniale de l'Etang Salé.

Les procédures foncières se sont révélées beaucoup plus complexes que ce qui était attendu. Il a fallu recourir de façon systématique à la procédure d'expropriation, non seulement pour les constructions et les terres agricoles, mais également pour les friches et broussailles.

En raison de l'attachement de la population réunionnaise à la terre héritée de leurs ancêtres, et de sa rareté due à la configuration particulière de l'île, le marché foncier est inexistant, et de ce fait, les agriculteurs expropriés n'ont pas, la plupart du temps la possibilité de racheter de nouvelles terres. La situation est encore plus difficile quand il s'agit de se reloger. Il est quasi impossible de trouver du terrain constructible permettant de reconstruire sa maison. Dans ces conditions, la Région a proposé aux familles expropriées de les reloger, en organisant des opérations de relogement spécifiques mobilisant d'une part les indemnités d'expropriations, et d'autre part divers financements complémentaires pour l'habitat social.

■ ÉCHANGEURS, RÉTABLISSEMENT DE COMMUNICATION

Six points d'échanges permettent de desservir la région traversée par la section 2 de la Route des Tamarins.

Le diffuseur de l'Hermitage raccordé à la voie de l'Hermitage (voie de liaison avec la RN1) est situé sur la commune de Saint-Paul. Il permet :

- ◆ de desservir directement la station balnéaire de Saint-Gilles-Les-Bains, et plus particulièrement les plages de l'Hermitage et de la Saline sans traverser le centre-ville de Saint-Gilles ;

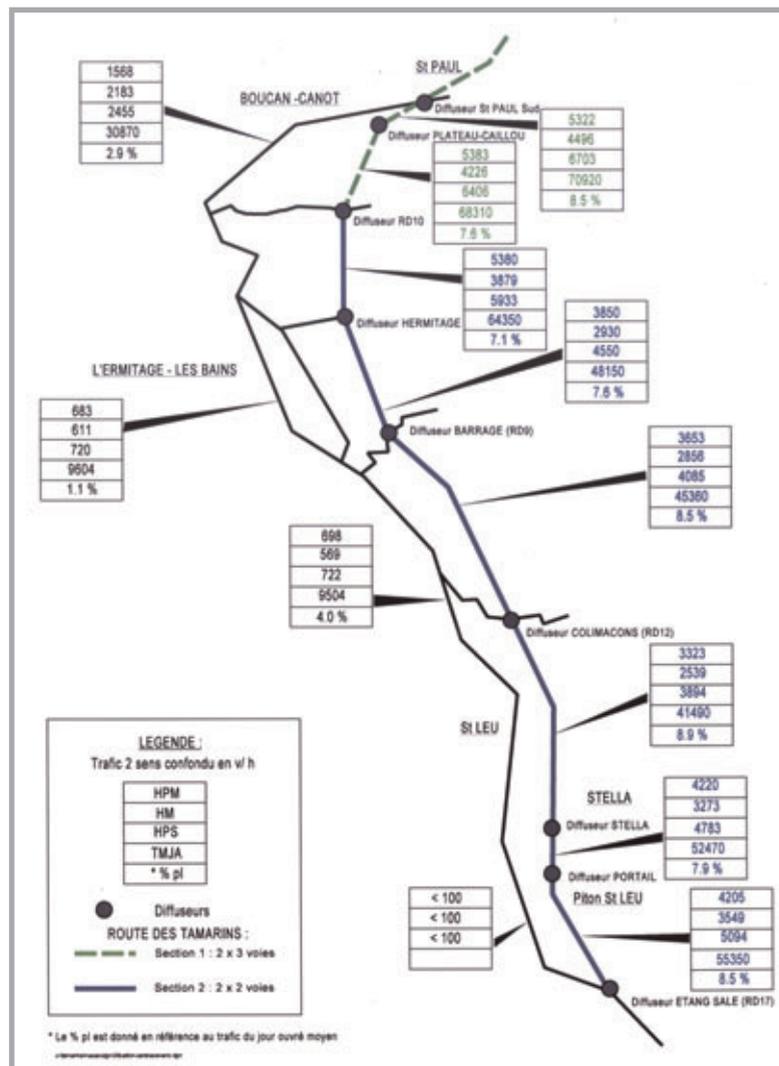


Photo 1
Opération de relogement à Piton Saint-Leu
Relocation operation at Piton Saint-Leu

Photo 2
Nouvelle "balance"
des Tamarins

New
Tamarins "balance"



vité. Ce diffuseur donnera également accès au futur centre d'entretien de la Route des Tamarins. Enfin, le diffuseur de L'Etang Salé (RD17), situé sur la commune du même nom, sera réaménagé afin de prendre en compte le raccordement de la Route des Tamarins à la déviation actuelle de L'Etang Salé.

La Route des Tamarins ayant le statut de route express, tous les rétablissements des communications : routes départementales, voies communales ou chemins d'exploitation agricole sont dénivelés et assurés par des ouvrages spécifiques, passages inférieurs de type cadre - PICF, portique - PIPO, ou voûte préfabriquée selon brevets Matière, ou des passages supérieurs en dalles précontraintes - PSDP.

■ SERVICES À L'USAGER

Deux aires de services sont prévues sur la section :

- ◆ un couple d'aires unilatérales à la Saline, accessibles uniquement depuis la Route des Tamarins ;
- ◆ une aire de service unilatérale au Portail, accessible par l'échangeur du même nom et également depuis l'extérieur.

Deux aires de repos sont également prévues, associées aux échangeurs de Trois Bassins : aire de Barrage, et de Stella. Ces aires sont également accessibles depuis le réseau local (figure 3).

■ MATÉRIAUX, TERRASSEMENTS

La géologie rencontrée par le projet est typique de celle des zones éruptives. Elle se caractérise par une multiplication de faciès lithologiques différents et d'épaisseurs variables, décimétriques ou métriques, appartenant à trois phases de coulées volcaniques du Piton des Neiges : phases II, III et IV.

Matériaux, terrassements, talus

Les principales formations rencontrées sont les suivantes :

- ◆ basaltes scoriacés ou vacuolaires compacts ;
- ◆ basaltes ou andésites massifs, très compacts, en coulées généralement bien continues de classe GTR R3 ;
- ◆ scories, avec une certaine cohésion à l'état naturel de classe GTR C2B5 à B5 après extraction ;
- ◆ paléosols constitués d'argiles plus ou moins sableuses, en bancs généralement continus de classe GTR A1 à B6 ;
- ◆ sables limoneux provenant de l'altération du rocher de classe GTR C2A1 à C2B5 ;
- ◆ sables basaltiques dunaires de classe GTR B5 à D1.

Les moyens d'extraction sont fonction essentiel-

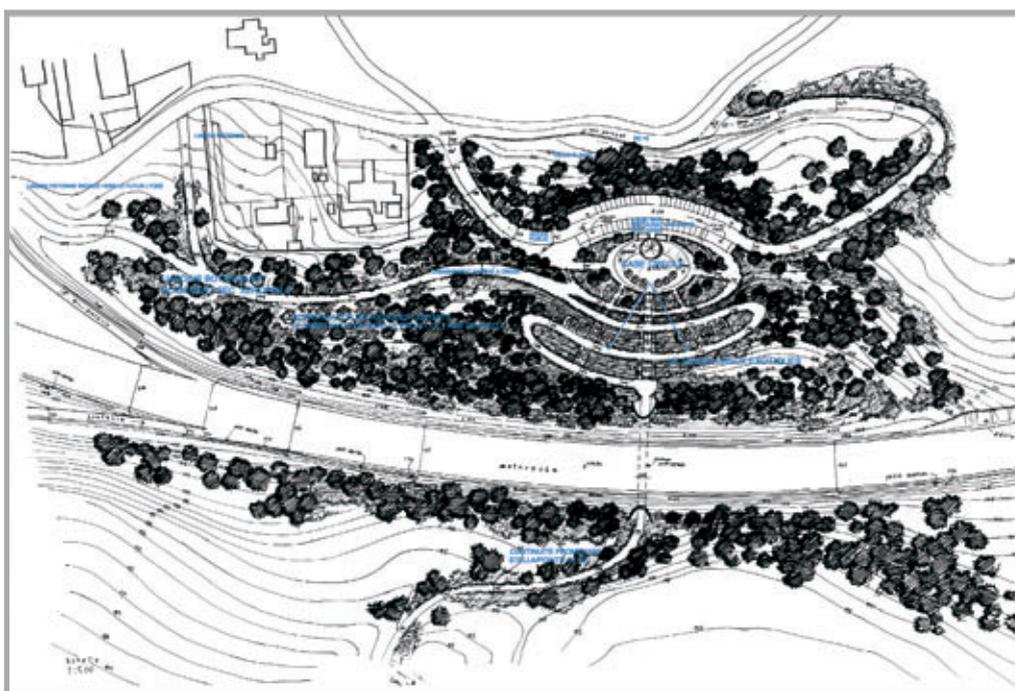


Figure 3
Plan masse
aire de Stella
*Layout plan
of the Stella area*

- ▶ ◆ de raccorder les zones agricoles du secteur de l'Hermitage et de la Saline à la Route des Tamarins, facilitant ainsi le transport des cannes à sucre vers les usines de transformation (photo 2). Le diffuseur du Barrage (RD9) assure le désenclavement des Hauts de la commune de Trois Bassins. Le diffuseur des Colimaçons, situé sur la commune de Saint-Leu, permet d'accéder au littoral et aux sites touristiques de montagne par l'intermédiaire de la RD12. Le demi-diffuseur de Stella, orienté vers le sud, situé sur la commune de Saint-Leu, dessert le centre de Saint-Leu ainsi qu'une zone d'habitations et touristique importante appelée le Grand Stella : musée de Stella Matutina, pointe au Sel. Le diffuseur de Portail, situé sur la commune de Saint-Leu, a pour fonction de desservir les quartiers de Piton Saint-Leu et une future zone d'acti-

lement de l'alternance des couches meubles et rocheuses et de leurs épaisseurs. Pour une réutilisation optimale des matériaux en remblais, une extraction frontale permettant un mélange des matériaux granulaires et rocheux est recommandée. Certaines dispositions constructives de type "remblais en noyau" seront nécessaires pour réutiliser les matériaux fins, en particulier les sables dunaires rencontrés à l'extrémité du projet.

Les basaltes compacts, se présentant en bancs métriques ou plurimétriques pourront nécessiter une extraction à l'explosif. Les matériaux correspondants peuvent être utilisés bruts en remblai, si la granulométrie obtenue à l'extraction le permet ($D < 500$ mm), ou être concassés pour fournir les matériaux sélectionnés nécessaires aux remblais contigus aux maçonneries ou les couches de forme.

Géométrie des talus

La pente des talus de remblais préconisée est de 3H/2V pour les talus de remblais constitués par les matériaux brut d'abattage 0/500.

La pente de talus de déblais est de 2H/1V dans les limons et les sables dunaires et de 3H/2V dans les matériaux meubles et altérés de surface (figure 4). Dans les matériaux rocheux, pour réduire les risques de chute de blocs sur la chaussée, une étude trajectographique a conduit à retenir les dispositions suivantes :

- ◆ talus : 1H/5V quelle que soit la hauteur ;
- ◆ réalisation de pièges à cailloux de largeur variable en fonction de la hauteur des talus et de sa position (talus amont ou aval).

■ HYDROGÉOLOGIE, HYDROLOGIE

Hydrogéologie

Les campagnes de sondages ainsi que les relevés piézométriques n'ont pas révélé de niveau ou de circulation d'eau. Néanmoins, lors de précipitations abondantes, des circulations temporaires aléatoires peuvent être abondantes au sein des massifs perméables (scories, basaltes fracturés, alluvions ou colluvions anciennes).

Hydrologie, hydraulique

L'île de la Réunion est située au cœur de l'océan Indien, en zone tropicale et est soumise à une pluviométrie intense en particulier lors des épisodes cycloniques. La Réunion détient les records mondiaux de pluviométrie sur 24 heures et sur l'année entière avec plus de 12 m de hauteur d'eau.

Cette pluviométrie importante a entraîné la formation de très nombreuses ravines qui pour certaines d'entre elles atteignent des dimensions

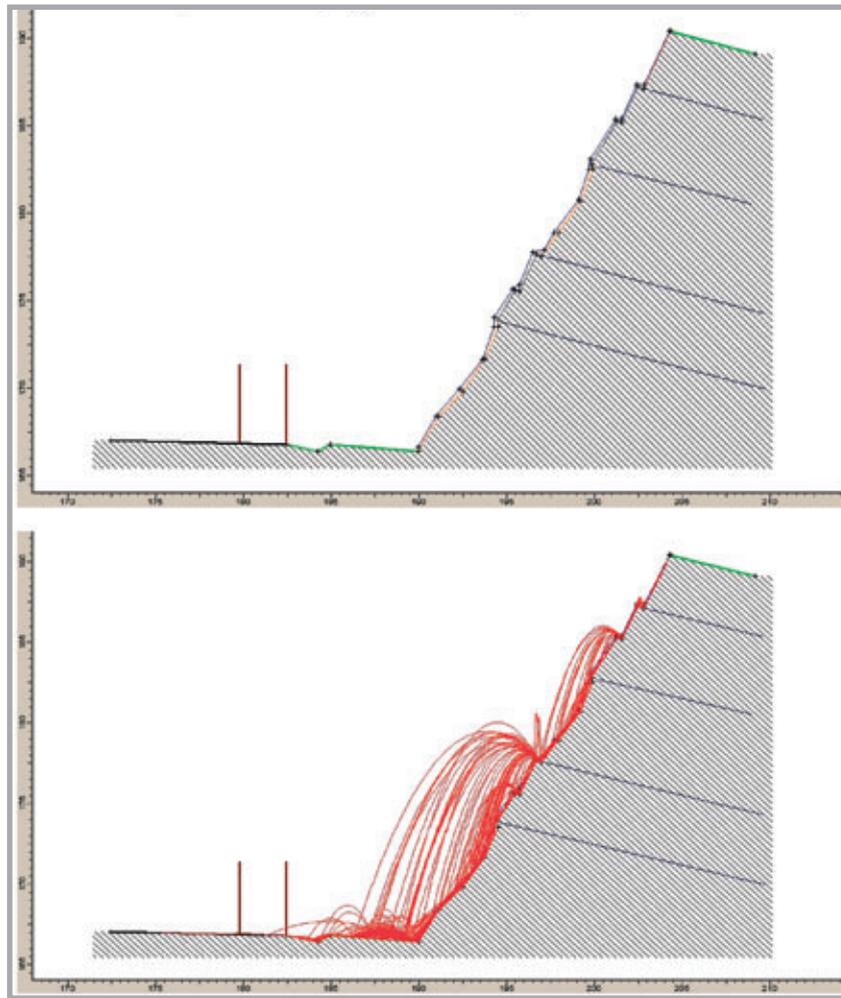


Figure 4
Etudes
de trajectographie
Trajectory
calculation studies

exceptionnelles. La Grande Ravine par exemple sur le territoire de la commune de Trois Bassins, atteint 500 m de large et une profondeur de plus de 200 m en son point le plus profond.

Le franchissement de ces ravines nécessite la réalisation de 18 ouvrages d'art non courants de longueur variant de 65 à 150 m (cf. article suivant) et de trois ouvrages exceptionnels :

- ◆ Ravine de Trois Bassins ;
- ◆ Grande Ravine ;
- ◆ Ravine Fontaine.

De très nombreux ouvrages hydrauliques permettent de franchir les ravines les moins importantes ou les simples talwegs (46 OH en 27 km pour la section 2, non compris les grands ouvrages).

Bien que la Route des Tamarins se situe dans l'ouest, zone relativement peu arrosée avec une moyenne annuelle de 600 à 1000 mm de pluies, elle n'est pas à l'abri de pluies exceptionnelles cycloniques et les ouvrages hydrauliques ont été dimensionnés en conséquence en fréquence centennale, selon la méthode préconisée par le "Guide d'estimation des crues à la Réunion".

La topographie impose pour ces ouvrages des contraintes particulières. La pente longitudinale de la ravine est souvent supérieure à 10 %, la plupart du temps comprise entre 15 et 20 %. Construire

Photo 3
Un ouvrage hydraulique
(brevet Matière)

*A hydraulic structure
(Matière patent)*



Photo 4
Contrats de cultures :
les serres en cours
d'installation

*Cropping contracts :
greenhouses
being installed*



les ouvrages parallèlement à la pente poserait des problèmes de stabilité et de vitesse d'écoulement des eaux en période de crues.

La pente longitudinale des ouvrages a été la plupart du temps adoucie à 8 % environ, ce qui entraîne la création de chutes et d'ouvrages d'entonnement à l'amont, tout en nécessitant à l'aval un ouvrage de dissipation d'énergie, de façon à éviter l'érosion à l'aval (photo 3).

■ PAYSAGE ET ENVIRONNEMENT

Paysage

Le paysage de la côte ouest est en train de changer rapidement du fait du développement rapide de l'urbanisation de la bande côtière d'une part, et de l'extension en cours des zones de culture de la canne à sucre, grâce au projet d'irrigation du littoral ouest d'autre part.

Le projet de la Route des Tamarins s'inscrit dans ce paysage évolutif.

Plusieurs types d'aménagement paysagers sont prévus :

- ◆ l'insertion aussi douce que possible dans les zones naturelles et qui sont destinées à le rester : le site inscrit de Ravine Saint-Gilles, les grandes pentes entre la Ravine Tabac et Petite Ravine. Cette insertion se fait par modelage et raccordement des talus aux versants naturels et mise en place d'une végétation arbustive ;

- ◆ la traversée des zones de culture de cannes par un modelé de terrain associant adoucissement de pentes permettant une remise en culture et andains ;

- ◆ un traitement plus urbain avec merlons de protection phonique et murs antibruit dans la traversée des Hauts de Saint-Leu et autour de la tranchée couverte de Piton Saint-Leu.

- ◆ une insertion par adoucissement des pentes de talus (2/1 limite de stabilité des sables dunaires, voire 3/1) et plantations arbustives dans la traversée de la forêt domaniale de l'Etang Salé.

Des contrats de cultures ont été passés à des pépiniéristes locaux, avec l'assistance de l'ONF et du CIRAD, pour la préparation des 750 000 plants nécessaires à la végétalisation des talus et emprises de la route.

La palette végétale a été discutée et mise au point avec les autorités et spécialistes locaux en la matière. Elle est composée à 75 % de végétaux d'espèces indigènes, mais ne comprend cependant aucune des espèces protégées dont la culture ou la reproduction sont interdites.

C'est la première fois sur l'île qu'une opération d'une telle ampleur sur des espèces indigènes arbustives est menée (photo 4).

Environnement

La Route des Tamarins se situe dans une zone où l'installation humaine et les activités associées ont appauvri tous les écosystèmes de l'île et plus particulièrement ceux de basse altitude. La présence d'espèces végétales et animales indigènes représente donc une valeur patrimoniale toute particulière.

Par ailleurs, le milieu marin littoral, exutoire des ravines constituant le réseau d'armature des écoulements naturels, est caractérisé par une bande de récifs coralliens sur environ 2/3 du linéaire, d'une richesse biologique et d'une valeur patrimoniale établies (photo 5).

Les études ont mis en évidence la prépondérance des enjeux écologiques des ravines vis-à-vis des planètes. Les ravines constituent, en effet :

- ◆ des secteurs favorables aux espèces patrimoniales floristiques et faunistiques, et particulièrement les remparts (ravines encaissées) et leurs abords ;

- ◆ des secteurs d'écoulements et d'accumulations plus ou moins pérennes d'eau, représentant un intérêt hydro-écologique potentiel.

Les enjeux et contraintes se localisent ainsi prin-

cipalement au droit des franchissements, mais également en aval. En effet, les ravines constituent le vecteur et le lieu de transition entre le milieu continental et le milieu marin, caractérisé par la présence d'un lagon d'une richesse très importante. Une douzaine de ravines ont ainsi été identifiées, sur la section 2, comme présentant un enjeu écologique important. Les choix de structure et de mode de construction des ouvrages de franchissement correspondants ont pris en compte les contraintes en résultant : l'absence de piles en ravine par exemple.

Cette situation ne doit toutefois pas occulter les enjeux également présents au droit du tracé sur les planèzes, au niveau par exemple :

- ◆ des îlots de végétation arborée et arbustive, localisés notamment au droit des ruptures de pente de la planèze, et dans lesquels l'intérêt floristique et la sensibilité de la faune est plus forte ;
- ◆ des zones de forêts basses abritant des espèces floristiques et faunistiques indigènes (ravine Tabac à ravine Fontaine, ravine des Poux à ravine du Cap et ravine du Trou à Etang Salé) ;
- ◆ des bassins versants des zones marines sensibles aux apports de MES, et notamment de part et d'autres des grandes ravines récifales, les zones agricoles et les secteurs de sols facilement érodables (photo 6).

Protection de la ressource en eau

Les nappes de la côte ouest et la nappe de Saint-Gilles, situées en aval du projet, sont définies comme stratégiques par le schéma directeur d'aménagements et de gestion des eaux de la Réunion (SDAGE). Elles représentent un fort potentiel pour l'alimentation en eau potable (AEP) des populations locales.

La protection de cette ressource est donc un enjeu primordial, particulièrement au droit des captages AEP. C'est la raison pour laquelle la Route des Tamarins est équipée sur toute sa longueur d'un réseau d'assainissement superficiel séparatif, recueillant uniquement les eaux des chaussées, et les conduisant vers 27 bassins de rétention et décantation, permettant de contrôler en quantité et qualité les rejets dans le milieu naturel.

Cadre de vie

La majorité des zones traversées sont restées agricoles ou naturelles. Toutefois, des enjeux urbanistiques (potentialités de croissance, liaison avec le littoral, développement balnéaire) et humains (lieux d'habitation, nuisances sonores, voies de communications...) sont rencontrés par endroit. Deux secteurs sont plus particulièrement touchés par la Route des Tamarins :

- ◆ l'école maternelle de Stella sur la commune de Saint-Leu, qu'il n'était pas possible d'éviter comp-



Photo 5
Vue sur le littoral
View of the coastline



Photo 6
Le tamarin
The Tamarin

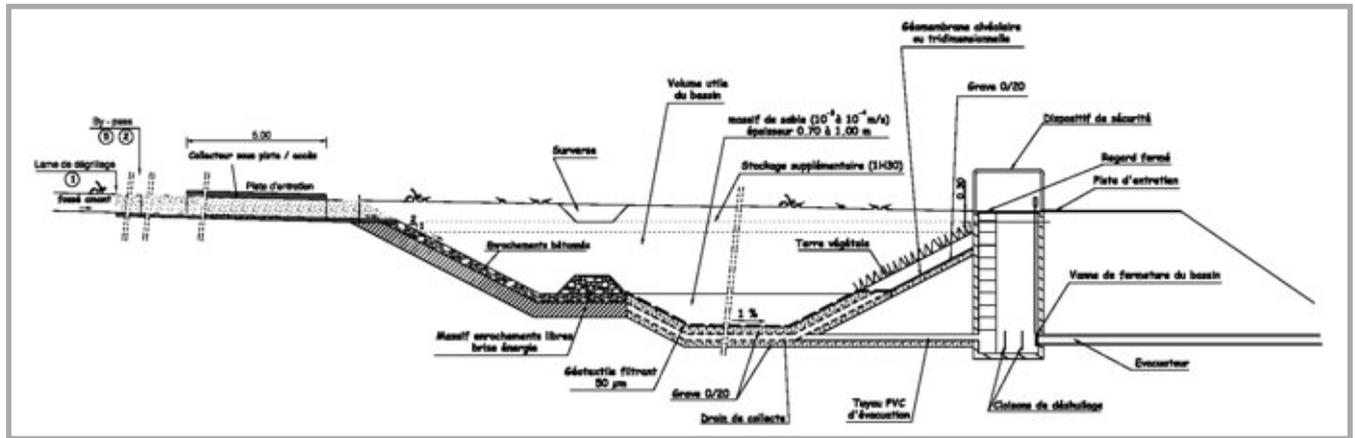
te tenu de la densité des constructions aux alentours et qu'il faut donc démolir et reconstruire ;

- ◆ les Hauts de Saint-Leu avec un certain nombre d'habitations touchées, en particulier au niveau de Piton Saint-Leu, quartier franchi en tranchée couverte, et qui a fait l'objet, à l'occasion, d'une opération de résorption d'habitat insalubre – RHI. Des merlons et écrans phoniques sont prévus pour protéger les habitations proches du tracé avec l'objectif de ramener le niveau de bruit sous les 60 dBa. Lorsque cela n'est pas possible, des protections de façades sont prévues.

Santé

L'île de la Réunion est située dans une zone, l'Afrique australe et l'océan Indien, où sont recensés 90 % des décès dus au paludisme dans le monde. Du

Figure 5
Coupe type d'un bassin de rétention
Typical cross section of a retention basin



Chantier de terrassement
Earthworks site



fait d'une surveillance épidémiologique et de la lutte antimoustique sur le terrain (traitement des points d'eau susceptibles d'être des gîtes d'anophèles arabiensis, moustique vecteur du paludisme) conduites par les autorités sanitaires, l'île est actuellement exempte de cette maladie.

Dans ces conditions, il est demandé par les autorités sanitaires que les nouveaux projets d'aménagement ne participent pas à la création de nouveaux gîtes propices au développement des moustiques (pièces d'eau stagnantes). Ceci a été pris en compte dans la conception des bassins de rétention, qui doivent se vider en 72 heures, durée trop courte pour permettre le cycle de reproduction du moustique (figure 5).

■ ALLOTISSEMENT ET TRAVAUX

Allotissement

L'allotissement retenu par le maître d'ouvrage pour les travaux de génie civil est le suivant :

- ◆ huit marchés de travaux préparatoires (de 1 à 1,5 M€ TTC chacun) consistant en réalisation de pistes d'accès au chantier, en rétablissement de communications : ouvrages et travaux de voirie, et en ouvrages hydrauliques ;
- ◆ quatre marchés TOARC (de 38 à 45 M€ TTC) associant terrassements – assainissement, rétablissement de communications, et ouvrages hydrauliques ;
- ◆ neuf marchés d'ouvrages d'art non courants (de 12 à 28 M€ TTC) regroupant le plus souvent deux ou trois ouvrages à structures identiques ;
- ◆ trois marchés pour les trois ouvrages exceptionnels ;
- ◆ deux marchés de chaussées et équipements linéaires de part et d'autre de l'ouvrage de Ravine Fontaine.

Etat d'avancement des travaux

A fin juillet 2005, l'état d'avancement du chantier est le suivant :

- ◆ les derniers marchés de travaux préparatoires se terminent ;

GROUPEMENTS D'ENTREPRISES ATTRIBUTAIRES

Travaux préparatoires

SAS, Matière, GTOI, SBTPC, Sogéa Réunion

TOARC 1 et 2

Eiffage TP (mandataire) - Razel - Matière

TOARC3

SBTPC (mandataire) - GTOI - Sogéa Construction

OANC1

Demathieu & Bard (mandataire) - GTOI

OANC2R

Razel (mandataire) - Eiffage TP - Matière - Eiffel

OANC5

Dodin (mandataire) - SBTPC - Vinci CGP

OANC6

ETPO (mandataire) - Pico OI

OANC7

Demathieu & Bard (mandataire) - GTOI

OANC8

SBTPC (mandataire) - Vinci CGP - Dodin

◆ les marchés TOARC 1 : RD10 - Ravine Trois Bassins, et TOARC2 : Ravine Trois Bassins - Ravine Fontaine ont été notifiés et les travaux sont commencés depuis avril 2005 pour le TOARC 1 et le début du mois pour le TOARC 2;

◆ le marché TOARC3 : Ravine Fontaine - Ravine du Portail vient d'être attribué, et la consultation pour le marché TOARC 4 de Ravine du Portail à l'extrémité du projet est en cours.

Sur les neuf marchés d'OANC, cinq ont été attribués et sont en cours de travaux. Ce sont :

◆ OANC1 : ravines de l'Hermitage, Bras de l'Hermitage et Cocâtre;

◆ OANC2 : ravines de Colimaçons, Bras Mouton et Chaloupe;

◆ OANC6 : ravine des Avirons et de Ruisseau;

◆ OANC7 : ravines de Bras Grande Ravine et Petite Ravine;

◆ OANC8 : tranchée couverte de Piton Saint-Leu.

Le marché OANC5 : ravines des Poux et du Cap vient d'être attribué.

Le marché OANC3 : ravines Saint-Gilles, Bras Saint-Gilles et Saline est en cours de consultation.

Les consultations pour les marchés OANC4 : ravine Tabac et OANC9 : ravine Grand Etang sont prévues avant la fin de l'année 2005.

La mise en service de la Route des Tamarins est actuellement prévue pour fin 2008 ou début 2009.

ORGANISATION DE LA MAÎTRISE D'ŒUVRE SCETAURROUTE

Direction de projet sur site

Scetauroute

Études générales

Scetauroute

Hydraulique

BCEOM Réunion

Paysage

Signes, Beture, MB Prudhomme

Ouvrages d'art

Scetauroute, Setec

Architecture OA

Charles Lavigne

Maquette virtuelle

Oktal

Direction de l'exécution des travaux

Scetauroute

ABSTRACT

Section 2 : Saint-Paul - county road RD10/L'Etang Salé - RD17

P. Barbier

The article gives a general description of the second section : Saint-Paul - L'Etang Salé of the "Route des Tamarins" on Reunion Island. The author describes the geographical, human and environmental context in which fits this section, and makes a point on the attribution of the contracts and the progress of the works

RESUMEN ESPAÑOL

Tramo 2 : Saint-Paul - Carretera Departamental 10/L'Etang Salé - Carretera Departamental 17

P. Barbier

En el presente artículo figura una descripción general del segundo tramo de la Carretera de los Tamarindos : Saint-Paul - Carretera Departamental 10/L'Etang Salé - Carretera Departamental 17. Después de haber presentado el contexto y los retos, en el aspecto del tráfico, fundamentalmente, el autor describe compendiosamente el marco geográfico, humano y medioambiental en el cual se inscribe este tramo, y saca las conclusiones acerca de la atribución de los contratos y sobre el avance de las obras.

Section 2 : Saint-Paul – RD10 / Ouvrages d'art non courants

L'article présente une description des ouvrages d'art non courants (OANC) de la deuxième section de la Route des Tamarins Saint-Paul – RD10 / L'Etang Salé – RD17. Après avoir rappelé les contextes géomorphologique des ravines, géotechnique, architectural et environnemental, l'auteur décrit sommairement l'ensemble des ouvrages et leur allotissement.

Sur l'ensemble de la section 2 (voir article précédent), trois catégories d'ouvrages d'art non courants sont recensées :

- ◆ ponts : le tracé retenu franchit 18 ravines de dimensions importantes pouvant dépasser la centaine de mètres, et considérées comme OANC au sens de la circulaire de 1994;
- ◆ tranchée couverte : de longueur inférieure à 300 m (220 m), cet ouvrage au droit de Piton Saint-Leu a été considéré comme un OANC car il constitue un point singulier sur la section 2;
- ◆ mur : un mur de soutènement de 22 m de hauteur, en remblai renforcé (de type Terre Armée) est prévu au niveau du diffuseur du barrage. Il est rappelé de plus, que les ouvrages de franchissement de trois ravines de dimensions exceptionnelles ont fait l'objet de concours de maîtrise d'œuvre particulière :
 - ◆ Ravine Trois Bassins : attribué au groupement Arcadis/Thales/Berlottier;
 - ◆ Grande Ravine : attribué au groupement Setec TPI/Spielman;
 - ◆ Ravine Fontaine : attribué au groupement Greisch/Tremblet/Coyne et Bellier/Seti/Zirk et Dezeuze.

PROFIL EN TRAVERS

Du fait de la multiplicité des ouvrages, de leur faible interdistances et de la faible longueur des ouvrages, il a été jugé préférable de conserver sur ouvrages le profil en travers de la section courante (figure 1) :

Les ouvrages sont donc constitués de deux tabliers

séparés, de 10,50 m de largeur utile chacun et bordés de barrière BN4 dans leurs rives extérieures, et d'une DBA côté intérieur.

CONTRAINTES ENVIRONNEMENTALES

Les études environnementales ont mis en évidence la prépondérance des enjeux écologiques des ravines vis-à-vis des planèzes. Les ravines constituent en effet :

- ◆ des secteurs favorables aux espèces patrimoniales floristiques et faunistiques, et particulièrement les remparts (ravines encaissées en U) et les abords;
 - ◆ des secteurs d'écoulements et d'accumulations plus ou moins pérennes d'eau, représentant un intérêt hydro-écologique potentiel.
- Les enjeux écologiques forts et les contraintes qui s'en déduisent ont largement influé sur le choix des ouvrages : avec ou sans appuis intermédiaires, ainsi que sur la position des appuis.

MORPHOLOGIE DES RAVINES

Si chaque ravine a sa propre morphologie, on peut néanmoins les regrouper en deux types principaux suivant le profil en travers de la topographie des sites : en U et en V. Ces deux types de morphologie ont guidé les grands principes de la conception des ouvrages :

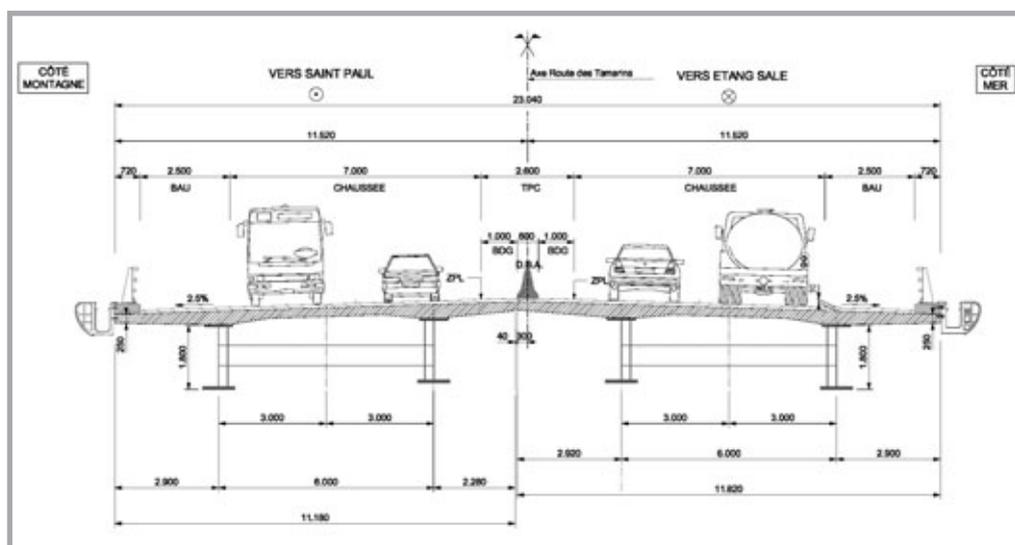
- ◆ pour les ravines en U : ouvrages "monotravée" en encorbellement de hauteur variable avec appuis en crête de rives (fonds inaccessibles);
- ◆ pour les ravines en V : ouvrages "multitravées" avec appuis en fond de ravine (hors lit mineur).

Morphologie en U

La première morphologie est une morphologie en U, dans laquelle la partie supérieure des rives apparaît très redressée et quasi subverticale. On constate que cette morphologie est généralement liée à la présence d'un ou plusieurs niveaux de basalte de forte épaisseur en crête (épaisseurs plurimétriques) (photo 1).

L'adoucissement de la pente des talus en partie inférieure de la ravine correspond, pour autant que la végétation permette d'en juger, à des formations d'éboulis ou à des alternances basaltes-scories en plus faible épaisseur unitaire. On notera aussi que

Figure 1
Coupe transversale fonctionnelle
Functional cross section



L'Etang Salé – RD17

Eric Barlet



CHEF DE PROJET OA
Scetauroute

les fonds de ravines inaccessibles sont souvent constitués par le bed-rock basaltique en affleurement.

Morphologie en V

La deuxième morphologie est une morphologie en V, avec des ravines plus ouvertes et des versants moins abrupts. Cette morphologie est probablement liée à la présence d'une plus grande proportion de formations scoriacées dans les alternances basaltes-scories formant le substratum sous une couverture d'altération et/ou d'éboulis de quelques mètres, ainsi qu'à l'absence des niveaux de grande épaisseur dans les basaltes qui favorisent la formation de falaises.

LE PARTI ARCHITECTURAL

Charles Lavigne, qui connaissait parfaitement la Réunion et le domaine des ouvrages d'art a défini les concepts architecturaux et a assisté en continu les équipes de conception.

Les structures

Les conditions de site des franchissements des ravines principales sont variables d'une ravine à l'autre. Cependant, un regroupement des ouvrages par familles a été recherché afin de dégager une unité d'expression technique et architecturale sur l'ensemble de la section.

Les ravines sont généralement encombrées par des éboulis et par une végétation dense de type arbustive et sont peu fréquentées par les promeneurs. Cependant, certaines ravines sont perceptibles depuis les agglomérations et routes transversales. Ceci a guidé le parti de conception architecturale vers une recherche de qualité et de sobriété formelle.

Le balayage des multiples techniques envisageables pour chaque ouvrage a permis de dégager deux grandes familles de solutions :

- ◆ les ouvrages à travées multiples à tablier en béton précontraint ou ossature mixte : cette solution est très majoritaire, on la rencontre sur une dizaine de ravines sur les dix-huit et c'est celle qui sera la plus représentative de l'image globale des ouvrages de la section. Elle pourra être traitée simplement avec des appuis à la géométrie bien lisible et elle est facilement adaptable aux différentes conditions de terrains.



Photo 1
Exemple de falaise subverticale en partie haute de versant de ravine en U

Example of subvertical cliff in the upper part of the ravine's U-slope



Photo 2
Photomontage de l'ouvrage monotravée sur la ravine des Colimaçons

Photomontage of the single-span structure over the Colimaçons ravine

Selon les portées déterminantes, le tablier peut être constitué de dalles pleines nervurées précontraintes, de caissons de hauteur constante ou d'une ossature mixte type bipoutre ;

- ◆ les ouvrages à travée unique de hauteur variable en béton précontraint : dans un certain nombre de cas, des solutions à travée unique, en caisson précontraint de hauteur variable ont été retenues.

Ce sont des ouvrages élégants et qui ne nécessitent aucun appui dans les ravines. Ils dégagent largement les vues sous l'ouvrage et sont bien adaptés aux lieux les plus vus, ainsi qu'aux contraintes environnementales (photo 2).

Les piles

L'unité architecturale des ouvrages multitravées s'exprime essentiellement par le choix d'un type de piles s'adaptant aux différentes solutions envisagées pour les tabliers : dalles pleines nervurées, caissons de hauteur constante ou ossature mixte de type bipoutre.

Les piles sont constituées d'un fût cylindrique par appui, de diamètre de 2,50 m ou 3,00 m selon les hauteurs de piles et s'évasant en tête pour former

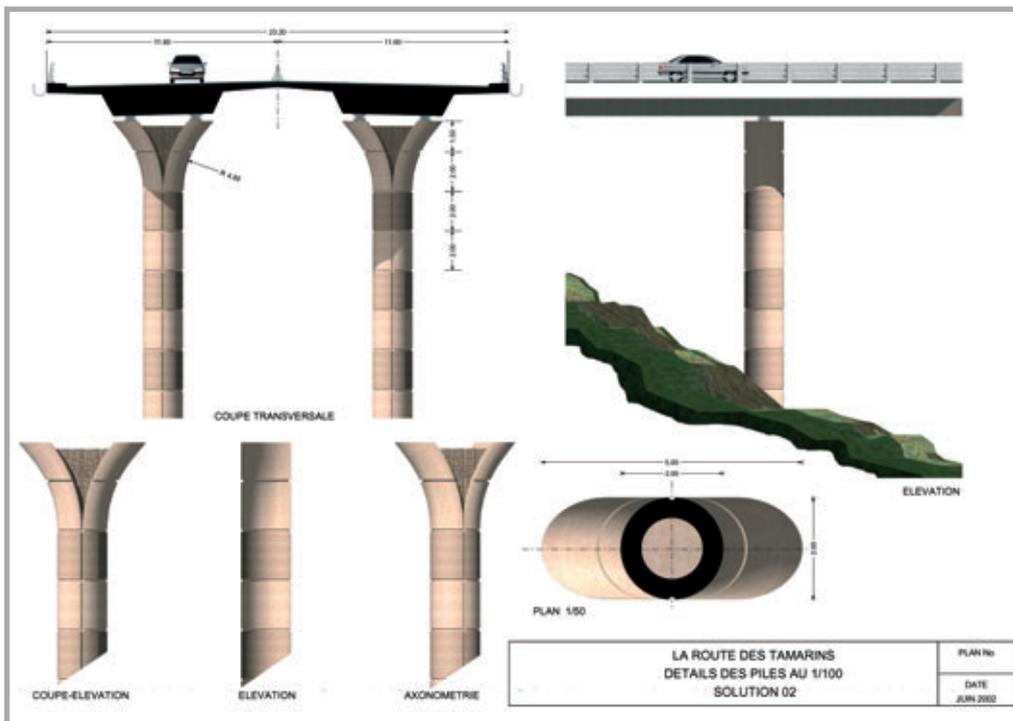


Figure 2
Etude architecturale
des piles

*Architectural design
of the piers*

le chevêtre. Celui-ci est de dimension variable selon l'entraxe des appareils d'appuis correspondant aux différentes solutions.

Les fûts de pile sont rythmés par une alternance d'anneaux de couleur et de texture différentes :

- ◆ béton clair à parement lisse obtenu par l'utilisation de coffrages métalliques ;
- ◆ béton plus foncé texturé obtenu simplement par désactivation superficielle du béton et lavage faisant ressortir la couleur foncée du granulat basaltique.

Cette alternance de couleur et de texture rappelle, de façon stylisée, les alternances de bancs rocheux basaltiques et de scories que l'on peut voir à l'état naturel sur les flancs des ravines ou sur les talus de la route (figure 2).

■ LES FONDATIONS

Cadre géologique général

La partie ouest de l'île sur laquelle s'inscrit le projet de la Route des Tamarins est constituée par les coulées des phases II, III ou IV du Piton des Neiges. Les formations volcaniques dans lesquelles l'érosion a entaillé les ravines sont constituées d'empilement de coulées successives de basaltes massifs alternant avec des niveaux scoriacés.

La direction générale des coulées est sensiblement N 240° E à N 250° E avec une pente générale des structures plus ou moins marquée, mais pouvant atteindre 20° à 25° sur certains sites d'ouvrages. Compte tenu de la direction de la Route des Tamarins, ce pendage se retrouve sur les zones d'appui, entraînant à une cote donnée, des conditions sensiblement différentes suivant une direction transversale entre le côté amont et le côté aval de la fondation.

Les niveaux de basalte, d'épaisseurs très variables, métriques à plurimétriques, présentent une frac-

turation naturelle liée au retrait lors du refroidissement des coulées. Cette fracturation est grossièrement orthogonale au banc de basalte, ce qui explique que les pendages relevés soient plutôt subverticaux et/ou pentés vers l'amont de la coulée à 60°/80°.

Les niveaux scoriacés qui constituent en général les semelles des coulées basaltiques, peuvent présenter, eux aussi, des épaisseurs très variables. Toutefois, du fait de leur genèse, les très fortes épaisseurs, comme l'on en trouve parfois dans les basaltes, dues à des remplissages de dépressions topographiques lors des coulées, sont a priori beaucoup plus rares, sinon totalement absentes. La compacité et la porosité de ces niveaux scoriacés sont très variables ; néanmoins in situ la "cimentation" au contact entre les blocs élémentaires dont ces niveaux scoriacés sont constitués, leur confère en général une cohésion loin d'être négligeable, même si ces niveaux peuvent sembler friables. Le fait de les assimiler systématiquement à des sols doués de peu de cohésion est certainement très pénalisant.

La présence possible de tunnels de lave (notamment dans le secteur de Saint-Gilles) constitue par ailleurs un risque qu'il convient de prendre en considération (photo 3).

Reconnaisances

Deux campagnes de reconnaissances géologiques et géotechniques ont été réalisées par le maître d'ouvrage :

- ◆ la première campagne : celle-ci s'est déroulée, dans le cadre des études d'AVP, de février 2002 à mai 2002. Compte tenu des réelles difficultés d'accès en fond de ravines, elle ne comprenait que des sondages au niveau des culées des ouvrages. Il s'agissait alors essentiellement de définir les premières préconisations permettant d'orienter le choix des structures ;

- ◆ la seconde campagne : elle s'est déroulée de novembre 2002 à août 2003, dans le cadre de l'étude du projet. Ces reconnaissances comprenaient :
 - des sondages destructifs avec ou sans essais pressiométriques et des sondages carottés, essentiellement au droit des piles,
 - des imageries de parois,
 - des inspections de falaises.

Les résultats de ces campagnes de sondages confirment l'extrême variabilité des différents faciès rencontrés. Les corrélations entre deux sondages voisins de quelques mètres ne sont pas faciles et de toute évidence ne permettent pas d'extrapoler les résultats obtenus à l'ensemble du volume concerné par un appui. Dans ces conditions, le principe retenu pour les fondations des ouvrages au niveau du projet est celui de fondations superficielles sur une assise homogène constituée :

- ◆ soit du sol rocheux en place ;

◆ soit, si le fond de fouille est hétérogène, alternance de banc rocheux et de scories, par purge des scories et comblement en gros béton ;

◆ soit, si le fond de fouille est entièrement constitué de scories, par une substitution de ces scories par du matériau sélectionné, en fait le matériau rocheux du site concassé.

A l'ouverture des fouilles une campagne de reconnaissances complémentaires des fonds de fouilles est prévue (cinq sondages destructifs et des essais pressiométriques par appui) de façon à valider ou corriger les hypothèses d'études.

Pour les appuis des culées en tête des ravines, un recul de 5 à 10 m par rapport aux bords des ravines sera nécessaire pour assurer la stabilité du massif de fondation.

A l'exception des culées (notamment rive gauche) de l'OA 308 ravine du Ruisseau qui se situent dans les sables, tous les appuis des ouvrages sont fondés sur ce gigantesque millefeuille constitué d'alternances aléatoires de bancs rocheux basaltiques et de scories.

■ LA STANDARDISATION DES STRUCTURES

Les structures finalement retenues sont des structures classiques, éprouvées et bien adaptées à La Réunion, avec la meilleure intégration possible dans le site, sans chercher à concurrencer les ouvrages exceptionnels.

Les différents types de structures retenues sont ainsi :

◆ la dalle en béton précontraint à nervures larges ;

◆ le bipoutre mixte de hauteur constante : ouvrages multi-travées et/ou monotravée (Bras Mouton et Saline) ;

◆ le caisson en béton précontraint de hauteur variable : ouvrages "monotravées" à travées de rives d'équilibrage.

Les solutions de type caisson précontraint de hauteur constante avaient été envisagées dans un premier temps en lieu et place des bipoutres mixtes. Les premiers appels d'offres ont montré que les structures à ossature mixte étaient plus économiques, malgré la hausse récente du prix de l'acier et du fret maritime.

■ DESCRIPTION SOMMAIRE DES OUVRAGES

Ravine Saint-Gilles - OA 54

Le site : brèche en V évasé, légèrement dissymétrique, de largeur 110 m environ et de profondeur 22 m.

Contraintes environnementales : le site de la ravine Saint-Gilles est inscrit à l'inventaire des sites



Photo 3
Tunnel de lave découvert lors des travaux (juillet 2005) sous la tranchée couverte de Piton Saint-Leu

Lava tunnel discovered during works (July 2005) under the Piton Saint-Leu cut-and-cover



Photo 4
Ravine Saint-Gilles : pont à béquilles - Solution non retenue

Saint-Gilles Ravine : Portal bridge - Solution not adopted

de la Réunion. Il comprend une Znieff de type I, et est situé dans le périmètre de protection des captages AEP situés immédiatement à l'aval.

Le débit de la crue centennale est important : 582 m³/s ce qui correspond à une hauteur de crue de 4 m sur une largeur de 40 m environ (photo 4). Compte tenu de sa situation en site inscrit, l'ouvrage a fait l'objet au stade de l'EPOA d'une recherche de différentes structures possibles : trois travées caisson précontraint de hauteur constante, ossature mixte, pont à béquilles, pont en arc... A la demande du Service départemental de l'Architecture et du Patrimoine, c'est finalement la plus discrète qui est retenue : un trois travées en ossature mixte de 112 m de longueur.

Ravine Bras Saint-Gilles - OA 63

Le site : brèche en V très évasé, légèrement dissymétrique, de largeur 200 m environ et de profondeur 25 m.

Contraintes environnementales : pas de contrainte particulière de protection de l'environnement. Débit de crue très faible : 14 m³/s.

L'ouvrage retenu est un quatre travées de 150 m de longueur en ossature mixte.

Photo 5
Etalement OA82
OA82 propping

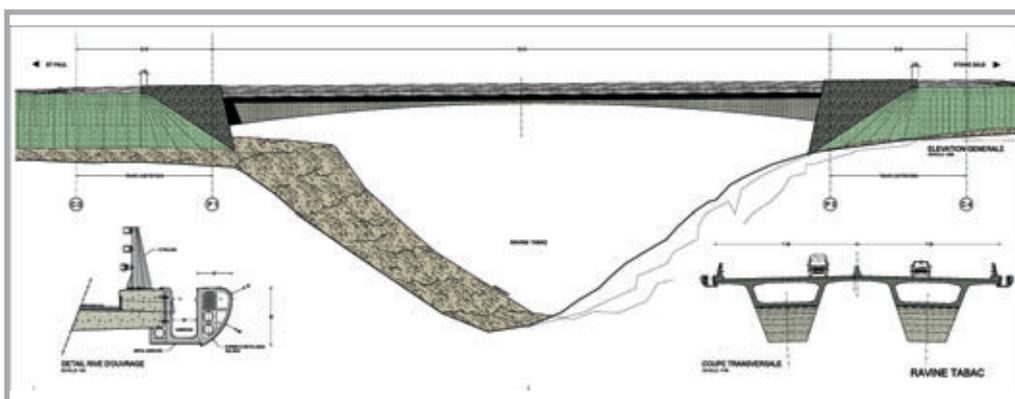


Figure 3
Ravine Tabac -
Etude architecturale
Ravine Tabac -
Architectural design

Ravine de l'Hermitage - OA 82

Le site : brèche en V évasé, dissymétrique, de largeur 80 m environ et de profondeur 14 m.

Contraintes environnementales : zone de protection du captage de l'Hermitage situé à l'aval. Ouverture hydraulique de 27 m à réserver. L'ouvrage retenu est un trois travées en dalles nervurées de 80 m de longueur (photo 5).

Ravine Bras de l'Hermitage - OA 89

Le site : brèche en V presque symétrique très évasé, de largeur 100 m environ et de profondeur 12 m.

Contraintes environnementales : zone de protection du captage de l'Hermitage situé à l'aval. Ouverture hydraulique de 20 m à réserver. L'ouvrage retenu est un trois travées en dalles nervurées de 60 m de longueur.

Ravine de la Saline - OA 100

Le site : brèche en V dissymétrique avec des pentes relativement fortes (pente moyenne de 30° en rive droite et 40° en rive gauche), de largeur 70 m environ et de profondeur 25 m.

Contraintes environnementales : présence de flore indigène rare.

Débit hydraulique relativement important, de l'ordre de 100 m³/s.

Compte tenu des conditions de site (versant très pentu) et de la présence d'une flore à protéger, il n'était pas possible d'envisager d'implanter des appuis sur les flancs de la ravine et le choix s'est donc porté sur un ouvrage de type bipoutre monotravée isostatique de 76 m de longueur.

Ravine Tabac - OA 118

Le site : brèche en U symétrique de pentes relativement élevées, de largeur 90 m environ et de profondeur 36 m.

Contraintes environnementales : zone de protection du forage de la Saline.

Débit de crue : 112 m³/s, ouverture minimum hydraulique de 30 m à réserver.

Comme pour l'ouvrage précédent les conditions de site ont conduit à considérer qu'il n'était pas réaliste d'implanter des appuis intermédiaires sur les versants très pentus de la ravine. La structure retenue est un monotravée en caisson précontraint à inertie variable de 100 m de portée (plus travées massives d'équilibrage) (figure 3).

Ravine de Bras Grande Ravine - OA 146

Le site : brèche en V symétrique évasée, de largeur 100 m environ et de profondeur 25 m.

Contraintes environnementales : l'ouvrage se situe dans la zone "verte" à espèces indigènes. Zone de surveillance renforcée et périmètre de protection éloignée du forage Blanchard, enveloppe de prévention des puits de Grande Ravine.

Largeur hydraulique à préserver : environ 30 m.

L'ouvrage retenu est un trois travées à ossature mixte de 110 m de longueur.

Ravine de Cocâtre - OA 155

Le site : brèche en V dissymétrique aux pentes relativement fortes, de largeur 80 m environ et de profondeur 25 m.

Contraintes environnementales : zone de surveillance renforcée et périmètre de protection éloignée du forage fond jardin.

Débit de crue : 150 m³/s, ouverture hydraulique minimum à prévoir : 30 m.

L'ouvrage retenu est un trois travées en dalles nervurées de 70 m de longueur.

Petite Ravine - OA 163

Le site : brèche en V très dissymétrique, de largeur 105 m environ et de profondeur 32 m.

Contraintes environnementales : la ravine se trouve dans une zone "verte" à espèces indigènes et endémiques. Projet de site inscrit. Enveloppe de

prévention, zone de surveillance renforcée et périmètre de protection rapprochée des forages Petite Ravine et Fond Petit Louis.

La largeur hydraulique à dégager est de 40 m pour un débit de crue de 150 m³/s.

La configuration du site permet d'envisager l'implantation d'une pile en pied du versant rive droite, avec cependant l'impossibilité d'y accéder par piste de chantier du fait de la raideur des versants et de la présence de flore endémique à préserver. L'ouvrage retenu est un deux travées à ossature mixte de 120 m de longueur. Le marché prévoit l'interdiction de créer une piste d'accès à la pile centrale, ce qui oblige à la construire à la grue depuis l'une des rives (figure 4).

Ravine des Colimaçons - OA 183

Le site : brèche en U, de largeur 100 m environ et de profondeur 40 m.

Contraintes environnementales : Znieff type I, espèces rares et protégées à proximité immédiate. Enveloppe de prévention du puits des Colimaçons. Débit de crue important : 320 m³/s et transport solide conséquent révélé par la présence d'énormes blocs jalonnant le fond de la ravine.

L'ouvrage retenu est un monotravée en caisson précontraint à inertie variable de 100 m d'ouverture.

Ravine de la Chaloupe - OA 189

Le site : brèche en U dissymétrique, avec une barre rocheuse plus ou moins épaisse (de 10 à 25 m) en crête, de largeur 100 m environ (au niveau du profil en long) et de profondeur 42 m.

Contraintes environnementales : Znieff type I, espèces rares et protégées identifiées de part et d'autre du tracé. Avifaune protégée et sensible.

L'ouvrage retenu est strictement identique à celui prévu pour la ravine des Colimaçons : monotravée en caisson précontraint à inertie variable de 100 m d'ouverture (figure 5).

Ravine de Grand Etang - OA 204

Le site : brèche en V symétrique avec des pentes relativement élevées (environ 50° en rive droite et 40° en rive gauche), qui s'élargit rapidement de l'amont à l'aval : largeur 72 m pour l'ouvrage amont et 85 m pour l'ouvrage aval. La profondeur à l'axe de l'ouvrage est de 35 m.

Contraintes environnementales : présence d'espèces de la flore locale indigène.

Débit de crue important : 186 m³/s pour une largeur de lit mineur de 18 m. Traces de charriage de blocs importants, d'où le choix d'une structure sans appui dans la ravine.

Compte tenu de la différence marquée entre les

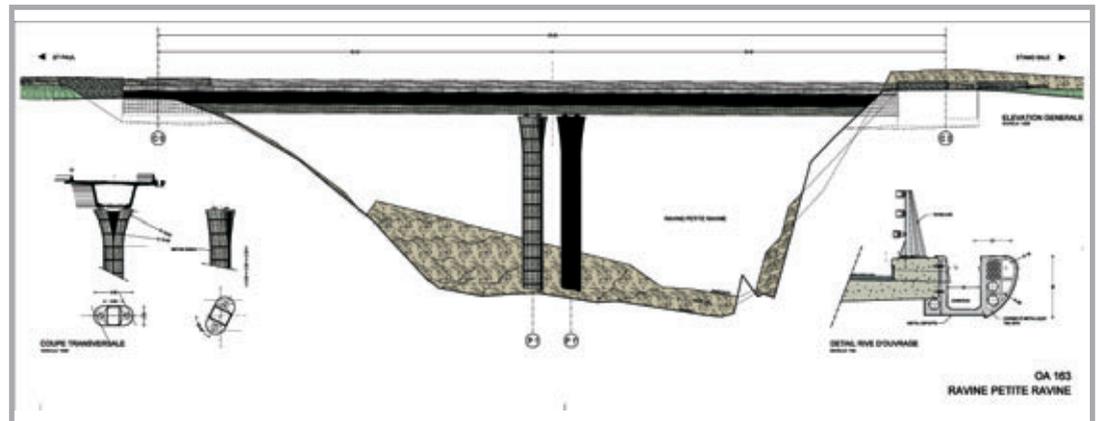


Figure 4
Petite Ravine - Etude architecturale : caisson BP poussé - Solution non retenue
Petite Ravine - Architectural design : Pushed prestressed concrete box girder - Solution not adopted

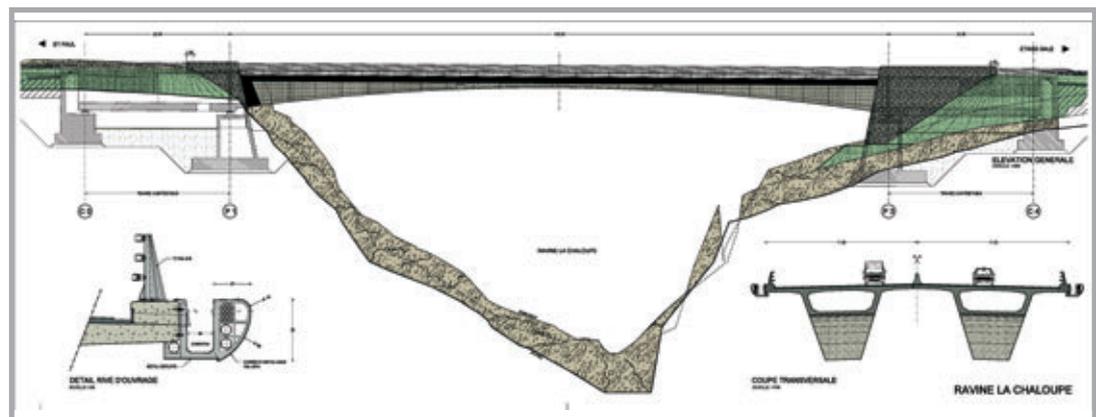


Figure 5
Ravine de la Chaloupe - Etude architecturale
Ravine de La Chaloupe - Architectural design

sites amont et aval, l'ouvrage retenu est formé de deux ouvrages monotravées en caisson précontraint à inertie variable de 76 m d'ouverture pour l'ouvrage amont et 92 m pour l'ouvrage aval.

Les dispositions adoptées, à savoir le recul des culées du tablier aval de 8 m exactement, soit deux voussoirs, de façon symétrique devrait rendre totalement imperceptible la différence de longueur de chacun des deux ouvrages.

Ravine de Petit Etang - OA 208

Le site : brèche en V pratiquement symétrique de pentes relativement élevées (entre 30 et 40 °) de largeur 75 m environ et de profondeur 23 m sur l'axe, s'élargissant d'amont en aval.

Contraintes environnementales : présence d'espèces (flore) protégées.

Débit de crue : 77 m³/s. Ouverture hydraulique minimum de 20 m à réserver.

L'ouvrage retenu est un trois travées de 60 m de longueur, en dalles nervurées.

Ravine des Poux - OA 216

Le site : brèche en V dissymétrique, avec un versant rive gauche très pentu. La largeur de la brèche est de 65 m et la profondeur 27 m. Présence d'éboulis en fond de ravine.

Contraintes environnementales : Znieff de type II

Photo 6
Ravine des Poux :
 étude architecturale
 (écrans acoustiques)

Ravine des Poux :
 Architectural design
 (noise barriers)



Photo 7
Ravine des Avirons -
 Réalisation des fouilles
 des culées

Ravine des Avirons -
 Execution of abutment
 excavations



► à l'aval, espèces de la flore indigène dans le lit de la ravine.
 L'ouvrage retenu est un monotravée en caisson précontraint à inertie variable de 68 m d'ouverture (photo 6).

Ravine du Cap - OA 225

Le site : brèche en U dissymétrique, avec un versant rive droite très abrupt, pratiquement vertical sur 15 m de hauteur. Présence d'éboulis, blocs de grandes dimensions au pied de la paroi. La largeur de la brèche est de 80 m et la profondeur de 30 m environ.

Contraintes environnementales : espèces de la flore indigène dans le lit de la ravine. Bien que non protégées, ces espèces jouent un intérêt important du fait de la destruction progressive des milieux les abritant.

L'ouvrage retenu est un monotravée en caisson précontraint à inertie variable de 84 m d'ouverture.

Ravine du Trou - OA 290

Le site : brèche en V à fond plat, dissymétrique avec une pente moyenne de 45 ° en rive gauche et de 25° en rive droite. La largeur de la brèche est de 100 m environ et la profondeur 30 m. Un chaos de blocs occupe le fond de ravin, certains pouvant atteindre plusieurs dizaines de mètres cubes.

Contraintes environnementales : présence d'espèces de la flore indigène dans le lit de la ravine. Le site est assujéti à la "loi littoral", et fait l'objet d'un projet de site inscrit.

L'ouvrage retenu est un ouvrage à trois travées, en dalles nervurées.

Ravine des Avirons - OA 306

Le site : brèche en V ouvert à fond plat relativement symétrique, de largeur 140 m environ et de profondeur 38 m.

Contraintes environnementales : l'ouvrage se trouve dans une zone riche en espèces indigènes (Znieff de type I), dans le périmètre de protection "loi littoral".

L'ouvrage retenu est un ouvrage à trois travées, en ossature mixte mise en place par poussage, de 148 m de longueur (photo 7).

Ravine de Ruisseau - OA 308

Le site : brèche en V ouvert et dissymétrique (pente moyenne de 18° en rive droite et de 26° en rive gauche), de largeur 130 m environ et de profondeur 27 m.

Contraintes environnementales : faibles. Le site est cependant assujéti à la "loi littoral" et fait l'objet d'un projet de site inscrit.

L'ouvrage retenu est un ouvrage à trois travées, en ossature mixte mise en place par poussage, de 115 m de longueur.

Particularité à signaler pour cet ouvrage : la culée rive gauche se situe sur du sable dunaire perché au-dessus du socle basaltique sur une épaisseur d'une dizaine de mètres. Cette formation s'étend jusque l'Etang Salé et est recouverte par la forêt domaniale éponyme. Pour asseoir convenablement la culée, ce sable sera purgé et une assise de substitution sera réalisée avec du matériau basaltique du site.

■ L'ALLOTISSEMENT

On rappelle que les caractéristiques géométriques des ravines (largeur, profondeur, raideur des versants, présence de remparts) et la possibilité ou non d'y implanter des piles intermédiaires dans le respect des contraintes d'environnement ont conduit à proposer plusieurs types d'ouvrages pour le franchissement de ces ravines :

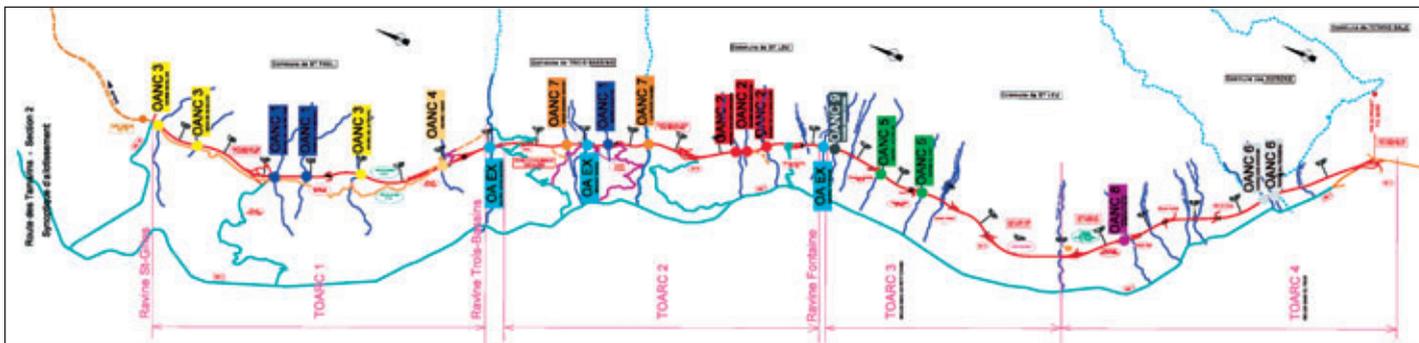


Figure 6
Synoptique de l'allotissement
Block diagram of breakdown into work sections

- ◆ les ponts à tablier en dalles nervurées de portées principales de 25 à 30 m ;
- ◆ les ponts de type bipoutre mixte, de portées principales de 42 à 60 m ;
- ◆ les ponts monotravées en caissons à inertie variable pour franchir les ravines sans appuis intermédiaires, avec des portées de 60 à 100 m.

L'allotissement doit permettre de concilier les deux objectifs principaux du maître d'ouvrage :

- ◆ le respect des délais ;
 - ◆ la recherche de l'optimum économique, tout en prenant en considération les contraintes suivantes :
- la standardisation des ouvrages par familles,
 - les difficultés d'accès en de nombreux sites du chantier,
 - la procédure "loi sur l'eau",
 - le délai nécessaire aux acquisitions foncières.

Ainsi, les 18 OANC d'un montant global d'environ 150 millions d'euros se répartissent ainsi en :

- ◆ deux lots de trois ouvrages : dalles nervurées d'une part et ossature mixte d'autre part ;
 - ◆ quatre lots de deux ouvrages : deux lots d'ossatures mixtes et deux lots d'ouvrages monotravées ;
 - ◆ deux ouvrages monotravées font l'objet de consultations séparées, essentiellement pour des raisons de planning ;
 - ◆ deux ouvrages ont été intégrés dans les TOARC.
- Le synoptique ci-dessous permet de visualiser l'allotissement adopté (figure 6).
La figure 7 présente les principales caractéristiques des ouvrages, et leur allotissement.

| N° OA | Ravines Nom | PK | Communes | Lot | | | | | | | Ouvrage | | | Longueur | Ht pile |
|---------------------|--------------------------|------------|---------------------|-----|---|---|---|--------|---|-------------|-----------------------|-------------------|----|----------|------------|
| | | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | Type / Travure | BP | | |
| | | | | | | | | | | Date Pleine | Bipoutre mixte h-cste | Caisson BP | | | |
| 54 | St Gilles | 5 391,729 | St Paul | | X | | | | | | | 24 / 42 / 24 | | 90 | 11, 13 |
| 63 | Bras St Gilles | 6 332,547 | St Paul | | X | | | | | | | 30 / 45 / 45 / 30 | | 150 | 18, 21, 15 |
| 82 | Hermitage | 8 178,102 | St Paul | X | | | | | | | | 25 / 30 / 25 | | 80 | 13, 12 |
| 89 | Bras de l'Hermitage | 8 896,721 | St Paul | X | | | | | | | | 17,5 / 25 / 17,5 | | 60 | 9, 9 |
| 100 | La Saine | 10 039,614 | St Paul | | X | | | | | | | 76 | | 76 | |
| 118 | Varco | 11 836,154 | St Paul | | | X | | | | | | 100 | | 100 | |
| Excep Trois Bassins | | | St Paul / 3 Bassins | | | | | | | | | | | | |
| 146 | Bras de la Grande Ravine | 14 604,115 | 3 Bassins | | | X | | | | | | 32,5 / 45 / 32,5 | | 110 | 18, 18 |
| Excep Grande Ravine | | | 3 Bassins | | | | | | | | | | | | |
| 155 | Cocône | 15 521,621 | 3 Bassins | X | | | | | | | | 20 / 30 / 20 | | 70 | 10, 12 |
| 163 | Petite Ravine | 16 345,750 | 3 Bassins / St Leu | | | X | | | | | | 60 / 60 | | 120 | 32 |
| 183 | Arbrazons | 18 347,571 | St Leu | | X | | | | | | | 100 | | 100 | |
| 185 | Bras Mouton | 18 504,075 | St Leu | | X | | | | | | | 60 | | 60 | |
| 189 | Arbrazons | 18 914,726 | St Leu | | X | | | | | | | 100 | | 100 | |
| Excep Fontaine | | | St Leu | | | | | | | | | | | | |
| 204 | Grande Ravine | 20 422,054 | St Leu | | | | X | | | | | 100 | | 92 | |
| 208 | Petit Etang | 20 835,377 | St Leu | | | | | TOARC3 | | | | 19 / 32 / 19 | | 70 | 18, 16 |
| 215 | Les Poux | 21 572,454 | St Leu | | | X | | | | | | 76 | | 76 | |
| 225 | Su Cap | 22 547,613 | St Leu | | | X | | | | | | 84 | | 84 | |
| 290 | Le Trou | 28 991,465 | St Leu | | | | | TOARC4 | | | | 25 / 35 / 25 | | 85 | 14, 12 |
| 306 | Les Avirons | 30 553,223 | Avirons | | | | X | | | | | 53 / 60 / 48 | | 160 | 25, 24 |
| 308 | Su Rousseau | 30 754,176 | Avirons | | | | X | | | | | 30 / 42 / 30 | | 102 | 11, 14 |

Figure 7
Tableau récapitulatif des caractéristiques des ouvrages
Summary table of structure characteristics



Figure 8
Tranchée couverte - Photomontage
Cut-and-cover - Photomontage

■ LA TRANCHÉE COUVERTE

D'un point de vue administratif, la tranchée couverte a fait l'objet d'une enquête complémentaire préalable à la DUP.
Le secteur d'implantation de la tranchée couverte est le quartier de Bois de Nêfles Piton dont l'urbanisation s'est établi le long et de part et d'autre du chemin communal Bois de Nêfles.
La tranchée est de type double portique, pour une longueur de 220 m, avec des aménagements urbains de couverture relativement importants (figure 8 et photo 8).

■ LE MUR DU BARRAGE

Le mur (23 m de haut) est un système à deux volées de sol renforcé par des armatures métalliques et à parements verticaux (type Terre Armée) séparées par une risberme de 6 m de large.
La volée haute du mur mesure environ 85 ml de long environ pour une hauteur maximale de 11 m. La volée basse mesure environ 45 ml de long au niveau de la risberme et atteint 12 m de haut au maximum.



Photo 8
Tranchée couverte - Terrassements en cours
Cut-and-cover - Earthworks in progress

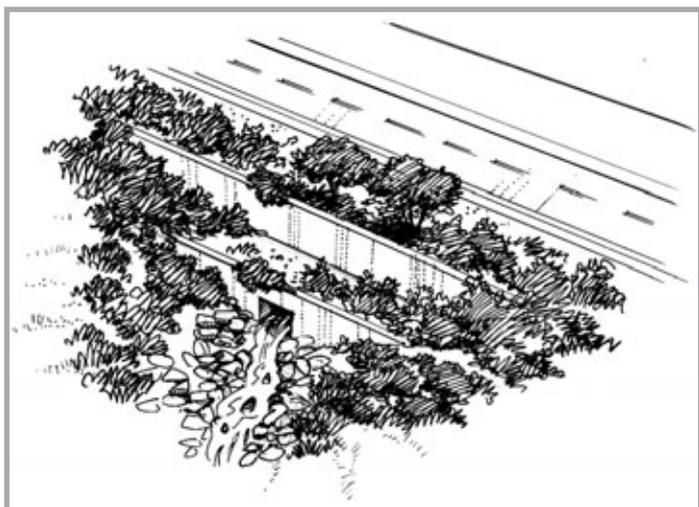


Figure 9
Mur du barrage - Esquisse architecturale
Wall of the dam - Architectural draft

► En fond de talweg, le mur encage un ouvrage hydraulique voûte de section 7 m x 4 m (figure 9).

■ ÉTAT D'AVANCEMENT DES TRAVAUX OU PROCÉDURES

A fin août 2005, l'état d'avancement des travaux ou des procédures est le suivant :

- ◆ les travaux des lots n° 1, 6, 7 et 8 sont commencés, le lot n° 1 étant le plus avancé (quatre tabliers sur six sont bétonnés);
- ◆ les marchés pour les lots n° 2 et 5 ont été attribués et démarreront avant la fin 2005;
- ◆ la consultation des entreprises est en cours pour le lot n° 3;
- ◆ les consultations pour les lots n° 4 et 9 seront lancées pour la fin de l'année 2005-début 2006.

ABSTRACT

Section 2 : Saint-Paul – county road RD10/L'Etang Salé – RD17. Linking structures

E. Barlet

The article presents a description of linking structures on the second section of the Route des Tamarins highway from Saint-Paul – RD10/L'Etang Salé to RD17. After summarising the geomorphological, geotechnical, architectural and environmental context of the ravines, the author briefly describes all the structures and their breakdown into work sections.

RESUMEN ESPAÑOL

Tramo 2 : Saint-Paul – Carretera Departamental 10/L'Etang Salé – Carretera Departamental 17. Obras de fábrica no convencionales

E. Barlet

En este artículo se presenta una descripción de la obras de fábrica no convencionales del segundo tramo de la Carretera de los Tamarindos Saint-Paul – Carretera Departamental 10/L'Etang Salé – Carretera Departamental 17. Tras una presentación de los contextos geomorfológico de los barrancos, geotécnico, arquitectónico y medioambiental, el autor describe de forma compendiada el conjunto de las obras y su adjudicación.

Section 1 : Saint-Paul / RD10

Le viaduc et la tranchée couverte de Saint-Paul

Le viaduc de Saint-Paul est l'ouvrage le plus important de la Route des Tamarins. Il permet à celle-ci de s'élever sur 756 m, du niveau de la mer au plateau surplombant la ville de Saint-Paul. Il s'inscrit dans un environnement contraint, tant en matière d'espace que de respect du site urbain, historique (à proximité de la grotte des premiers Français) et écologique qu'il traverse ou surplombe. Parce qu'il sera éminemment présent, sa conception a été un processus long et partagé. A son extrémité haute et sud, il pénètre dans une tranchée couverte reconstituant la falaise. Ces deux ouvrages imbriqués ont été réunis dans un seul marché de travaux.

Hélène Oudin-



Hograindleur
CHEF DE PROJET
PREMIÈRE SECTION
DDE de la Réunion

Miguel Brethomé



CHARGÉ DU VIADUC
ET DE LA TRANCHÉE
COUVERTE
DE SAINT-PAUL
DDE de la Réunion

Michel Kahan



CHEF DU SERVICE
GRANDS TRAVAUX
DDE de la Réunion

Frédéric Zirk



ARCHITECTE URBANISTE
Cabinet Faup et Zirk

Le viaduc de Saint-Paul est le plus vieil ouvrage de la Route des Tamarins, puisqu'il a toujours fallu que la route passe du niveau de la mer pour atteindre la montagne de moyenne altitude, "les Hauts". Ainsi, dès 1990, le viaduc de Saint-Paul était à l'étude, dans sa configuration longue d'un kilomètre. L'article du *Bulletin Ouvrages d'art* du Setra [1] détaille les évolutions du projet avec les tracés de la route. Nous nous attacherons ici essentiellement au projet du viaduc et de la tranchée couverte de Saint-Paul dans leur configuration définitive.

Le viaduc de Saint-Paul, ouvrage exceptionnel de la première section de la Route des Tamarins, est situé entre le diffuseur de Saint-Paul et le diffuseur de Plateau-Caillou. Partant de l'altitude 13 m NGR (nivellement général de la Réunion), il rentre dans la falaise du Rempart de Saint-Paul à l'altitude 48 m NGR, soit une trentaine de mètres sous la ligne de crête : il atteint là la tranchée couverte du Rempart de Saint-Paul (figure 1).

LE SITE DE SAINT-PAUL

Un site exigu (photo 1)

La Route des Tamarins, au niveau du viaduc de Saint-Paul, doit passer dans un couloir étroit, formé d'un côté par la falaise du Rempart de Saint-Paul, falaise haute de près de quatre-vingt mètres, et de l'autre côté par le front bâti urbain constitué, à ce niveau, de l'église de Saint-Paul, de l'école Rosalie Javouhey, d'habitations. Dans ce couloir passe actuellement la route nationale 1 (RN1), qui doit être maintenue malgré le passage de la Route des Tamarins sur le viaduc de Saint-Paul ; cette RN1 deviendra une branche de l'itinéraire côtier à vocation plus urbaine et touristique.

Le tracé du viaduc a été calé dans cette zone pour



Figure 1
Photomontage
du viaduc
de Saint-Paul
(par Fr. Zirk)

*Photomontage
of Saint-Paul
viaduct
(by Fr. Zirk)*

Photo 1
Photographie
aérienne
de la falaise
et du front bâti

*Aerial photograph
of the cliff
and building front*



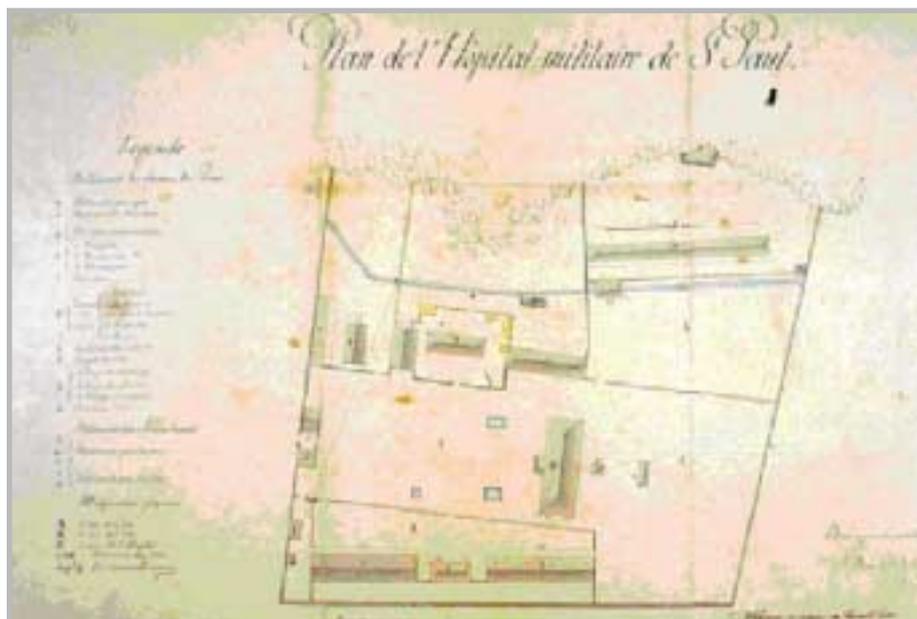
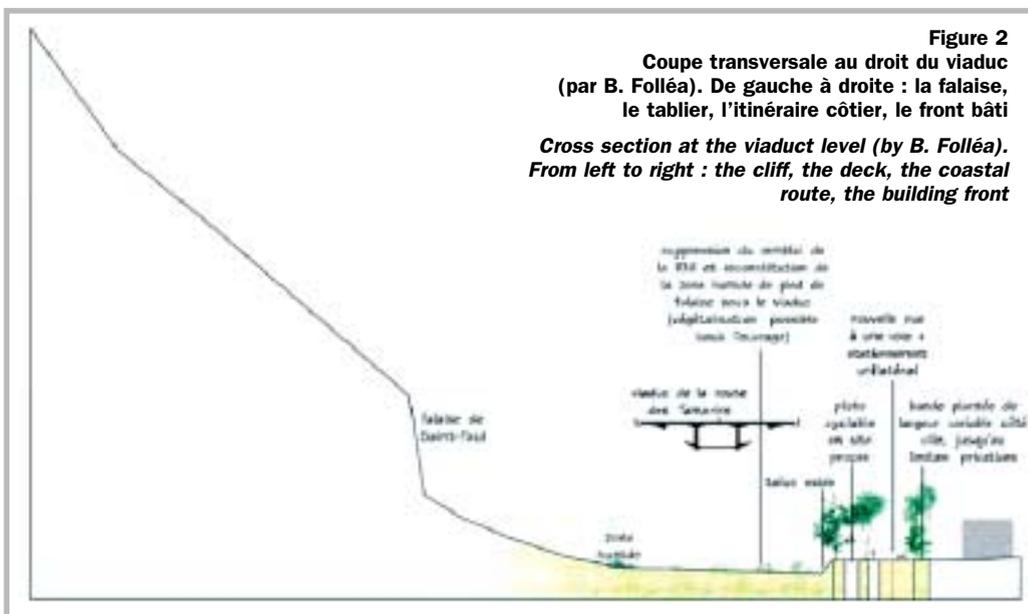


Figure 3
Plan de l'hôpital militaire -
Gravure de la ravine
Bernica
Layout of the military
hospital - Engraving
of Bernica ravine

s'éloigner au maximum du front bâti, de façon à limiter en particulier les nuisances sonores. L'itinéraire côtier est, lui, intercalé entre le front bâti et le viaduc, où, bordé de plantations, il assure des fonctions de desserte urbaine (figure 2). Quand l'itinéraire côtier regagne le front de mer, la Route des Tamarins, sur son viaduc, s'en écarte pour rejoindre la montagne et pénétrer dans la falaise. Le viaduc doit passer là dans l'enceinte de l'Etablissement public de santé mentale de la Réunion de Saint-Paul (EPSMR). Et l'espace libre étant trop réduit pour accueillir un viaduc, un accord a dû être trouvé entre la Région Réunion, l'Etat (autorité effectuant l'ensemble des acquisitions foncières de la Route des Tamarins) et l'EPSMR pour qu'un nouvel hôpital soit construit ailleurs. Ainsi, l'emprise des semelles du viaduc est acquise par l'Etat, l'emprise sous le viaduc est soumise à une servitude de surplomb mais reste propriété de l'hôpital, l'emprise sous le viaduc plus une bande de part et d'autre est louée durant les travaux de façon à pouvoir placer des installations de chantier (occupation temporaire). Le montant versé à l'EPSMR par

la Région Réunion, correspondant à ces trois prestations, est de 4,6 millions d'euros environ. La part d'emprise restante de l'EPSMR, dont les fonctions ont été déménagées, reste utilisée par l'hôpital à sa convenance.

Un site historique (figure 3)

Dans cette emprise restante à l'EPSMR subsiste l'ancien hôpital militaire de Saint-Paul, datant du XVIII^e siècle.

Côté origine du viaduc, c'est la ravine Bernica, célébrée par le poète Leconte de Lisle au XIX^e siècle dans ses "Poèmes Barbares".

Un site protégé

La ravine Bernica, par sa qualité paysagère et sa valeur historique, constitue maintenant un site classé. Sa présence a conduit à décaler l'origine du viaduc au-delà de celle-ci, dans l'axe de l'église de Saint-Paul.

La falaise de Saint-Paul a également fait l'objet d'une expertise faunistique et floristique de la Société d'études ornithologiques de la Réunion (SEOR). Quelques nids de pailles-en-queue (photo 2) ont été repérés dans la falaise longeant le viaduc; pour ceux-ci, dans les grillages pendus le long de la falaise, des découpes seront effectuées au droit des quelques nids; une fois le viaduc construit et afin d'éviter que les pailles-en-queue viennent nicher dans le tablier, des perchoirs artificiels pourraient être placés dans la falaise, afin qu'ils puissent facilement y nicher.

Les conditions climatiques

Le site de Saint-Paul, comme le reste de la Réunion, malgré l'activité intense du Piton de la Fournaise, est dans une zone de sismicité nulle au sens des textes réglementaires en vigueur.

En revanche, l'ouvrage, comme le reste de l'île, est soumis à des cyclones et des tempêtes tropicales, se caractérisant par des vents violents et de très fortes précipitations.

Comme pour les trois autres ouvrages exceptionnels de la Route des Tamarins, une étude au vent a été menée spécifiquement sur le viaduc de Saint-Paul par le Centre des sciences et techniques du bâtiment à Nantes (CSTB). Cette étude s'est effectuée en deux temps :

- ◆ une caractérisation d'un modèle de vent de référence de période de retour cinquantennale par des études numériques et par des essais en soufflerie sur une maquette topographique du site ;
- ◆ une caractérisation du comportement aérodynamique d'une section d'ouvrage par des essais sur maquette en soufflerie.

Il ressort de ces études que le viaduc, circulant au pied ou sur les flancs des remparts de Saint-Paul

(falaises) est relativement à l'abri des vents forts. En effet, les courants laminaires soufflant de la mer s'élèvent au-dessus des crêtes du rempart pour rejoindre le plateau. Le long du rempart, les vitesses sont nettement plus faibles mais le vent y est plus turbulent. Dans ces conditions, les modèles numériques et physiques de vent atteignent un peu leurs limites et le Setra a préféré dimensionner l'ouvrage avec des efforts forfaitaires de vent latéral de 400 kg/m², en vérifiant que les conditions de déséquilibre de fléau en construction sous vent turbulent étaient largement couvertes par les combinaisons fondamentales du *Bulletin technique* n° 7.

Une géologie complexe

La géologie réunionnaise est, de façon générale, souvent complexe ; l'alternance de coulées volcaniques rend le sous-sol hétérogène par grandes masses ; au sein de chaque coulée se mêlent des blocs de grandes tailles ; les roches basaltiques ont en conséquence des caractéristiques mécaniques variées, pour lesquelles l'effet d'échelle est important.

La géologie au niveau du viaduc de Saint-Paul ne dément pas ces difficultés. Cependant, pour les traiter au mieux, des études géologiques et géotechniques poussées ont été menées, que le temps laissé par les évolutions de tracé a permis d'effectuer avec une exhaustivité la plus complète possible. Les reconnaissances juste au droit des bâtiments de l'EPSMR occupés jusqu'au mois de juin 2005 et au droit de la RN1 circulée également jusqu'au mois de juin 2005 n'ont cependant pas pu être effectuées. L'entreprise retenue pour les travaux du viaduc réalisera donc cette campagne complémentaire ; cependant, au vu des analyses effectuées, celle-ci ne devrait conduire qu'à un calage fin des niveaux de fondation retenus au projet, sans remise en cause de l'horizon de fondation en particulier.

Ces études géologiques et reconnaissances géotechniques ont été menées par le laboratoire régional des Ponts et Chaussées d'Aix-en-Provence, l'Université de La Réunion, le groupement Géotechnique et Contrôles / Solétanche-Bachy (pour les sondages).

Le modèle géologique a fait l'objet de plusieurs interprétations qui présentaient toutes des défauts ; une étude plus lourde a donc finalement été confiée à l'Université de La Réunion, qui est parvenue à un modèle plus cohérent. Cette étude fera vraisemblablement l'objet d'une communication spécifique à venir ; nous resterons donc, ci-après, succincts et très généraux sur ses conclusions.

La falaise du Rempart de Saint-Paul est constituée d'une coulée de la phase II du Piton des Neiges, actuellement éteint. (C'est le Piton de la Fournaise qui est encore actif aujourd'hui, et ses coulées



Photo 2
Un paille-en-queue
A tropicbird

viennent couper fréquemment la Route des Laves et s'étendent jusqu'à la mer).

Cette falaise et son faciès se prolongent sous le terrain naturel. Des blocs se seraient ensuite détachés de la falaise. Puis, par la face côté ravine Bernica de la falaise, serait arrivée une coulée de la phase III (plus récente) du Piton des Neiges, qui se serait épanouie en pied de falaise. Sur celle-ci, d'autres blocs seraient tombés. Et la mer serait venue s'arrêter contre la falaise, déposant ses alluvions, avant de s'éloigner, pour laisser le sol comme à l'heure actuelle.

Au niveau géotechnique, trois faciès principaux apparaissent de façon très schématique :

- ◆ de la surface à 10 m de profondeur : des alluvions et des sables et graviers (avec une pression limite de l'ordre de 2,5 MPa pour les sables et graves) ;
- ◆ de 10 à 20 m de profondeur (la profondeur maximale est extrêmement variable en fait) : une passe de blocs basaltiques (avec une pression limite de l'ordre de 7 MPa) ;
- ◆ au-delà : un substratum basaltique (avec une pression limite de 8 MPa minimum, variable selon les types de coulées).

Cette coupe extrêmement simplifiée en natures de sols comme en profondeurs l'est en particulier du fait de la position du viaduc, parallèle à la falaise (falaise "souterraine en particulier" ; les appuis du viaduc sont donc au-dessus d'un substratum de très forte pente transversale ; les niveaux sont donc très vite variables transversalement).

■ L'ÉTUDE ARCHITECTURALE DU VIADUC DE SAINT-PAUL : CHRONOLOGIE, RÉFLEXION, ÉTUDES

La première étude architecturale confiée à P.-G. Dezeuze et Fr. Zirk par le CETE d'Aix-en-Provence a été réalisée en 1995.

Le viaduc de Saint-Paul y apparaît comme l'un des éléments de la réflexion générale menée sur l'ensemble du tracé de ce qui s'appelait alors l'auto-route des Hauts de l'ouest ; tracé complet comprenant les actuelles deux sections.

Les architectes ont essayé de définir un esprit, une typologie caractéristique pour la Réunion, une ap-



Figure 4
Photomontage
du viaduc
dans la ville
(par Fr. Zirk)

Photomontage
of the viaduct
in the town
(by Fr. Zirk)



proche typiquement réunionnais, à travers les paysages, le tracé, la vie réunionnais.

Dans cette réflexion qui a porté sur tous les ouvrages (courants, non courants, exceptionnels, tranchées et tunnels, etc.), le viaduc de Saint-Paul peut être considéré comme exceptionnel par ses dimensions, ses caractéristiques, les contraintes de site et sa confrontation avec la ville de Saint-Paul, la falaise et l'océan.

Dès les études de 1995 (cf. rapport du CETE établi par MM. Marcesse et Puy, diagnostic architectural), le viaduc est décrit comme un "ruban, une route" longeant en courbe et contre-courbe la falaise, intimement lié à la ville par l'esprit et le rythme des piles soutenant un tablier à section constante sans préjuger des travures et structures, section constante exprimant déjà le "ruban" routier.

Dans les études approfondies menées avec la DDE de la Réunion et le Setra, en liaison avec "l'atelier de travail" (cf. article général précédent "Projet de la section 1 : Saint-Paul/RD10"), tenant compte des sensibilités exprimées, on a maintenu les principales options définies :

- ◆ un tablier à section constante ;
- ◆ des travures adaptées ;
- ◆ des piles créant une transparence entre falaise et océan.

La structure définitive du tablier a permis une introduction de l'acier, de la couleur, et un allègement notable de l'aspect de structure.

Les raccordements des culées ont été étudiés pour trouver en partie basse une "chaussée montante" et en partie haute une relation avec les têtes de tranchée à la géométrie souple (mais délicate pour tenir compte de la falaise et des pentes et biais nécessaires).

L'aspect de surface et les définitions de détail ont repris les conclusions de l'analyse de 1995 : simplicité n'excluant pas la fantaisie pour les corniches ainsi que l'introduction du "blanc", couleur présente à la Réunion sur les routes et l'habitat, et du rouge (on évoquera à ce sujet les "Saint-Expédit").

Traitement par peau coffrante à fort relief pour les bétons de pile (en harmonie avec ceux des viaducs de la Savane).

Enfin un regret : il n'a pas été possible d'employer en grande masse des bétons colorés qui sont pourtant, nous le pensons, une des voies d'avenir pour les bétons "Réunion", mais demandent une expérimentation "in situ" sur un ouvrage petit ou moyen. En effet, les bétons gris actuels n'ont rien en commun avec l'esprit de la Réunion.

En résumé : un ouvrage exceptionnel mais dont les contraintes ont mené l'étude architecturale à le considérer comme un objet particulier intégré à Saint-Paul (figure 4) et non un objet solitaire par sa structure, donc à relativiser la valeur "structure" démonstrative par rapport à l'équilibre entre ouvrage, ville et paysage confronté à l'irruption d'une route dans l'espace.

Les aménagements urbains proposés par l'équipe (B. Folléa, P.-G. Dezeuze, Fr. Zirk) pour traiter le "pied de l'ouvrage" se relie aux propositions d'ensemble du bas de Saint-Paul en un lieu où se croisent les accès des Hauts, de l'Etang, du Plateau Caillou avec la route du bord de l'océan sous un ouvrage ouvrant la visite de la Savane.

Formes, matières et couleurs contribueront à ce qui pour l'architecte est primordial : le bon choix au bon endroit ou "la rencontre exacte entre la structure, les contraintes et le site au sens large".

■ LE PROJET DU VIADUC

L'étude préliminaire a été achevée en décembre 2000, les études de projet en 2003, et la consultation des entreprises a débuté fin 2003.

Les données fonctionnelles

Les caractéristiques de la voie portée

Le tracé en plan de l'ouvrage est formé par une courbe en S avec, du nord (vers Saint-Denis) au sud (vers Saint-Pierre) :

- ◆ cercle de rayon 550 m sur 210 m, centré vers la mer ;
- ◆ clothoïde sur 133 m (A = 270), orientée vers la mer ;
- ◆ clothoïde sur 133 m (A = 305), orientée vers la falaise ;
- ◆ cercle de rayon 700 m sur 280 m, centré vers la falaise.

Le profil en long est formé d'une pente constante à 6 %.

Le dévers est variable, de 3,8 % (vers la mer) à - 2,5 % (vers la falaise), mais il a été possible de conserver un profil unidéversé sur l'ensemble de l'ouvrage, de façon à ce que hourdis supérieur et hourdis inférieur restent parallèles : le caisson du tablier effectue une rotation pour s'adapter au dévers.

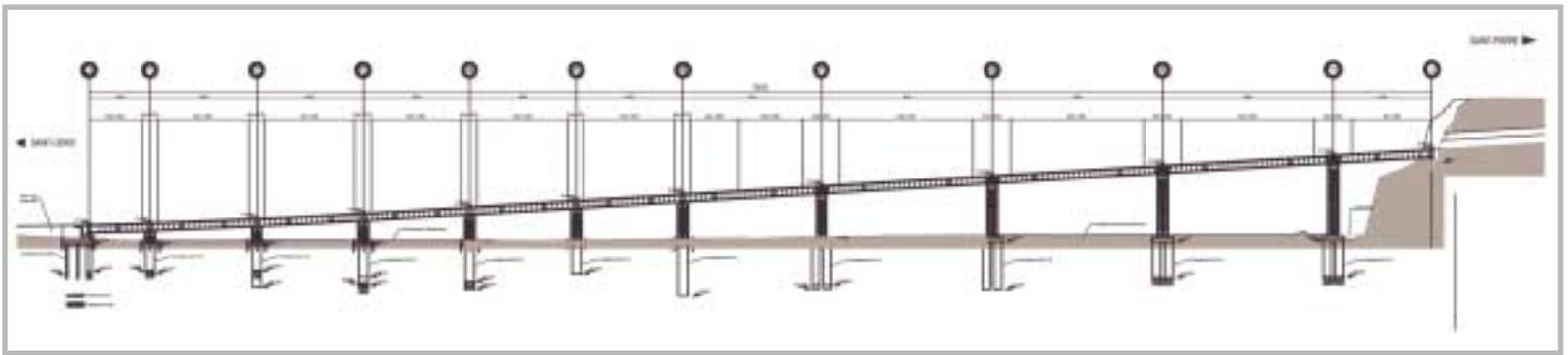


Figure 5
Coupe longitudinale de l'ouvrage
Longitudinal section of the structure

Le profil en travers sur le viaduc est constitué comme suit :

- ◆ dans le sens montant (côté mer) :
 - une bande dérasée de gauche de 0,50 m (réduction admise car le sens est montant),
 - trois voies de 3,50 m, dont une voie spécialisée véhicules lents (VSVL), justifiée par l'importance de la pente montante,
 - une bande dérasée de droite de 1 m ;
- ◆ dans le sens descendant (côté falaise) :
 - une bande dérasée de gauche de 1 m,
 - trois voies de 3,50 m, dont une voie spécialisée véhicules lents (VSVL), justifiée par l'importance de la pente descendante,
 - une bande dérasée de droite de 1 m.

Les deux sens de circulation sont séparés par un terre-plein central de 0,60 m.

Les dispositifs de retenue latéraux sont des BN4-16 t, justifiées notamment par l'importance du trafic et la forte hauteur de l'ouvrage. Le dispositif de retenue central est une glissière en béton de type DBA.

L'assainissement

Par la tranchée couverte transite une partie des eaux de la plate-forme routière amont (le dernier bassin de décantation n'ayant pu être logé plus à proximité de la tranchée ; au niveau du viaduc, la quantité d'eau à recueillir est donc relativement conséquente : les eaux amont plus les eaux de la chaussée propre du viaduc, de grande largeur. Outre la quantité à recueillir, l'une des préoccupations a été de parvenir à récupérer les eaux : en effet, l'ouvrage est en forte pente et, lors des précipitations à la Réunion, les débits sont très importants. Les percées des longrines permettant à l'eau des caniveaux-fils d'eau d'atteindre les corniches caniveaux sont donc réalisées selon la ligne de plus forte pente en particulier.

Les caractéristiques principales de l'ouvrage

Le viaduc de Saint-Paul a une longueur totale de 756 m ; il comprend (du nord au sud) onze travées de : 34,50 m – 5 x 60 m – 78 m – 3 x 96 m – 55,50 m (figure 5).

Son tablier a une largeur totale de 26,70 m. Il est de hauteur constante égale à 4,55 m, soit un élanement confortable pour les petites travées de 60 m (1/13°), mais plus tendu pour les grandes travées de 96 m (1/21°). Il est constitué par un caisson en béton précontraint, coulé en place, construit par encorbellements successifs.

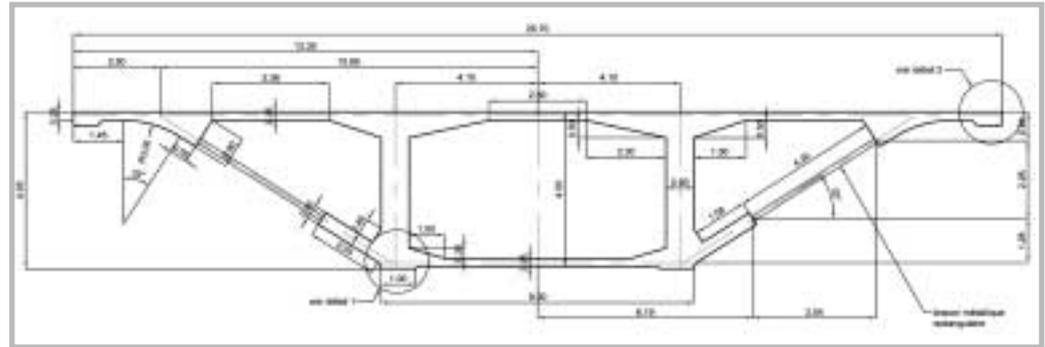


Figure 6
Coupe transversale du tablier
Cross section of the deck

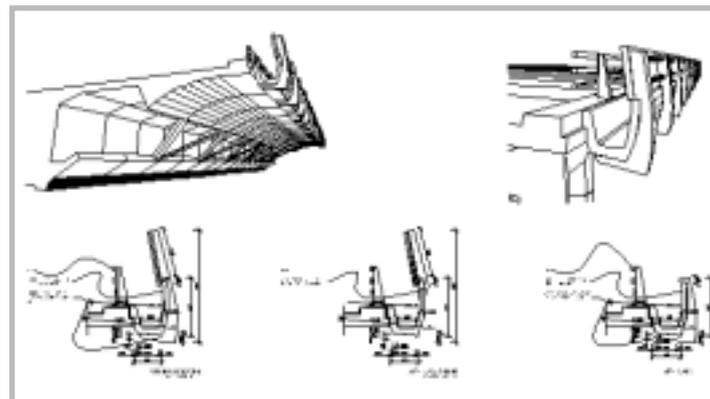


Figure 7
Corniche-caniveau avec écran acoustique
Cornice-gutter with noise barrier

Le caisson comporte deux âmes verticales et des bracons métalliques triangulés qui soutiennent les encorbellements (figure 6).

L'ouvrage est précontraint longitudinalement par une précontrainte intérieure et par des câbles extérieurs. Du fait de sa grande largeur, il est également précontraint transversalement.

Le tablier est encastré sur ses piles P7 à P10 mais repose sur ses appuis P1 à P6, C0 et C11, par l'intermédiaire d'appareils d'appui glissants à pot de caoutchouc.

Les piles sont constituées chacune de deux fûts parallèles reliés en tête par un chevêtre. Leur hauteur varie de 6 à 40 m de hauteur environ.

L'ouvrage est fondé sur des fondations profondes.

Les équipements de l'ouvrage

Outre les dispositifs de retenue décrits plus haut, le tablier est équipé de corniches-caniveaux de dimensions conséquentes et d'un collecteur en fonte (Ø 400 mm à Ø 500 mm) placé à l'intérieur du caisson pour faire transiter les eaux du tablier (figure 7). Les corniches-caniveaux sont en béton armé matricé préfabriqué. Elles reçoivent des écrans acoustiques placés, côté mer, sur les huit premières

Figure 8
Le tablier vu de dessous,
ses piles, l'entrée
en falaise

*The deck seen
from below, its piers,
entry into the cliff*



travées de l'ouvrage, côté montagne sur la première travée seulement (en raison d'habitations en contrebas à ce niveau). Ces écrans sont en partie réfléchissants, en partie absorbants.

L'étanchéité du tablier prévue à ce jour est constituée d'un film mince adhérent au support; la couche de roulement est formée de 9 cm de béton bitumineux; une première couche de BBSG 0/10 (béton bitumineux semi-grenu : BBSG) de 7 cm d'épaisseur et une deuxième couche, de finition, de type BBTM 0/6 type II (béton bitumineux très mince : BBTM) de 2 cm d'épaisseur.

Le tablier du viaduc

Le tablier du viaduc présente sans doute deux difficultés principales :

- ◆ d'une part sa grande largeur rendant plus complexe sa construction et nécessitant une précontrainte transversale en phase définitive ;
- ◆ d'autre part ses bracons appuyés sur un voile béton inférieur continu.

Si la largeur ne résulte que des caractéristiques fonctionnelles, la présence du voile béton inférieur résulte d'une volonté architecturale (figure 8) : l'ouvrage sera, une fois réalisé, essentiellement vu par au-dessous, il est donc important d'animer ce point de vue : par des bracons métalliques, brisant la régularité du béton, par des formes interrompues, créant des effets d'ombres et de lumières. Au niveau du projet, le hourdis inférieur était également matricé, d'une part pour atténuer les défauts du béton si fréquents en sous-face des ouvrages construits par encorbellements successifs coulés en place, et d'autre part pour créer encore un autre état de surface accrochant la lumière. Par crainte de surcoûts trop importants au niveau de la consultation (du fait du coût de la matrice d'une part et des difficultés de réalisation d'autre part), cette

matrice en sous-face du hourdis inférieur a été supprimée pour le lancement du dossier de consultation des entreprises.

La hauteur du voile inférieur a été ajustée de façon à être suffisamment importante pour bien marquer cette continuité d'un voile latéral, mais pas trop pour ne pas grever le poids de l'ouvrage alors que les bracons sont plus efficaces en terme de fonctionnement mécanique.

Il est prévu deux bracons (formant un V) de chaque côté d'un voussoir de 3 m. Ces bracons sont constitués de tubes rectangulaires de 300 mm par 150 mm de côtés, en acier de nuance S355 NH. Le système de protection contre la corrosion est de catégorie C5 G NV.

Le tablier est constitué d'un béton de classe de résistance C45/55. Des études ont été menées en phase projet afin de déterminer si l'ouvrage pourrait supporter, moyennant des réductions de voies de circulation routière, le passage d'un transport en commun ferré en site propre (TCSP). Ceci nécessitait davantage de précontrainte extérieure (qui aurait pu être mise en place ultérieurement), mais également de passer à une classe de résistance de béton du tablier supérieure (C60/75). Le maître d'ouvrage a décidé que les possibilités pour que le TCSP adoptent le viaduc étaient trop infimes pour retenir cette solution.

Les unités de précontrainte prévues au stade du projet sont les suivantes :

- ◆ précontrainte de fléau : armatures 27 T15S ;
- ◆ précontrainte de continuité intérieure (câbles éclisses) : armatures 19 T15S ;
- ◆ précontrainte de continuité extérieure : armatures 37 T15S ;
- ◆ précontrainte transversale : armatures 4 T15S à gaines de forme ovale (pour des raisons d'espace dans le hourdis).

Les éléments colorés du tablier

Les corniches-caniveaux et les DBA centrales sont réalisées en béton brun-rouge foncé teinté dans la masse.

Les bracons métalliques sont finalement blancs, le blanc étant apparu comme la couleur résistant le mieux à l'altération due au soleil. Les BN4 (poteaux et lisses, hors face de fixation des lisses) sont également blanches. Les écrans acoustiques comportent des montants rouges et des tôles métalliques continues blanches (dans les zones d'écrans absorbants).

Les appuis

La culée basse C0 assure la transition entre le viaduc et les remblais d'accès constitués de massifs en sols renforcés dont le parement est assuré par un voile en béton armé recevant une maçonnerie de basalte. Les murs en retour et le mur de front

de cette culée sont donc de même, habillés de maçonnerie de basalte.

La culée haute C11 est constituée d'un simple sommier ; elle est en effet construite, en falaise, à l'intérieur de la tête nord de la tranchée couverte (photo 3).

Chaque pile (figure 9) est donc, comme indiqué plus haut, constituée de deux fûts reliés en tête par un chevêtre (chevêtre factice quand le tablier est encastré sur les piles).

Chaque fût présente : côté extérieur une surface plane matricée et, côté intérieur, une surface courbe lisse. Des évidements architectoniques bordés d'une saillie de béton blanc, de forme rectangulaire (1,50 m x 0,80 m), sont prévus à raison d'un par levée de fût. Ces évidements sont fermés par des grillages en inox, légèrement en retrait, destinés à éviter que des oiseaux viennent se nicher dans ces espaces.

Les fondations

Hormis la culée C11 en falaise, fondée superficiellement, toutes les fondations sont profondes. Le type de fondations profondes envisagé a d'abord été des fondations sur pieux. Il est ensuite apparu que des barrettes seraient préférables : outils mieux adaptés aux terrains rencontrés ; possibilité de positionner les barrettes de façon à optimiser la reprise des efforts. Le choix des dimensions de barrettes a ensuite été délicat : fallait-il adopter une largeur de barrette de 0,80 m correspondant aux dimensions de bennes usuelles ? Ou retenir des dimensions de bennes possibles mais moins courantes ? Fallait-il uniformiser la longueur des barrettes entre toutes les piles ou uniquement adopter la longueur issue des calculs de section utile de barrette ? Il a finalement été décidé de retenir, pour le projet, une largeur usuelle de 0,80 m et des longueurs déduites des calculs et de laisser ensuite aux entreprises, au niveau de la consultation, la possibilité de modifier la section en plan des barrettes de façon à s'adapter aux outils dont elles disposeraient. Ainsi, les barrettes retenues ont, selon les appuis, des dimensions de 0,80 m x 4,80 m - 0,80 m x 5,30 m - 0,80 m x 4,35 m.

L'horizon d'ancrage des barrettes retenu est celui des blocs basaltiques. En effet, la pression limite obtenue dans cet horizon est suffisante pour reprendre les descentes de charges. Traverser cet horizon pour tenter d'atteindre un substratum basaltique plus homogène nécessite d'envisager un trépanage beaucoup plus important (ce qui est préjudiciable en termes de délai, d'environnement – proximité de zones habitées et d'une école –, de coût) et d'augmenter de façon significative la longueur des barrettes (augmentation supérieure à 10 m). Le choix a donc été celui d'un ancrage dans les blocs, à quelques barrettes près pour lesquelles le substratum basaltique était proche.



Photo 3
Culée C11 - Zone d'implantation dans la falaise : la réalisation des sondages au niveau de cet appui a nécessité la pose de filets plaqués de protection des ouvriers contre les chutes de blocs

Abutment C11 - Area of location in the cliff : To perform boring at the level of this support, plated nets had to be installed to protect the workers against falling blocks

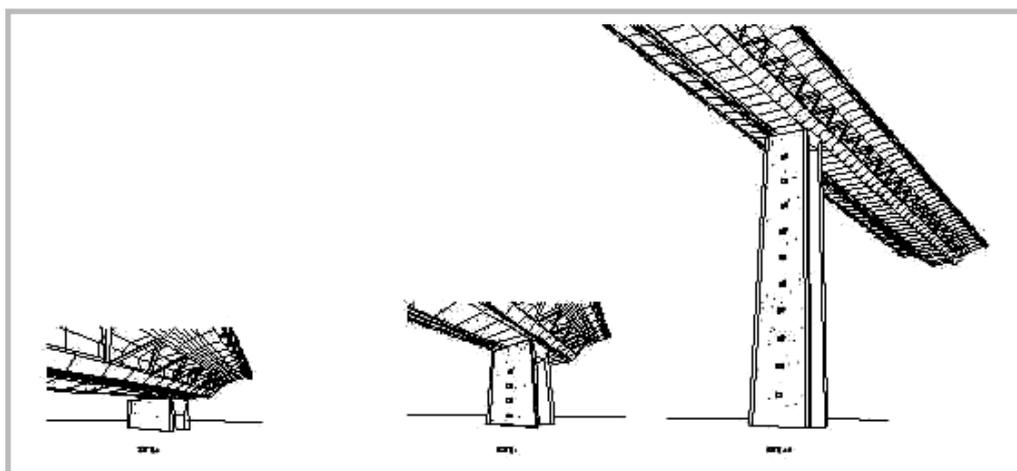


Figure 9
Une pile, avec ses zones matricées et lisses et ses évidements
A pier, with its smooth, die-forged regions and its recesses

La portance des fondations ainsi constituées ne pose pas de problème. Cependant, afin d'éviter tout mouvement éventuel de réajustement de ces blocs sous l'important effort vertical apporté par les barrettes, le projet prévoit de traiter localement ces blocs, et plus précisément la matrice limono-graveleuse qui lie ces blocs entre eux. Ce traitement relève du principe de précaution. Son objectif n'est pas en particulier d'augmenter les caractéristiques mécaniques, et donc la capacité portante de l'horizon de fondations, mais bien, par réalisation d'une liaison rigidifiée entre blocs, d'éliminer le risque de mouvement des gros éléments entre eux. La technique retenue est le jet grouting. L'objectif est de réaliser, après bétonnage des barrettes, sous leur pointe, des colonnes rigides de jet grouting de 0,50 m de diamètre minimal et de 1 m d'entraxe maximal. Le contrôle prévu pour ces colonnes sera réalisé par carottage d'une part et par mesure du diamètre de la colonne par la méthode du cylindre électrique (ou équivalent) d'autre part.

Pour certaines des barrettes ancrées dans le substratum basaltique, le niveau de scories le plus proche est assez voisin du niveau de pointe des barrettes ; compte tenu de la qualité de ces scories, un traitement de celles-ci est prévu, par injection au coulis de ciment des zones situées dans la zone d'influence des barrettes.

| Pile | P1 | P2 | P3 | P4 | P5 | P6 | P7 | P8 | P9 | P10 |
|-------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Nombre barrettes | 3 | 3 | 3 | 3 | 4 | 4 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| Largeur | 0,80 m |
| Longueur | 4,8 m | 4,8 m | 5,3 m | 5,3 m | 5,3 m | 5,3 m | 4,35 m | 4,35 m | 4,35 m | 4,35 m |
| Hauteur | | | | | | | | | | |
| Mer : | 15,43 | 23,23 | 17,73 | 24,33 | 15,83 | 28,33 | 25,08 | 26,58 | 20,18 | 20,18 |
| Centre : | 14,13 | 23,23 | 21,23 | 24,33 | 15,83 | 28,33 | 23,08 | 26,58 | 20,18 | 20,18 |
| Montagne : | 14,13 | 14,33 | 22,53 | 20,33 | 15,83 | 28,33 | 23,08 | 26,58 | 20,18 | 20,18 |
| Traitement sol : | | | | | | | | | | |
| Mer : | non | oui | oui |
| Centre : | oui | non | oui | non | non | non | non | non | oui | oui |
| Montagne | oui | oui | oui | oui | non | non | non | non | oui | oui |

Tableau I

Table I

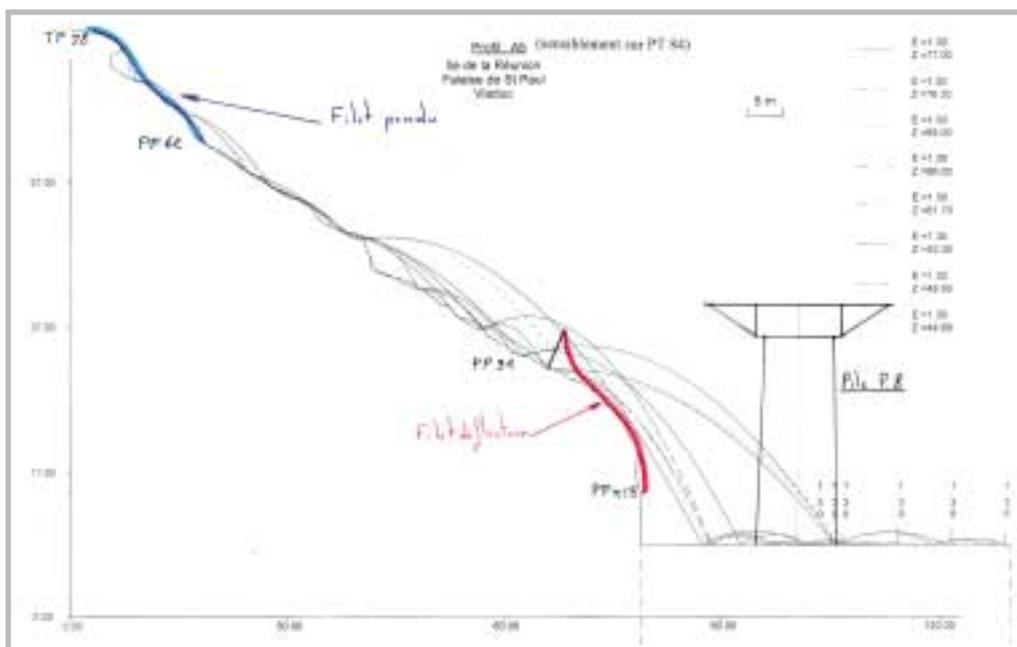


Figure 10
Trajectographie au droit
de la pile P8 et solution
de protection retenue

Trajectory calculation
at the level of pier P8
and protection solution
adopted



Le tableau I récapitule les caractéristiques des fondations des piles du viaduc au niveau du projet.

Les protections de falaise

La falaise de Saint-Paul juxte et surplombe le viaduc sur toute sa longueur. La distance en plan entre le tablier et la falaise adjacente varie entre 20 et 50 m. La différence altimétrique entre la crête de la falaise et le tablier du viaduc varie de 70 m à 30 m.

Cette falaise abrupte est constituée d'une superposition de couches géologiques s'étant successivement déposées lors des différentes éruptions volcaniques qui ont créé l'île.

Cette falaise s'avère instable et des chutes de blocs ont été recensées à plusieurs reprises.

1998 a été l'année où la première étude trajectographique a été menée par Jean-Claude Pauly du CETE Méditerranée. Depuis, elle a été complétée par d'autres études, pour tenir compte des évolutions des positions en plan du viaduc.

Ces études ont permis de définir une limite de premier impact des blocs et une deuxième limite de propagation de ceux-ci.

Il s'est avéré que sur une longueur d'environ 400 m (P6 à C11), les trajectoires de chutes de blocs rencontraient le viaduc. Le CETE a donc déterminé les moyens à mettre en œuvre pour protéger l'ouvrage. Ils se décomposent en 22 000 m² de filets pendus et 11 000 m² de filets défecteurs, tous les deux de type filets anti sous-marin (ASM) (figure 10).

La zone C0 à P6 ne présentait pas de risques pour l'ouvrage. Cependant il a été réalisé une étude trajectographique complémentaire sur cette zone, pour définir l'emprise pouvant être allouée à l'installation de chantier afin qu'elle soit entièrement sécurisée. Pour ce faire, une limite d'installation est imposée à l'entreprise qui réalisera le viaduc.

Afin d'assurer la sécurité du personnel de l'entreprise qui réalisera la construction du viaduc, il lui est imposé :

- de respecter la limite d'emprise d'installation de chantier plus particulièrement en bordure de falaise ;
- de réaliser un merlon de protection de 2 m de hauteur en limite d'emprise d'installation de chantier en pied de falaise ;
- de mettre en sécurité définitive (purges ou pose de filets selon les zones) la falaise adjacente à l'emplacement de travail des personnels de l'entreprise.

LE PROJET DE LA TRANCHEE COUVERTE

Les données fonctionnelles

Le tracé en plan de l'ouvrage est formé par une courbe incurvée vers la mer de 700 m de rayon. La longueur de l'ouvrage enterré est de 150 m ; les aménagements de tête, de type murs de soutènement, amènent la longueur totale de l'ouvrage à 195 m (figure 11).

Le profil en long est formé d'une pente constante à 6 %. Le gabarit à respecter est de 4,75 m, auquel s'ajoutent 10 cm de revanche.

Le dévers est variable de + 2,5 % à - 2,5 % dans le tube montant et est constant à - 2,5 % dans le tube descendant.

La tranchée couverte est un ouvrage de transition entre le profil en travers du viaduc au nord et la section courante de la Route des Tamarins au sud, de ce fait le profil en travers fonctionnel est variable. Le nombre de voies est toujours de trois par tube et chaque voie a toujours une largeur de 3,50 m. Dans chaque tube la voie de droite est dédiée aux véhicules lents.

La transition du profil en travers s'effectue sur les largeurs de trottoirs, de bandes dérasées de gauche (BDG) et de bandes dérasées de droite (BDD). Le

tableau II précise les évolutions des profils en travers.

La largeur du piédroit central de la tranchée couverte, de 0,60 m, assure la continuité avec les séparateurs centraux doubles en béton armé (DBA) situés de part et d'autre de l'ouvrage.

La définition de l'ouvrage

Cet ouvrage se différencie des tranchées couvertes généralement prévues en milieu urbain, qui supportent une faible épaisseur de couverture (maximum d'environ 2 m). En effet, pour permettre à la Route des Tamarins d'atteindre le niveau de la planèze au-dessus de la falaise, la tranchée couverte de Saint-Paul supporte jusqu'à 20 m de remblai, d'où la nécessité de réaliser un ouvrage avec des traverses supérieures voûtées.

La tranchée se décompose de la façon suivante (figure 12) :

- ◆ deux piédroits latéraux de 4,35 m de haut et 0,60 m d'épaisseur ;
- ◆ un piédroit central de 5,71 m de haut et 0,60 m d'épaisseur ;
- ◆ deux voûtes constituées de deux rayons de courbure afin de rattraper les différences de hauteurs entre le piédroit central et le piédroit latéral. L'épaisseur des voûtes est de 0,60 m ;
- ◆ des semelles superficielles filantes de 0,80 m d'épaisseur sous les piédroits, de 3,50 m de largeur sous les piédroits latéraux et 4,00 m sous le piédroit central ;
- ◆ un béton de blocage entre le front de terrassement et l'arrière des piédroits latéraux, régnant sur la hauteur des piédroits ;
- ◆ des têtes d'ouvrages architecturées.

La hauteur dégagée à la clef de voûte est en moyenne de 9,50 m.

La largeur d'un tube entre deux piédroits est constante de 14,25 m.

Deux joints de dilatation sont positionnés chacun à un tiers de l'ouvrage. La continuité de l'étanchéité sur ces zones est assurée par des joints type waterstop.

La classe de résistance retenue du béton est C35/45.

Au vu de la grande hauteur de remblai que supporte l'ouvrage et en application des recommandations de l'AFTES, il est retenu un dispositif d'étanchéité en géomembrane (DEG) défini comme suit :

- ◆ pour la protection inférieure en contact avec le béton de la voûte : géotextile non tissé avec une masse surfacique minimum de 700 g/m², avec une résistance à la traction minimum de 12 kN/m et un allongement à l'effort maximum de 50 % et une résistance minimum au poinçonnement statique de 0,7 kN ;
- ◆ en partie centrale, une géomembrane d'étanchéité en PVC translucide d'épaisseur minimale de 20/10^e de millimètre ;

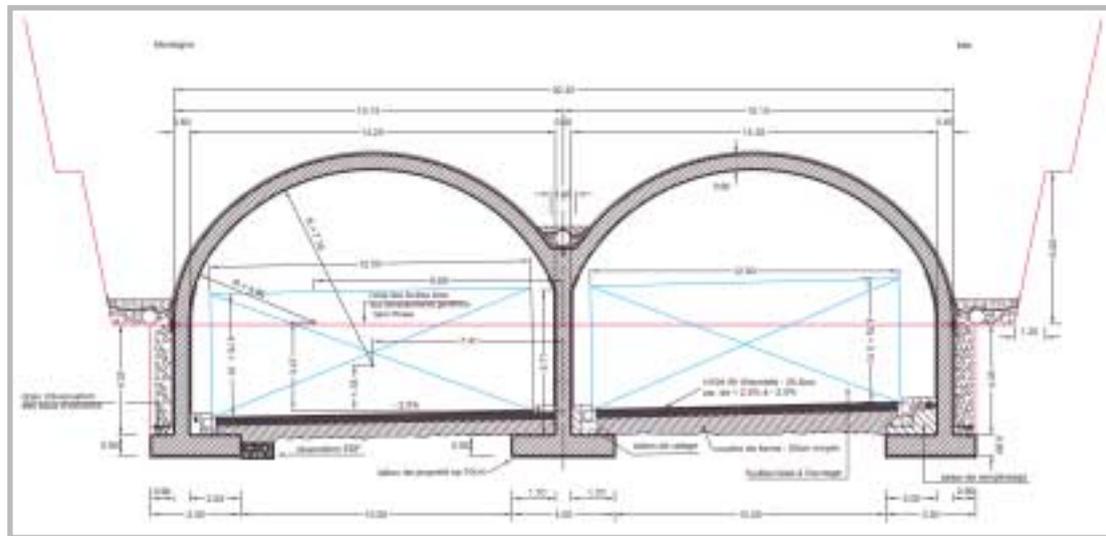


Figure 11
Coupe transversale de la tranchée
Cross section of the trench

Tableau II
Table II

| | Jonction avec le viaduc | | | | Jonction avec section courante | | | |
|--------------------|-------------------------|--------|--------|----------------|--------------------------------|--------|--------|----------------|
| | Trottoir gauche | BDG | BDD | Trottoir droit | Trottoir gauche | BDG | BDD | Trottoir droit |
| Tube côté Mer | 0,35 m | 0,50 m | 1,00 m | 1,40 m | 0,85 m | 0,50 m | 0,65 m | 1,40 m |
| Tube côté Montagne | 0,35 m | 1,00 m | 0,65 m | 1,75 m | 0,85 m | 1,00 m | 1,00 m | 0,90 m |

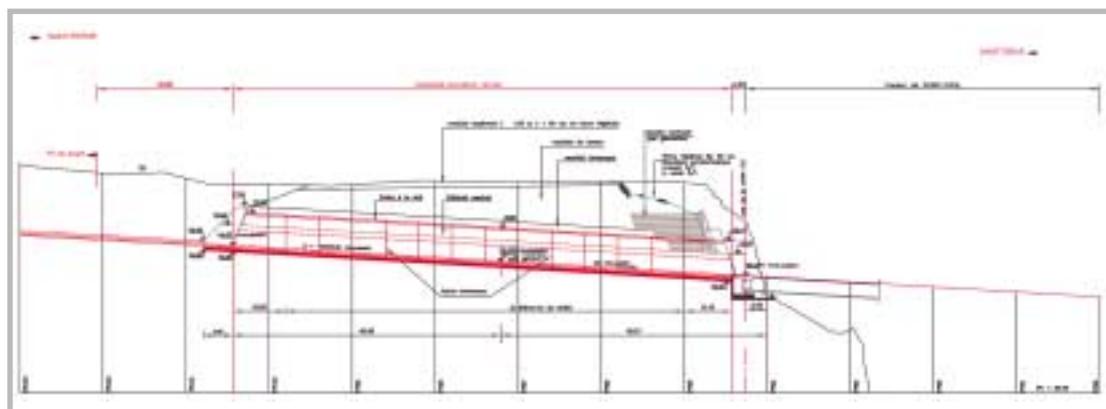


Figure 12
Coupe longitudinale de la tranchée
Longitudinal section of the trench

- ◆ pour la protection supérieure, un PVC translucide d'épaisseur minimale de 20/10^e de millimètre. A ce DEG sont associés des profilés de compartimentage permettant d'assurer une réparation éventuelle sur des surfaces limitées par un calepinage réduit.

Afin d'assurer le drainage des eaux circulant dans le remblai, il est prévu au-dessus du DEG un système composé d'un géoespaceur associé à un géotextile certifié ASQUAL. Les eaux sont ensuite recueillies dans des collecteurs Ø 600 mm en béton à âme acier, positionnés aux naissances des voûtes.

Aménagements intérieurs à l'ouvrage

Bien que l'ouvrage ne rentre pas dans le champ d'application de la circulaire 2000-63 du 25 août 2000 relative à la sécurité dans les tunnels, il est prévu un certain nombre d'aménagements de sécurité.

A chaque entrée et sortie de tube, une niche de sécurité est équipée d'un réseau d'appel d'urgence et d'extincteurs.

Figure 13
Regard siphonoïde
Siphoid manhole

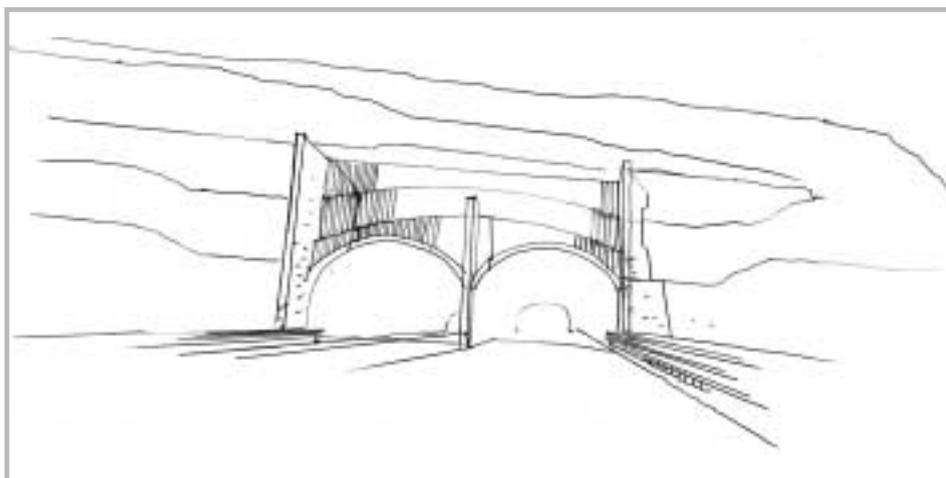
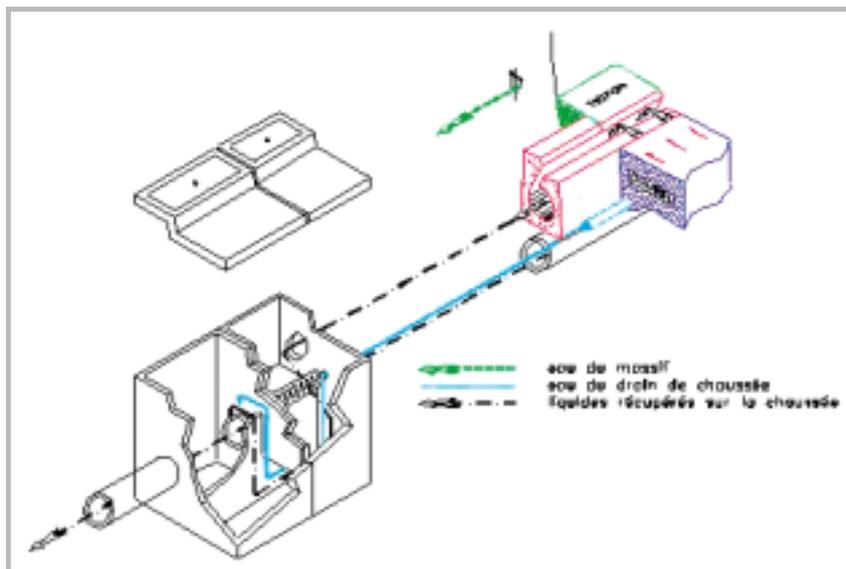


Figure 14
Croquis de la tête nord
Sketch of the northern portal



Afin d'éviter le risque d'étalement sur la chaussée de produits dangereux, l'ouvrage est équipé de caniveaux à fente. De manière à compléter ce dispositif et pour empêcher la propagation des produits enflammés dans le reste du réseau d'assainissement, il est prévu un regard siphonoïde au point bas de la tranchée couverte avant la sortie vers le viaduc (figure 13).

Pour permettre des interventions de désincarcération de véhicules en cas d'accident, il est prévu tous les 50 m des anneaux incrustés dans les piédroits.

Deux systèmes d'éclairage sont mis en place :

- ◆ plots lumineux de balisage dans les piédroits positionnés tous les 10 m ;
- ◆ éclairage principal régnant sur toute la longueur de l'ouvrage.

L'éclairage principal est allumé en permanence suivant des régimes de fonctionnement adaptés à la période nocturne ou diurne.

Tout le système d'éclairage est centralisé dans un local technique contenant, entre autres, un onduleur d'une autonomie de 30 minutes.

En cas de coupure électrique dépassant la capacité de l'onduleur, un groupe électrogène assure

l'alimentation électrique de l'ouvrage. Et en cas de perte définitive d'alimentation électrique de l'ouvrage, un panneau de fermeture de l'ouvrage et des feux de barrage de type R24 seront automatiquement actionnés.

L'ouvrage est aussi équipé d'un système de vidéo surveillance qui permet d'avoir une vision sur toute la longueur des deux tubes.

En partie intérieure de l'ouvrage, les piédroits, sur une hauteur de 5 m, reçoivent un système de peinture conforme aux recommandations de l'AFTES, avec une couche de finition de teinte blanche. Cette peinture est recouverte sur 2,50 m de hauteur des piédroits, d'un système anti-graffiti et anti-afiche.

Les terrassements - La géotechnique

Le volume total de déblais à réaliser avant de commencer le génie civil de l'ouvrage est de 180000 m³. Le point singulier de ces terrassements sera l'excavation de 35 m de déblais en bordure de falaise instable, d'une hauteur totale de 80 m avec un pendage quasi vertical.

La géologie du site étant disparate (basalte, scorie), l'excavation pourra se faire soit à l'aide d'explosifs, soit avec des moyens mécaniques.

Les descentes de charges, liées à l'importante hauteur de remblai, conduisent à des efforts horizontaux élevés appliqués aux terrains à l'arrière des piédroits ; il est donc primordial de minimiser les risques de décompression de cette partie de sol. Pour ce faire, l'utilisation de l'explosif est interdite sur une frange latérale de 4 m et sur une hauteur de 4,35 m, correspondant à la hauteur des piédroits latéraux. De plus, il est imposé un phasage de travaux qui interdit de laisser le front de terrassements libre plus de 2 semaines avant que soit réalisé soit une protection par clouage soit le béton de blocage.

En préalable à la réalisation des semelles de fondations il est prévu une campagne géotechnique complémentaire afin de déterminer les caractéristiques mécaniques du sol d'assise.

Au vu des résultats obtenus, s'il s'avère que les semelles s'appuient directement sur des scories peu compactes, deux solutions peuvent être envisagées :

- ◆ si la hauteur des scories est inférieure à 3 m, il est procédé à une purge et à la mise en œuvre d'un béton de substitution ;
- ◆ si la hauteur des scories dépasse 3 m, il est procédé à un renforcement de la zone considérée par injection d'un coulis de ciment.

La double voûte terminée, elle est recouverte sur toute sa longueur de la façon suivante :

- ◆ 2 m de remblai technique de type 0/63, au-dessus des clefs de voûtes ;
- ◆ une hauteur variable de remblai de masse de

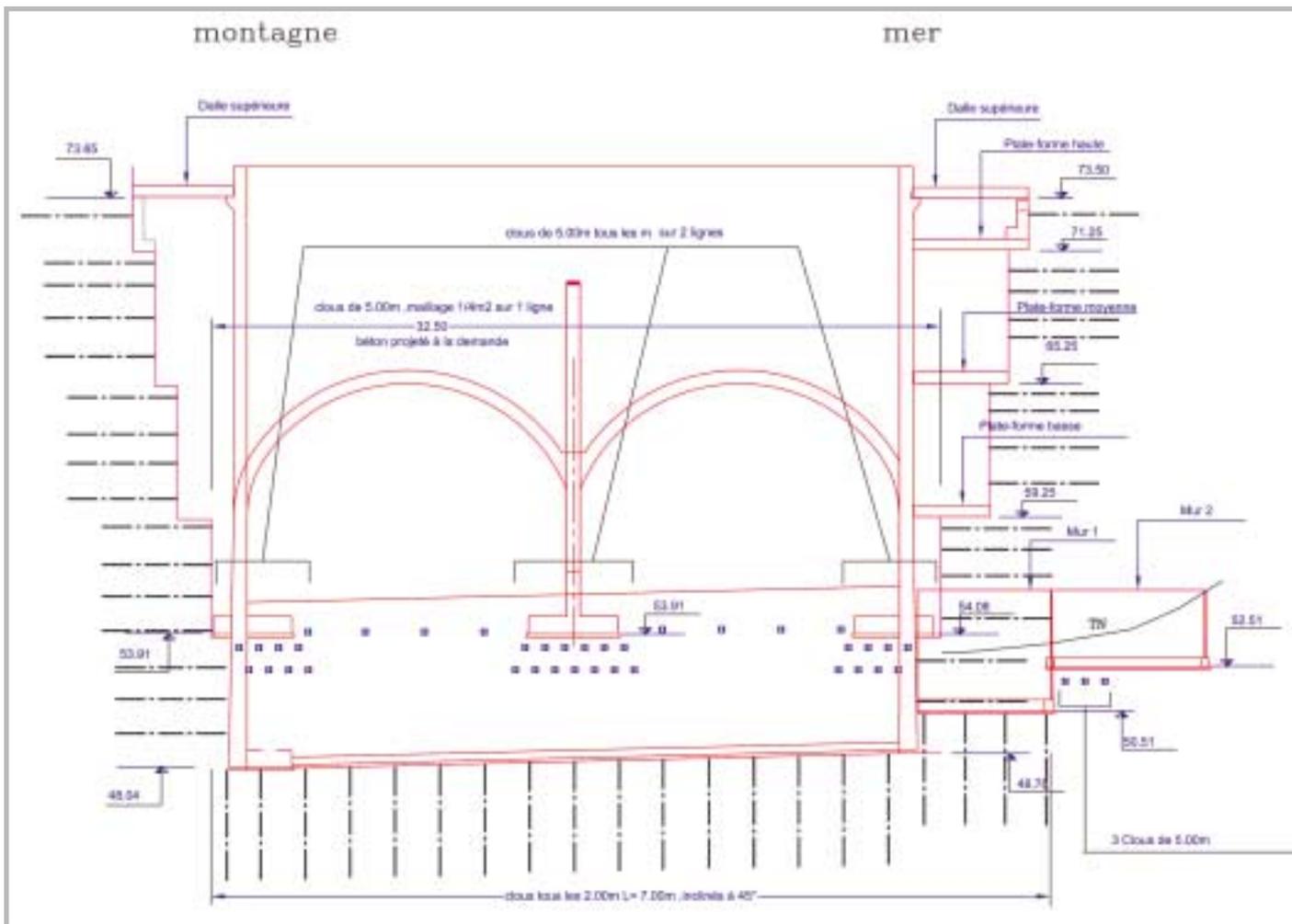


Figure 15
Plan de clouage
Nailing drawing

type 0/500, permettant d'atteindre la cote - 1 m par rapport au terrain naturel adjacent;

- ◆ 1 m de remblai étanche de type limon en partie supérieure afin de limiter les percolations d'eau mettant en charge le remblai;

- ◆ 30 cm de remblai de finition en terre végétale. Afin de stabiliser ce remblai en tête nord de l'ouvrage, correspondant au bord de la falaise, pour qu'il ne s'appuie pas sur le glacis en béton armé formant la tête, un remblai renforcé par géotextile est mis en place au-dessus de la voûte, sur 10 m de hauteur environ et sur 20 m de long. Les caractéristiques des matériaux le constituant sont les mêmes que celles du remblai technique.

La tête nord : vaste glacis et reconstitution de falaise

(figure 14)

La tête nord de l'ouvrage étant en bordure de falaise géologiquement instable et paysagèrement remarquable, le travail sur cette partie singulière a nécessité la plus grande attention.

L'objectif à atteindre était d'obtenir une bonne intégration dans le site tout en trouvant les moyens techniques permettant d'assurer la pérennité de la stabilité de l'ensemble.

L'intégration dans le site a été l'objet d'un travail élaboré de l'équipe des architectes Fr. Zirk et P.-G. Dezeuze, accompagnée du paysagiste B. Folléa. Le résultat est une tête d'ouvrage comprenant un glacis frontal au-dessus de l'entrée des tubes, prolongeant les lignes des différentes strates géologiques

adjacentes et réalisée à l'aide d'un béton matricé et coloré.

La jonction entre les deux grands murs latéraux et la trace des déblais dans la falaise est traitée par la réalisation d'une reconstitution de falaise à l'aide d'un système de plates-formes supportant une structure en treillis soudés et en béton projeté coloré, dans laquelle sont incrustés des blocs basaltiques.

La combinaison clouage et béton projeté est l'option retenue pour stabiliser à la fois la paroi des déblais au droit des murs latéraux et conforter la falaise en dessous de la culée C11. Ce confortement est réalisé sur 35 m de hauteur et 30 m en retrait de la falaise. Le maillage est adapté en fonction de la position des clous par rapport au bord de la falaise. Il varie de 1 clou pour 4 m² à 1 clou pour 8 m² et est effectué avec des aciers HA Ø 40 mm, d'une longueur de 3 à 5 m en fonction des terrains rencontrés (figure 15).

Les planches d'essai de béton colorés et de matrices

Afin de juger de la faisabilité technique et du rendu architectural des bétons matricés colorés des têtes de l'ouvrage, des planches d'essais ont été réalisées.

Dans un premier temps, afin de limiter la palette colorimétrique répondant à la volonté des architectes, un grand nombre d'éprouvettes 16 x 32 avec différents dosages de pigments a été réalisé. ▶

Photo 4
Matrice Cheyenne de chez Soceco Reckli utilisée pour les murs latéraux des têtes
Cheyenne die from Soceco Reckli used for the side walls of the portals



Photo 5
Photo des planches d'essais
Photo of test sections



► L'objectif était d'atteindre des teintes brunes rouges sombres.

Pour ensuite se rendre compte de l'effet de teinte en grande masse, il a été réalisé des planches d'essais de 2 m x 2 m, de 40 cm d'épaisseur, matriçées. Pour s'approcher un peu plus de la réalité, ces planches ont été coulées à la verticale avec une formulation de béton de résistance équivalente à celle définie pour l'ouvrage.

Afin d'étudier la possibilité de réaliser les corniches caniveaux du viaduc dans une couleur blanche, de petites planches d'essais ont été effectuées.

Les résultats de cette étude ont permis de mettre en exergue les éléments suivants :

- ◆ il est possible d'obtenir un béton ayant les colorations brunes souhaitées par les architectes ;
- ◆ la teinte blanche n'est pas atteinte, même en mettant de forts pourcentages de pigments et en utilisant du ciment blanc. La coloration noire du sable basaltique est prépondérante ;
- ◆ l'incorporation de pigments dans la formulation

du béton à hauteur de 5 à 6 % entraîne une chute de résistance ;

- ◆ on note une plasticité difficilement maîtrisable sur les petits volumes réalisés ;
- ◆ difficultés de décoffrage des matrices indentées très profondes et celles avec imitation de rocher à faibles dépouilles. A contrario, les matrices d'imitation de rocher à fortes dépouilles ont permis un décoffrage aisé ;
- ◆ constat de traces grisâtres incrustées dans le béton avec l'utilisation d'un jeu neuf de matrice ;
- ◆ décollage de certaines matrices des panneaux coffrants.

Suite à cette étude, l'option de colorer en pleine masse uniquement les têtes de la tranchée couverte a été retenue.

Pour mémoire, le surcoût constaté (suite à la consultation) d'un béton coloré dans les teintes brunes de l'étude par rapport à un béton classique est de l'ordre de 20 à 25 %.

Cette étude est aujourd'hui un outil qui permettra à l'entreprise retenue de mieux appréhender les difficultés qu'elle pourrait rencontrer en phase chantier (photos 4 et 5).

■ VERS LA CONSTRUCTION

Les quantités

Les principales quantités estimées sont les suivantes.

Pour le viaduc de Saint-Paul :

- béton de barrettes : 6 160 m³
- béton armé : 13 700 m³
- béton précontraint : 17 850 m³
- acier de précontrainte : 1 001 700 kg
- acier des bracons : 213 150 kg
- aciers passifs : 5 585 800 kg
- étanchéité principale du tablier : 20 690 m²
- barrières BN4-16 t : 1 600 m

Pour la tranchée couverte de Saint-Paul :

- déblais : 180 000 m³ (dont la moitié environ dans le marché des terrassements adjacents)
 - remblais renforcés par géosynthétiques : 14 410 m³
 - remblais (hors remblais renforcés par géosynthétiques) : 128 350 m³
 - béton projeté : 2 610 m³
 - béton armé : 9 080 m³
 - aciers passifs : 1 386 000 kg
- #### Pour la mise en sécurité des falaises :
- grillages pendus : 31 500 m²
 - filets pendus et filets déflecteurs : 32 550 m²

Les consultations des entreprises

Une première consultation des entreprises (appel d'offres restreint) a été engagée en février 2003. Le marché auquel elle a abouti a fait l'objet d'un

référé précontractuel et le marché a été annulé (erreur de forme dans l'appel à candidatures).

Une seconde consultation a été relancée en mars 2005, qui a conduit à l'attribution du marché au groupement Razel - Eiffage TP - Matière - Eiffel - Bilfinger Berger - Heaven Climber. Le début des travaux est programmé pour le premier trimestre 2006.

■ RÉFÉRENCE

[1] D. de Matteis, D. Davi, H. Oudin-Hograindleur. "Le projet du viaduc de Saint-Paul à la Réunion". *Bulletin Ouvrages d'art* n° 43, Setra. Septembre 2003.

ABSTRACT

Section 2 : Saint-Paul / county road RD10. Saint-Paul viaduct and cut and cover trench

H. Oudin-Hograindleur, M. Brethomé, M. Kahan, Fr. Zirk

The viaduct of Saint-Paul is the largest bridge of "Route des Tamarins". Over 756 m, it raises the highway from sea level up to the plateau overseeing the city of Saint-Paul. It will cross or fly over a constrained environment, short of space, historical – close to the "cave of the first Frenchmen", and of ecological importance. Because it will be seen from many places, its design has been a long and shared process. At its upper-south end, the viaduct runs into a cut and cover trench that restores the appearance of the cliff. These two overlapping structures were assembled in a single construction works contract.

RESUMEN ESPAÑOL

Tramo 1 : Saint-Paul / Carretera Departamental 10. El viaducto y el falso túnel de Saint-Paul

H. Oudin-Hograindleur, M. Brethomé, M. Kahan y Fr. Zirk

El viaducto de Saint-Paul constituye la estructura más importante de la Carretera de los Tamarindos. Este viaducto permite a la carretera elevarse sobre la meseta que domina la ciudad de Saint-Paul y, se inscribe en un entorno que presenta limitaciones, tanto en materia de espacio como de respeto del sitio urbano, histórico (en las cercanías de la cueva de los primeros Franceses) y ecológico que transcurre o domina. Debido a que su presencia será destacada, su diseño fue un proceso largo y compartido. En su extremo superior y Sur, el viaducto penetra en un falso túnel que reconstituye el acantilado. Ambas estructuras imbricadas fueron reunidas en un contrato único de obras.

Section 1 : Saint-Paul

Les viaducs de la Savane

Les viaducs de la Savane permettent le franchissement des ravines Fleurimont, Petit-Bras Canot et Bras-Boucan Canot. Ces ouvrages en béton précontraint de hauteur constante et construits par encorbellements successifs traversent avec discrétion le site de la savane du Cap-la-Houssaye, paysage unique à la Réunion, portant la route sur deux tracés parallèles et sinueux, offrant une grande transparence visuelle. Totalisant un kilomètre de tablier, c'est un des premiers gros marchés en travaux sur l'opération.

■ CONTEXTE - DÉROULEMENT DU PROJET

Dans le projet de la Route des Tamarins au niveau de la savane du Cap-la-Houssaye, les viaducs de Fleurimont et de Bras-Boucan Canot, l'ouvrage de Petit-Bras Canot, n'ont pas toujours existé. Lorsque le projet a été présenté à la première enquête publique, avec un tracé "haut", il franchissait les ravines Fleurimont et Bras-Boucan Canot sur la partie amont de leur lit; des remblais et de simples ouvrages de rétablissement hydraulique étaient suffisants pour passer ces ravines. La commission d'enquête ayant préconisé un retour à un tracé plus aval, en préservant la qualité paysagère du site, des ouvrages sur les ravines Fleurimont et Bras-Boucan Canot devenaient nécessaires. L'ouvrage sur la ravine Petit-Bras Canot, en revanche, aurait pu être limité à un ouvrage hydraulique; la volonté de réaliser une route la plus "transparente" possible, tant en termes visuels qu'en termes de cheminements, a cependant conduit à réaliser un véritable ouvrage sur cette ravine longeant la croupe du Cap-la-Houssaye.

Le tracé dans cette zone de savane a été calé de façon à ce que les chaussées séparées, au niveau des ouvrages, soient :

- ◆ parallèles, de façon à conserver un purisme des perspectives, contribuant à la sobriété de la route;
- ◆ suffisamment écartées, en plan comme en profil en long, pour donner suffisamment de transparence visuelle entre les tabliers des ouvrages, les appuis, afin que la route ne crée pas un masque dans le paysage.

Les visualisations numériques du projet réalisées grâce au logiciel OKTAL, sur lequel l'ensemble de la Route des Tamarins a été modélisé, ont permis de déterminer les espacements visuellement satisfaisants, 30 m en plan, 8 m en hauteur.

Toujours dans un souci de discrétion du projet, dans un souci d'économie également, il a été convenu dès le début des études préliminaires d'ouvrages d'art, pour les deux viaducs, de retenir la même structure et, si possible, les mêmes proportions : même hauteur de tablier, même portée principale. L'analyse architecturale faite des solutions de coût

équivalent étudiées à l'étude préliminaire d'ouvrage d'art a dégagé les points essentiels suivants : privilégier les solutions dont le tablier est fin (recherche de transparence), conserver le plus possible des travées régulières, prendre en compte les proportions d'ensemble des travées, de la profondeur de la ravine.

D'où la solution de viaducs retenue, avec un tablier de hauteur constante égale à 2,80 m et une portée principale de 60 m.

Les piles ont été conçues avec ce même souci de sobriété, formées de simples fûts parallélépipédiques, s'affinant vers le tablier. Les parements des fûts sont matricés. Pour des raisons d'économie, la volonté de l'architecte de réaliser des piles en béton coloré (tons brun foncé) n'a pas été suivie.

L'une des difficultés techniques du projet a été l'appui de la culée C0 côté montagne du viaduc Fleurimont, à cheval sur une passe de basalte et une passe de scories. Plusieurs solutions de confortement et de solidarisation des deux zones avaient été imaginées, mais c'est finalement en chantier que s'est résolu ce problème par la mise en œuvre d'un béton cyclopéen sur toute l'assise de la culée.

Dès les études préliminaires, il était envisagé de regrouper, dans un même marché de travaux, les viaducs Fleurimont et Bras-Boucan Canot, afin que les entreprises puissent optimiser leur matériel entre ces deux ouvrages identiques.

L'allotissement de l'ouvrage de Petit-Bras Canot a été délicat :

- ◆ marché séparé;
 - ◆ ouvrage inclus dans le marché du tunnel du Cap-la-Houssaye, auquel il était adjacent;
 - ◆ ouvrage inclus dans le marché des viaducs de Fleurimont et Bras-Boucan Canot, qui consistait déjà en des travaux du même type (ponts) et qui traitait déjà le problème de la proximité du tunnel du Cap-la-Houssaye (via le viaduc Fleurimont).
- C'est cette dernière solution qui a été retenue et le marché des viaducs de la Savane lancé comportait donc : Fleurimont, Bras-Boucan Canot et Petit-Bras Canot.

■ PRÉSENTATION GÉNÉRALE

Le groupement d'entreprises demathieu & bard (mandataire) et Grands Travaux de l'Océan Indien (G.T.O.I.) a été déclaré adjudicataire du marché des viaducs de la Savane le 12 octobre 2004.

Tableau I
Intempéries maximales prévisibles
Maximum foreseeable bad weather conditions

| Nature du phénomène | Intensité limite | Durée |
|-------------------------------|------------------|-----------|
| Vitesse du vent | 60 m/s | 1 heure |
| Précipitations (pluie, orage) | 400 mm | 24 heures |

/ RD10

Ces ouvrages sont situés sur la partie de la Route des Tamarins dont la DDE de la Réunion, service des Grands Travaux a la maîtrise d'œuvre.

En phase d'appel d'offres, les ouvrages comprenaient deux viaducs à deux tabliers parallèles en béton précontraint construits par encorbellement à partir des piles – les viaducs de Fleurimont côtés montagne et mer et de Bras-Boucan Canot côtés montagne et mer – et deux ponts-dalles à larges encorbellements en béton précontraint construits sur étaieage et cintres, les ouvrages de Petit-Bras Canot.

Dans son offre, le groupement d'entreprises a proposé :

- ◆ de transformer les ponts-dalles en ponts à tabliers mixtes acier-béton de type bipoutre. La charpente métallique de cette variante a été réalisée par l'entreprise Berthold ;

- ◆ de limiter les longueurs des parties sur cintres à proximité des culées en modifiant le découpage en voussours.

L'ordre de service de commencer les travaux a été donné le 17 janvier 2005, à la fin de la période de préparation de 3 mois.

Le délai de réalisation est de 32 mois, auxquels il faut ajouter la période de préparation de trois mois. Les portées des ouvrages en béton précontraint sont les suivantes :

- ◆ viaduc de Fleurimont montagne : 32 – 46 – 62 – 62 – 37 m ;

- ◆ viaduc de Fleurimont mer : 45 – 62 – 62 – 45 m ;

- ◆ viaduc de Bras-Boucan Canot montagne : 37 – 62 – 62 – 62 – 50 – 35 m ;

- ◆ viaduc de Bras-Boucan Canot mer : 50 – 62 – 62 – 50 – 35 m.

Les axes d'implantation sont définis sur des courbes :

- ◆ viaduc de Fleurimont montagne : cercle de rayon 975 m ;

- ◆ viaduc de Fleurimont mer : cercle de rayon 945 m ;

- ◆ viaduc de Bras-Boucan Canot Montagne : alignement droit, clothoïde et cercle de rayon 596,530 m ;

- ◆ viaduc de Bras-Boucan Canot Mer : alignement droit, clothoïde et cercle de rayon 590 m.

Les dévers sont variables entre 0 et 3,2 %.

Autres particularités du site :

- ◆ l'île de la Réunion a été créée par une activité volcanique de point chaud. Elle est située dans une zone de sismicité 0 ;

- ◆ l'île est située dans une zone soumise aux cyclones pendant la période allant du 15 novembre au 15 avril.

La pression horizontale du vent sur l'ouvrage en



Photo 1
Réalisation
d'une pile

Construction
of a pier

phase travaux et en phase de service a été prise égale à 4 000 N/m².

Pour les équipements, les effets du vent ont été calculés en appliquant les règles Neige et Vent dans leur dernière version pour une zone 5, soit un vent de 240 km/h.

Le CCAP définit les intensités limites des intempéries et autres phénomènes météorologiques naturels pour le mode d'évaluation des ouvrages (tableau I).

D'autres valeurs de ces phénomènes naturels donnent droit à des prolongations de délais.

■ RÉALISATION DES VIADUCS EN BÉTON PRÉCONTRAIT

Piles

Les piles sont fondées superficiellement. Elles sont creuses et rectangulaires. Elles ont un fruit constant de 1 horizontalement pour 30 verticalement sur les quatre faces.

Les parois sont matricées et ont une épaisseur minimale constante sur toute la hauteur, de 450 mm (photo 1).

Les piles sont réalisées par levées de 4,50 m. Les chevêtres ont une épaisseur totale de 4,50 m.

Ilès Amami



DIRECTEUR GRANDS PROJETS OCÉAN INDIEN demathieu & bard

Jacques Daquin

RESPONSABLE MÉTHODES TP DIRECTION SCIENTIFIQUE demathieu & bard

Christophe Maître

DIRECTEUR DES TRAVAUX demathieu & bard

Jacques Mossot



DIRECTEUR SCIENTIFIQUE demathieu & bard

Hélène Oudin-



Hograindleur CHEF DE PROJET DE LA SECTION 1 DDE de la Réunion

Photo 2
Centrale à béton
sur le site
*Concrete mixing
plant on site*



Figure 1
Vue en plan
des installations
de chantier
des viaducs
de Fleurimont
*Plan view
of construction plant
for the Fleurimont
viaducts*

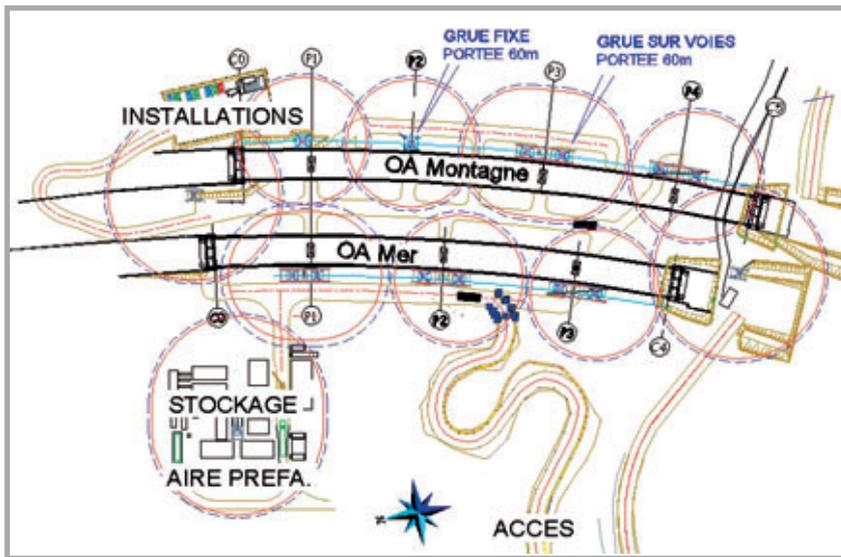


Photo 3
Vue d'ensemble
du chantier
*General view
of the site*



Ils sont évidés longitudinalement dans l'axe de la pile sur une profondeur de 1,50 m avec une largeur en tête de 2,30 m et de 1,60 m dans la partie inférieure.

Les dimensions en plan des chevêtres en tête des piles sont égales à 6,30 m par 3,00 m sur toutes les piles.

Pour permettre une réalisation des différentes parties des ouvrages selon les seules contraintes du chantier, le groupement d'entreprises a choisi de monter une centrale à béton sur le site (photo 2).

Appareils d'appui et stabilisation du fléau en phase de construction

Les appareils d'appui sont du type appareils d'appui à pot de 9000, 13000 ou 14000 kN sur piles, 5000 kN sur culées.

La stabilité des fléaux en phase de construction est assurée par des appuis provisoires et des câbles de précontrainte de stabilité.

La stabilité des fléaux, et en particulier la précontrainte de clouage, est justifiée par application du guide de conception du Setra "Ponts en béton précontraint construits par encorbellements successifs" de juin 2003.

Par rapport aux règles définies dans le complément du *Bulletin Technique* n° 7 du Setra, les nouvelles règles de justification imposent de dimensionner la précontrainte de clouage en vérifiant le non décollement total sur chacun des appuis provisoires sous les combinaisons d'équilibre statique.

La stabilité est assurée grâce à six câbles 19T15S classe 1860 d'environ 8,40 m de longueur, ancrés d'un côté sur l'extrados du tablier dans des plots

d'ancrage préfabriqués et de l'autre sous le che-
vêtre.

Les dimensions laissées libres en tête des piles
sont assez faibles (deux rectangles de 2 m trans-
versalement par 3 m longitudinalement). La place
occupée par les appuis provisoires et des appuis
définitifs en phase de construction ne permet pas
de disposer des vérins en tête des piles.

Le groupement avait proposé de réaliser les fléaux
sur des appuis constitués de boîtes à sable. Les
calculs menés en appliquant les nouvelles règles
du Setra donnant des contraintes de compression
importantes sur ces boîtes à sable, l'entreprise a
proposé de réaliser ces appuis provisoires en bé-
ton armé et de prévoir des appuis à pot injectables.
Cette solution autorise un vérinage du tablier pour
retirer les blocs de béton sans utilisation de vérins
hydrauliques. Elle peut permettre, si nécessaire,
de compenser des petits tassements.

Tabliers

Les fléaux sont découpés en :

- ◆ voussoirs sur pile : 8 m de longueur ;
- ◆ voussoirs courants : 3,20 m de longueur ;
- ◆ voussoirs de clavage : 2,80 m de longueur en-
viron.

Le découpage des fléaux de 62 m de longueur est
donc de : un voussoir sur pile, 8 paires de vous-
soirs courants et un voussoir de clavage de 2,80 m.
La hauteur du tablier est égale à 2,80 m, soit un
élancement de 1/22,1.

Les premiers calculs faits par le bureau d'études
ont montré que les contraintes de cisaillement dans
les âmes étaient trop importantes. Le maître d'œuvre
a choisi d'épaissir les âmes à 600 mm et de des-
cendre deux paires de câbles de fléau dans les
âmes des deux premières paires de voussoirs cou-
rants pour réduire l'effort tranchant.

L'épaisseur minimale des hourdis supérieur et in-
férieur est de 250 mm.

La largeur des voussoirs est constante et égale à
13,80 m.

Le planning de chantier nécessite la mise en pla-
ce de quatre grues à tour pour permettre la réali-
sation de quatre fléaux en même temps. Les tabliers
côté montagne et côté mer sont réalisés simulta-
nément (figure 1 et photo 3).

Pour pouvoir monter les deux équipages mobiles,
de part et d'autre d'une pile, en même temps, le
chantier a choisi de réaliser un voussoir sur pile de
8 m de longueur.

Les voussoirs sur pile sont réalisés sur une pla-
te-forme suspendue en tête de chevêtre de pile per-
mettant la mise en place de leurs coffrages extérieurs.
Au droit des têtes de pile, la partie inférieure du
voussoir sur pile est réalisée à l'aide d'une pré-
dalle collaborante.

Cette prédalle est posée sur les quatre appuis pro-
visoires assurant l'encastrement du fléau en pha-



Photo 4
Pose de la dalle
préfabriquée servant
de fond de coffrage
du voussoir sur pile
au droit de l'entretoise
*Laying the prefabricated
slab as a base
for the segment formwork
on a pier at the brace level*



Photo 5
Plate-forme
et coffrage extérieur
du voussoir sur pile
*Platform and external
formwork of segment
on pier*



Photo 6
Ferrailage
d'un voussoir sur pile
*Reinforcement
for a segment on pier*

Photo 7
Montage
des équipages mobiles
Assembly
of mobile rigs



Photo 10
Ferrailage d'une partie sur cintre du tablier
Reinforcement of a part of the deck centring

Photo 8
Fléau en cours
de construction
Deck section in course
of construction



se de construction sur la tête de pile. Les appareils à pot servant à l'appui du tablier en phase d'exploitation sont posés en même temps que les appuis provisoires (photos 4, 5 et 6).

Après le montage des coffrages extérieurs et du ferrailage, chaque voussoir sur pile est bétonné en deux autres phases :

- ◆ bétonnage de la partie inférieure, jusqu'au niveau de la nervure transversale supérieure dans laquelle sont ancrés les câbles de précontrainte extérieure ;

- ◆ bétonnage de la partie supérieure du voussoir sur pile comprenant les tubes déviateurs et les ancrages de la précontrainte extérieure.

Le chantier a prévu deux outils (plates-formes et coffrages) pour la réalisation des voussoirs sur piles

Photo 9
Bétonnage
d'un voussoir
Segment
concreting



et deux paires d'équipages mobiles (photo 7). Les voussoirs sont bétonnés à la benne (photos 8, 9, 10 et 11).

La précontrainte se répartit entre trois familles de câbles :

- ◆ la précontrainte de fléau intérieure au béton en câbles 12T15S de classe 1860 ;
- ◆ la précontrainte de clavage intérieure au béton en câbles 12T15S ;
- ◆ la précontrainte de continuité extérieure au béton en câbles 19T15S.

Après le clavage du fléau avec le fléau précédent ou la partie bétonnée sur cintre pour les travées de rive, les opérations de construction suivantes sont :

- ◆ mise en tension des câbles éclisse intérieurs au béton, détension des câbles de clouage ;
- ◆ matage au-dessus des appareils d'appui à pot injectables, puis vérinage d'environ 10 mm des appareils d'appui pour pouvoir enlever les appuis provisoires.



Photo 11
Vue d'ensemble
du viaduc de Fleurimont
en cours de construction
General view
of Fleurimont viaduct
in course of construction

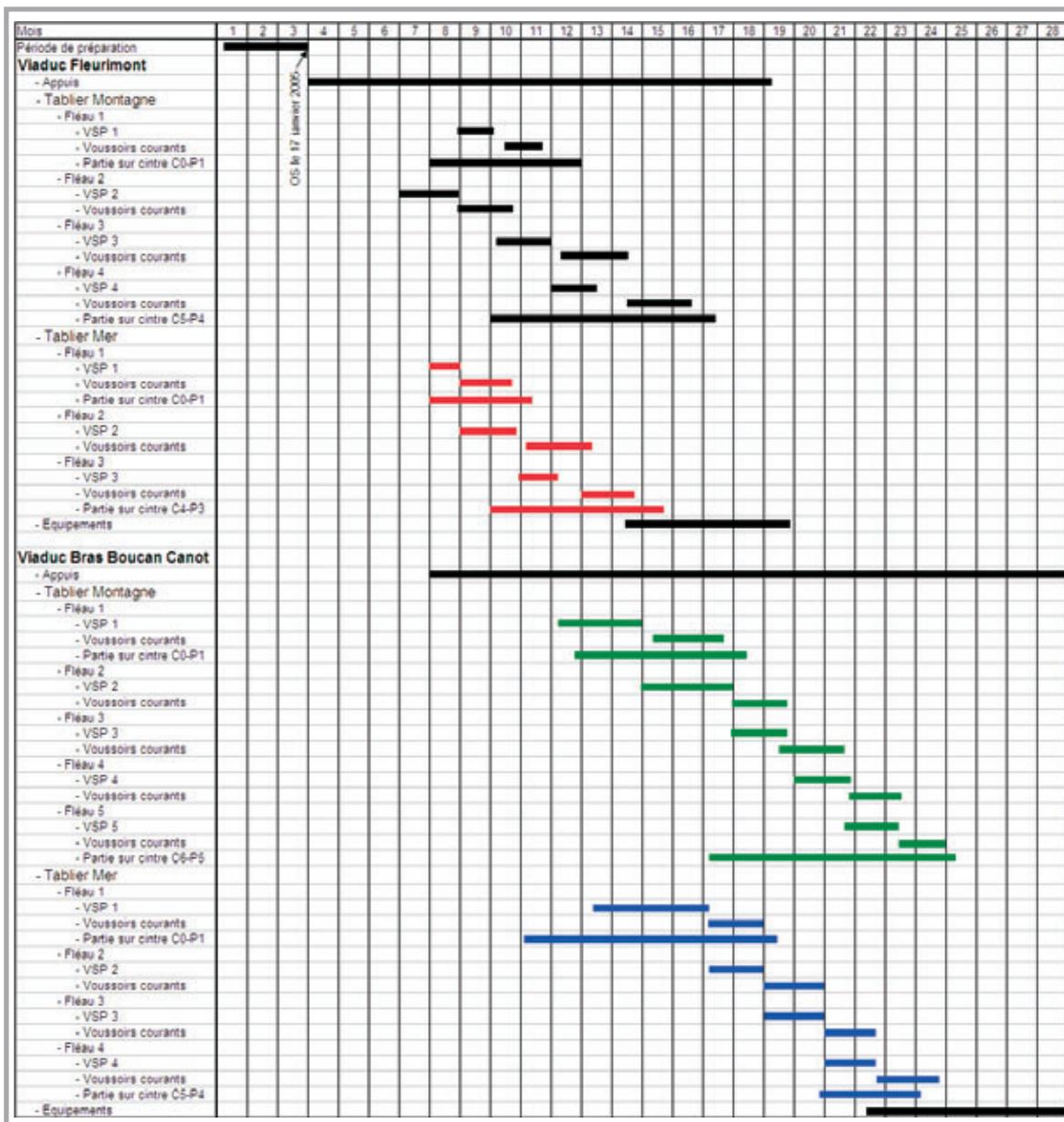


Figure 2
Planning prévisionnel
des viaducs

Projected work
schedule
for the viaducts

PLANNING DE RÉALISATION DES VIADUCS EN BÉTON PRÉCONTRAIT

Voir la figure 2.

QUANTITÉS PRÉVISIONNELLES PRINCIPALES DES VIADUCS

Voir le tableau II.

| Désignation | Unités | Viaducs | |
|-------------------------------|----------------|------------|-------------------|
| | | Fleurimont | Bras Boucan Canot |
| Armatures passives des appuis | t | 630 | 1080 |
| Armatures passives du tablier | t | 800 | 1040 |
| Précontrainte intérieure | t | 101 | 126 |
| Précontrainte extérieure | t | 50 | 74 |
| Béton des appuis | m ³ | 4600 | 6650 |
| Béton du tablier | m ³ | 5000 | 6150 |

Tableau II
Les principales quantités

Main quantities

LES PRINCIPAUX INTERVENANTS

Maître d'ouvrage

Région Réunion
Ministère de l'Équipement, des Transports et du Logement

Maître d'œuvre

Direction départementale de l'Équipement Réunion - Service des Grands Travaux

Architectes

Yves Faup, Frédéric Zirk, Pierre-Guillaume Dezeuze

Bureau d'études techniques du maître d'œuvre

Arcadis - Agence de Toulouse

Entreprises

- demathieu & bard (mandataire)
- Grands Travaux de l'Océan Indien - GTOI

Bureau d'études de l'entreprise

Secoa

Autres sous-traitants

- Charpente métallique : Berthold
- Béton : fabrication par le chantier
- Armatures passives : SAMT
- Précontrainte : Spie Précontrainte et VSL
- Appareils d'appui : ETIC
- Coffrages des piles : BS Industrie
- Coffrages des voussoirs sur pile : Simpra
- Equipages mobiles : ERSEM

ABSTRACT

Section 1 : Saint-Paul / RD10. The "Savane" viaducts

I. Amami, J. Daquin, Ch. Maître, J. Mossot, H. Oudin-Hograindeur

The "Savane" viaducts cross over the ravines Fleurimont, Petit-Bras Canot and Bras-Boucan Canot. These bridges, of constant height prestressed box-girder concrete deck, run through the savannah area, a unique landscape in Re-union Island, in a modest and unobtrusive way. They carry the highway on two separate and parallel winding lines that offer maximum transparency. With one kilometre of concrete deck, it is one of the first major contracts of "Route des Tamarins" under construction.

RESUMEN ESPAÑOL

Tramo 1 : Saint-Paul / Carretera Departamental 10. Los viaductos de la Sabana

I. Amami, J. Daquin, Ch. Maître, J. Mossot y H. Oudin-Hograindeur

Los viaductos de la Sabana permiten el franqueo de los barrancos Fleurimont, Petit Bras Canot y Bras Boucan Canot. Estas estructuras de hormigón pretensado de altura constante y construidas por voladizos sucesivos transcurren con discreción el paraje de la sabana del Cabo la Houssaye, paisaje único en La Reunión, que soporta la carretera en dos trazados paralelos con muchas curvas, y que permite obtener una gran transparencia visual. Al totalizar un kilómetro de tablero, corresponde a uno de los primeros contratos importantes actualmente en obra para la operación.

Section 1 : Saint-Paul / RD10 Tunnel du Cap-la-Houssaye

Le tunnel du Cap-la-Houssaye est situé au nord-ouest de l'île de la Réunion. Il franchit une colline, relief radial de l'île, dans la "savane". Il comprend deux tubes à trois voies de circulation, de 14 m d'ouverture chacun, de 368 m de longueur totale pour le tube ouest et 323 m pour le tube est. La couverture maximale est de 39 m. Le tunnel est creusé dans les brèches volcaniques de Saint-Gilles, de faible résistance mécanique mais de bonne tenue. L'excavation sera assurée par des moyens mécaniques. Les terrassements de tête ont été réalisés au second semestre 2004. Les travaux du génie civil du tunnel seront engagés fin 2005 pour une durée de 2,5 ans. Les équipements seront réalisés mi-2008. La mise en service est prévue début 2009.

■ CONTEXTE GÉNÉRAL

Quelques éléments historiques

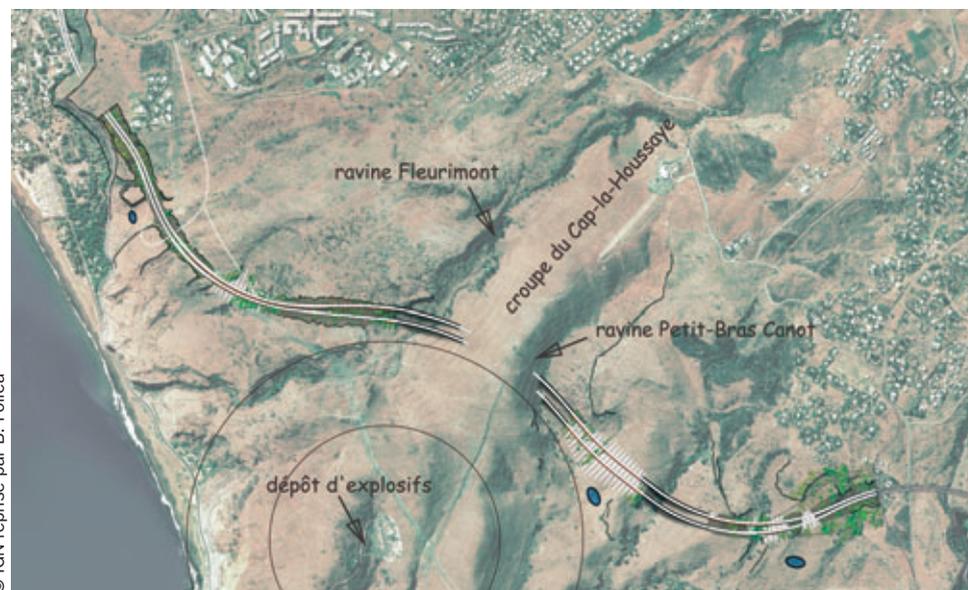
Le tunnel du Cap-la-Houssaye est sans doute, avec le viaduc de Saint-Paul, l'ouvrage le plus ancien du projet de la Route des Tamarins (Autoroute des Hauts de l'Ouest à l'origine). Quels que soient les tracés de la route dans la savane du Cap-la-Houssaye, la "croupe" du Cap-la-Houssaye (figure 1) est toujours apparue comme un élément caractéristique de la morphologie du paysage. La qualité du site de la savane reposant avant tout sur son espace, sa végétation de savane (seul espace désertique de savane ouverte de l'île – la graminée est l'*heteropogon contortus*), et sa morphologie, avec en particulier cette colline visible de très loin, depuis la route, depuis l'océan, un élément constant de l'histoire des mouvements du tracé de la route dans la savane a été de préserver la ligne de crête de cette "colline"; les solutions où elle serait brisée par un large déblai ont donc été d'emblée écartées, de même que celles où il aurait été tenté de reconstituer cette ligne par une tranchée couverte remblayée.

De premières études géologiques du tunnel dans cette zone de la croupe ont été menées dès 1997, par le Laboratoire régional des Ponts et Chaussées d'Aix-en-Provence (LRPC), puis en concertation également avec le Centre d'études des tunnels (CETU) du ministère de l'Équipement.

Avant qu'une étude préliminaire ait pu être finalisée sur le premier tracé, relativement aval, du tunnel, la position du tracé de la route s'était retirée bien en amont de la croupe du Cap-la-Houssaye (1999) et de nouvelles études d'un tunnel amont se sont engagées, jusqu'au niveau étude préliminaire cette fois. Sont alors survenues les conclusions de la commission d'enquête publique (2001) et la position du tracé est revenue vers l'aval,

juste un peu plus en aval que la position d'origine. Une part des reconnaissances géologiques et géotechniques de 1997/1998 a cependant pu être exploitée pour ce nouveau tunnel. La position du tracé s'est là stabilisée et, sur cette base, a été mené le projet présenté à ce jour.

Le tunnel du Cap-la-Houssaye est le seul tunnel de la Route des Tamarins (section 1 comme section 2); il est le premier tunnel routier qui sera creusé à la Réunion depuis de longues années.



Le tunnel, ouvrage de la Route des Tamarins

Le tunnel du Cap-la-Houssaye est situé sur le tronçon de la première section de la Route des Tamarins, entre le diffuseur de Plateau-Caillou au nord et le diffuseur de l'Eperon au sud. Au niveau de ce tronçon, les chaussées mer et montagne sont décalées en plan de 30 m et en profil en long de

Pierre Azemard
CHEF DU SERVICE GÉOLOGIE-
TERRASSEMENTS
LRPC Aix-en-Provence

Patrick Bienfait
DOCTEUR EN GÉOLOGIE, CHEF
DE PROJET
Scetauroute

Eric Boisguerin
INGÉNIEUR SÉCURITÉ-EXPLOITATION
Scetauroute

Joël Cadudal
CHARGÉ DU MARCHÉ DU TUNNEL
DDE de la Réunion

Michèle Femeland
INGÉNIEUR
CETU

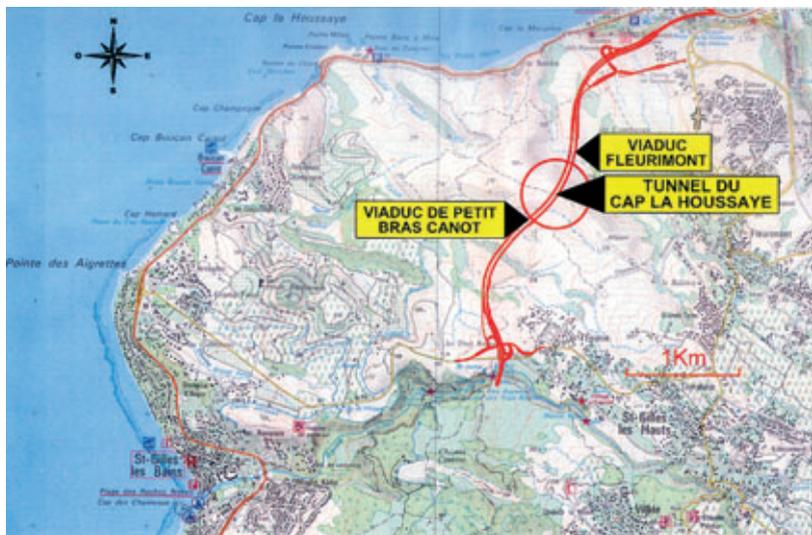
Pierre Hingant
EXPERT MÉTHODES ET TRAVAUX
Scetauroute

**Hélène Oudin-
Hograindleur**
CHEF DE PROJET PREMIÈRE SECTION
DDE de la Réunion

Alain-Alexandre Robert
INGÉNIEUR
Cetu

Figure 1
Cap-la-Houssaye -
Vue aérienne
Cap La Houssaye -
Aerial view

Figure 2
Plan
de situation
Location
drawing



© C. Busson (Scetauroute)

Photo 1
La colline du cap
La Houssaye, versant
nord. Le site du tunnel
est au droit des pistes
Cap La Houssaye hill,
northern slope.
The tunnel site
is at the level
of the tracks



© P. Bienfait (Scetauroute)

► 8 m. Ce décalage de 30 m permet de respecter une distance d'un diamètre de tube entre les tubes du tunnel.

La croupe du Cap-la-Houssaye étant marquée, de part et d'autre, par deux ravines, la ravine Fleurimont au nord et la ravine Petit-Bras Canot au sud, deux viaducs encadrent "naturellement" le tunnel, le viaduc Fleurimont et l'ouvrage de Petit-Bras Canot (figure 2). Les culées côté tunnel de ces ouvrages étant extrêmement proches des têtes, des contraintes de conception et de chantier ont dû être intégrées d'une part au niveau des viaducs et d'autre part au niveau du tunnel.

La longueur couverte du tunnel est imposée ici par la volonté de ne pas créer d'interruption dans la morphologie du Cap-la-Houssaye : les tranchées d'accès aux fronts d'attaque sont donc en particulier remblayées suivant la morphologie existante avant travaux.

Le seul dépôt d'explosifs (civil) de l'île de la Réunion est situé en aval du tracé de la Route des Tamarins, à l'ouest du Cap-la-Houssaye (figure 1). Un périmètre de protection existe autour de ce dépôt : la zone de protection est scindée en deux cercles dont le centre est le dépôt. Le périmètre le plus contraignant est un cercle de 376 m de rayon (zone 1) mais les interdictions n'interfèrent pas avec le projet. Un deuxième cercle de 752 m délimite une deuxième zone. A l'intérieur de cette zone,

les circulations de piétons et d'engins de chantier sont autorisées, mais les installations de chantier par exemple ne le sont pas. Ces contraintes de protection ont été prises en compte dans un premier temps au niveau du calage du tracé de la route, et ensuite au niveau des limites d'emprise et des circulations de chantier.

Le respect des règles de visibilité dans le tunnel a imposé les rayons en plan du tracé à ce niveau : 975 m pour le tube montagne et 945 m pour le tube mer, rayons permettant de vérifier en particulier le dégagement latéral des vues nécessaire dans un tunnel courbe.

Les caractéristiques détaillées de l'ouvrage sont données dans les paragraphes qui suivent.

Les nombreux intervenants du projet

La maîtrise d'œuvre du tunnel du Cap-la-Houssaye (études et travaux) est assurée par la DDE de la Réunion - Service Grands Travaux, qui sous-traite les études spécialisées à des intervenants spécifiques.

Dès les premiers tracés du tunnel, les études géologiques de celui-ci ont été menées par le LRPC d'Aix-en-Provence. Le CETU est intervenu pour effectuer les études de conception des différents tunnels envisagés ; c'est ainsi qu'il a réalisé l'étude préliminaire du tunnel du Cap-la-Houssaye finalement retenu. Les études de projet ont été menées par la société Scetauroute - Direction Tunnels et Travaux Souterrains, contrôlées par le CETU et par le LRPC pour la partie géologie. Les pièces techniques des dossiers de consultation, pour les terrassements des têtes de tunnel, pour l'excavation et le génie civil du tunnel, pour les équipements du tunnel et de la tranchée couverte de Saint-Paul, le contrôle des études d'exécution correspondantes sont réalisées par Scetauroute.

■ GÉOLOGIE

Les brèches de Saint-Gilles

Le tunnel traverse la colline du Cap-la-Houssaye, au milieu de la savane, au nord-ouest de l'île (figure 2 et photo 1). L'ouvrage est creusé dans les tufs volcaniques de "Saint-Gilles". Il s'agit de brèches de nature basaltique, constituées de blocs de toutes tailles (millimètres à mètres) plus ou moins bien cimentés dans un matériau fin. La cohésion du matériau est très bonne mais les résistances mécaniques restent faibles et dispersées.

Cette colline est radiale sur le cône de l'ancien volcan du Piton des Neiges et forme une ride allongée dans le même sens que la pente générale du versant. Ces brèches résultent d'avalanche de débris issus de glissements du flanc du volcan. La ruptu-

re brutale d'une portion de l'édifice volcanique a entraîné une grande quantité de matériaux selon un mécanisme d'avalanche. Les matériaux se sont déposés à la base du versant et sous la mer. L'intense remaniement des matériaux d'origine au cours de l'avalanche a conduit à une pulvérisation des roches jusqu'à l'échelle des minéraux et à un mélange des divers faciès préexistants. Ces brèches sont donc des matériaux particuliers formés de la juxtaposition d'éléments de coulées de laves de toute nature et de toutes tailles (millimètres à mètres) dans un ciment "cendreux" constitué de roche pulvérisée.

On distingue deux faciès (photos 2 et 3) :

- ◆ le faciès "matrice" est un mélange polygénique, non classé, non stratifié et hétérogène, avec prédominance d'éléments fins (aspect proche des coulées boueuses). Le ciment représente souvent 50 % et plus de la roche ;

- ◆ le faciès "blocs" constitue des panneaux plus résistants, de dimension métrique à décimétrique, avec une part prépondérante de blocs de basalte, voire de pans de coulées, scories, pyroclastites, ayant été transportés sans grande déformation au cours de l'avalanche. Ces panneaux présentent un ciment beaucoup plus compact et résistant que celui du faciès précédent.

Le faciès matrice apparaît nettement dominant sur le site du tunnel.

Identification des matériaux, analyses minéralogiques et pétrographiques

Le ciment a été examiné en lames minces par l'Université de Saint-Denis de la Réunion en 1998. Les fragments de roche initiale, de nature diverse, sont fissurés jusqu'à l'échelle du minéral, le ciment s'infiltrant entre les grains et dans les fissures des grains. Le faciès bloc présente un ciment entièrement constitué d'éléments provenant de la désagrégation des grains environnants, petits fragments rocheux ou minéraux. Le faciès matrice présente un ciment plus hétérogène comportant également une forte proportion de fines avec notamment de l'argile, des hydroxydes et de la chlorite. Les proportions sont éminemment variables.

Des analyses par diffraction Rx montrent un cortège minéralogique composé principalement de plagioclases (anorthite), pyroxènes (augite et/ou diopside), smectites (montmorillonite et/ou nontronite), minéraux accessoires (quartz et oxydes de fer).

Sondages et reconnaissances sismiques

Plusieurs campagnes de reconnaissances ont été réalisées aux différents stades des études, de 1996 à 2002, comprenant :

- ◆ une douzaine de sondages carottés ou destructifs, dont deux sondages carottés horizontaux ;
- ◆ l'auscultation des sondages par diagraphie microsismique ;
- ◆ une base sismique longitudinale à l'ouvrage (L ≈ 300 m) et cinq bases transversales (L ≈ 50 à 300 m) ;
- ◆ des essais Lugeon.

Les sondages carottés horizontaux se sont révélés décevants en raison d'un taux de récupération des carottes très médiocres. Les sondages verticaux ont été réalisés sur chacune des quatre têtes, et au milieu de chaque tube, descendant jusqu'à quelques mètres sous le radier du tunnel. Ils ont permis un bien meilleur taux de récupération. Les sondages montrent un terrain homogène "en grand" avec une "zonation" verticale liée probablement à la décompression et à l'altération du massif, ce phénomène étant d'autant plus prononcé qu'on approche de la surface. Les diagraphies microsismiques permettent d'identifier quatre zones successives. Les bases sismiques retrouvent une "zonation" analogue (tableau I).



© P. Bienfait (Scetauroute)

Photo 2
Les brèches de Saint-Gilles au bord de la RD10, faciès matrice

The Saint-Gilles breccias on the edge of county road RD10, matrix facies



© P. Bienfait (Scetauroute)

Photo 3
Les brèches de Saint-Gilles au bord de la RD10, un panneau du faciès bloc emballé dans le faciès matrice

The Saint-Gilles breccias on the edge of county road RD10, a panel of block facies wrapped in the matrix facies

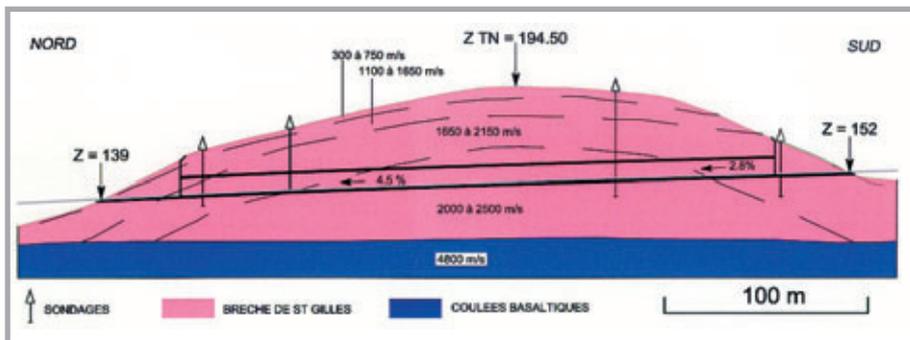
| | Profondeur | Diagraphies microsismiques | Vitesses sismiques (bases extérieures) |
|--|--------------|----------------------------|--|
| Frange superficielle altérée | 0 à 7-10 m | < 1200 m/s | 400 à 700 m/s |
| Frange intermédiaire brèche peu compacte | 10 à 20 m | 1200 à 1800 m/s | 1000 à 1600 m/s |
| Frange inférieure, brèche moyennement compacte | 20 à 30-35 m | 1800 à 2500 m/s | 1800 à 2100 m/s |
| Brèche compacte | > 30-35 m | 2500 à 3700 m/s | 2000 à 2500 m/s |

Tableau I
Zonation verticale des brèches de Saint-Gilles
Vertical zonation of the Saint-Gilles breccias

A titre de comparaison, la coulée basaltique sous jacente, constituant le socle des brèches de Saint-Gilles, présente une vitesse sismique de 4800 m/s. Le profil en long donné figure 3 intègre l'ensemble de ces résultats.

Les essais Lugeon témoignent d'un matériau perméable à très perméable. Il n'y a pas de nappe dans le massif. Toutefois les précipitations cycloniques peuvent générer des circulations d'eau.

Figure 3
Profil en long géologique (tube ouest)
Geological longitudinal profile (west tube)



© C. Buisson (Sctauroute)

CONCEPTION DES OUVRAGES

Caractéristiques générales

(figures 3 et 4)

Le tunnel comporte deux tubes à trois voies de circulation de 3,50 m de largeur chacune, une bande dérasée droite de 1 m et une bande dérasée gauche de 0,30 m. Des trottoirs de 0,85 m bordent la chaussée. Les trois voies s'inscrivent dans un gabarit de 11,80 m de largeur roulable et 4,75 m de hauteur libre minimale. Une revanche d'entretien de 0,10 m est prise en compte. La vitesse de référence est de 90 km/h.

La longueur des tunnels creusés est de 292,50 m pour le tube ouest et 220,70 m pour le tube est. La longueur totale des ouvrages, tunnel creusé plus ouvrages à l'air libre, est de 368 m pour le tube ouest et 323 m pour le tube est.

Le tracé en plan s'appuie sur un cercle circonscrit au dépôt d'explosif du Cap-la-Houssaye (situé à 850 m à l'ouest), conduisant à des rayons de 945 m et 975 m. Le profil en long monte du nord vers le sud, avec des pentes allant de 4,8 % à 2,8 %. Les profils en long des deux tubes sont fortement décalés, de 8 à 9 m de dénivellée, pour une distance horizontale de 25 m entre piédroits.

Le volume de déblais du tunnel (172 500 m³) sera utilisé pour :

- ◆ les remblais des têtes du tunnel (40 000 m³);
- ◆ les remblais non techniques de la tranchée couverte de Saint-Paul (90 000 m³);
- ◆ des dépôts ou de la terre végétale (42 500 m³).

Génie civil en souterrain (figure 5)

Excavation soutènement

Les conditions de réalisation de ces ouvrages apparaissent relativement difficiles du fait d'une part de la grande section des tubes (140 m² excavés) et d'autre part d'un matériau encaissant de très médiocre qualité. Cependant les observations réalisées sur les talus de déblais de la tranchée d'accès au sondage horizontal SCH2 réalisé en 1998 conduisent à nuancer cette première appréciation très prudente. En effet, ces talus (d'une douzaine de mètres de hauteur) relativement raides se sont remarquablement bien comportés dans le temps.

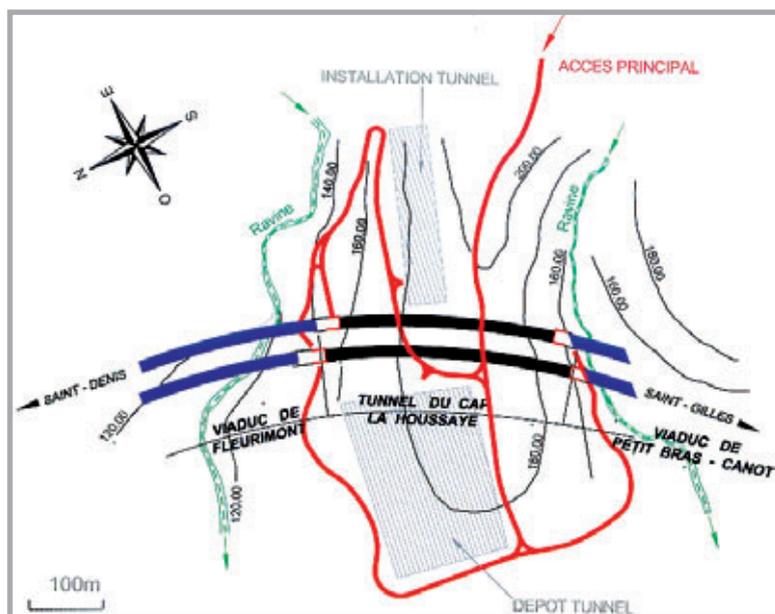
Excavation

Compte tenu des faibles caractéristiques mécaniques Rc, Rtb, dureté et abrasivité Cerchar (en dehors des blocs de basalte), il peut être envisagé une excavation mécanisée au moyen d'une pelle puissante spécifique tunnel assistée par un brise-roche hydraulique pour fragmenter les blocs de basalte. Le terrassement sera exécuté en deux phases : demi-section supérieure et stross (demi-section inférieure).

Tableau II
Caractéristiques géotechniques des matériaux
Geotechnical properties of the materials

| | Brèches de Saint-Gilles | Blocs de basalte |
|---|-------------------------|-------------------|
| γ (en tonne/m ³) | 2,05 < 2,37 < 3,1 | 2,1 < 2,4 < 2,8 |
| Teneur en eau (en %) | 1,5 < 5 < 22 | 0,13 < 1,55 < 4,4 |
| Vitesse sismique sur échantillon (en m/s) | 1370 < 2340 < 4260 | |
| Module E (en MPa) | 220 < 2000 < 12900 | |
| Rc (en MPa) | 0,4 < 6,83 < 21,9 | 4 < 30,9 < 101 |
| Rt (en MPa) | 0,03 < 0,66 < 3,7 | 0,2 < 3,3 < 8 |
| Dureté Cerchar (en points) | 4 < 19 < 64 | 13 < 29 < |
| Abrasivité Cerchar (en points) | 0,1 < 0,8 < 2,2 | 0,5 < 1,2 < 1,7 |

Figure 4
Vue en plan
Plan view



© C. Buisson (Sctauroute)

Essais géotechniques

Les essais de laboratoire ont été réalisés en 1998 et 2002. Ils portent sur un très grand nombre d'échantillons. Les résultats sont très dispersés mais permettent de tirer des valeurs statistiques. Le tableau II donne un récapitulatif global et simplifié.

Ces brèches présentent de faibles résistances mécaniques. Néanmoins la couverture n'est que de 30 à 40 m, ce qui donne un état de contraintes naturelles faible pour le tunnel (CN1) à moyen pour la tête nord (CN2).

Soutènement

Trois types de soutènement ont été retenus pour assurer la stabilité de l'excavation :

- ◆ un soutènement lourd constitué de cintres HEB associés à une voûte parapluie dans les zones d'entrée en tunnel (tubes pétroliers Ø 109/127 de 20 m de long). Le soutènement par cintres lourds seuls pourra être appliqué en section courante dans d'éventuelles zones de brèches localement mal cimentées ;
- ◆ un soutènement léger constitué de boulons, béton projeté, fibré ou non, à mettre en œuvre en section courante dans la couche de terrain plus compact ;
- ◆ le même soutènement renforcé en béton projeté et boulonnage dans le cas de brèches moins bien cimentées et de moins bonne tenue.

Auscultation

Dans les soutènements "légers", des sections de mesure de convergence relative seront disposées régulièrement pour vérifier la stabilité de l'excavation et adapter le soutènement en conséquence.

Les ouvrages en souterrain

Le tunnel sera revêtu de béton coffré sur toute sa longueur, d'une épaisseur de 50 à 60 cm selon les profils. Le risque de venues d'eaux en période de pluies, celles-ci pouvant être intenses en saison cyclonique, amène à prévoir la mise en œuvre d'une étanchéité d'extrados par feuille PVC.

Le tunnel sera équipé pour le transit des matières dangereuses avec un caniveau à fente et collecteur associé dans chaque tube. Le drainage des eaux claires et des matières dangereuses font l'objet de réseaux séparatifs distincts.

Le génie civil lié à l'exploitation et à la sécurité comprend :

- ◆ trois niches de sécurité dans chaque tube ;
- ◆ des fourreaux électriques placés sous trottoir, recouverts de 20 cm de béton pour assurer la protection au feu ;
- ◆ un local technique en tête sud ;
- ◆ deux emplacements de stationnement réservés aux services de secours, un en entrée de chaque tube ;
- ◆ un réservoir incendie de 200 m³ implanté au-dessus des têtes nord.

Ouvrages de tête et architecture

(figures 6, 7 et 8)

Suite aux principes définis par le cabinet d'architectes Faup & Zirk, les têtes de tunnel sont rectangulaires et comprennent :

- ◆ des murs verticaux en sifflet, avec couronnements inclinés selon la pente du versant ;
- ◆ un portique de 13 m de long, 14 m de portée pour les sorties de tunnel et 15,75 m de portée dans les entrées pour admettre le stationnement des véhicules de secours.

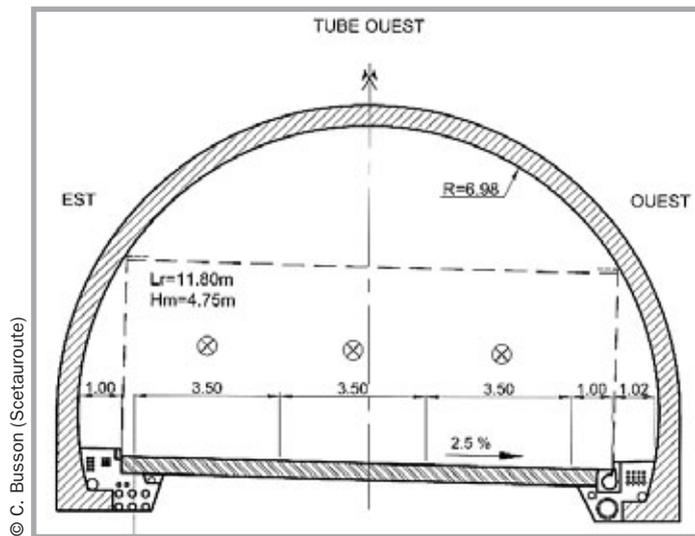


Figure 5
Coupe type
Typical
cross section



Figure 6
Les têtes nord du tunnel
et le viaduc de Fleurimont -
Vue architecturale
d'ensemble

The northern portals
of the tunnel
and the Fleurimont viaduct -
General architectural view



Figure 7
Une tête nord
depuis le viaduc -
Vue architecturale

A northern portal
from the viaduct -
Architectural view



Figure 8
Tête nord et murs "pays"
- Vue architecturale

Northern portal and local
style walls - Architectural
view

Photo 4
Terrassement
des pistes d'accès

Earthworks
on access tracks



© J. Caduadai (DDE Réunion)



Le couronnement des sifflets sera fait en corniches de béton blanc, lavé, prolongées par un caillebotis métallique. Les murs seront matricés avec une matrice Cheyenne de la société Reckli.

La liaison entre le cadre rectangulaire et le tunnel creusé est assurée par une voûte en béton armé de longueur éminemment variable entre les têtes, de 7 à 30 m. Ces ouvrages seront remblayés pour reconstituer le versant naturel.

Pour compléter l'ensemble architectural des têtes, les culées des viaducs voisins et les remblais de culées seront contenus dans des murs habillés en galets cassés, rappelant les "murs pays" (figure 8).

Contraintes d'exécution

La position du tunnel entre les deux viaducs, Fleurimont au nord et Petit-Bras Canot au sud, est très contraignante. Les ouvrages de tête sont contigus aux culées des viaducs. Il a donc fallu définir un phasage précis des travaux de tunnel et de viaduc pour limiter les interactions entre ces chantiers :

- ◆ terrassement des quatre têtes ;
- ◆ culées du viaduc de Fleurimont au nord ;
- ◆ attaques sud du tunnel réduites à une quinzaine de mètres et construction des ouvrages à l'air libre ; libération de la tête sud remise à l'ouvrage de Petit-Bras Canot ;
- ◆ attaque principale du tunnel par le nord, étanchéité, béton de revêtement et trottoirs par le nord également.

Des pistes d'accès spécifiques ont été réalisées pour desservir les têtes de tunnel et les culées de viaducs, mais aussi relier les têtes aux deux points névralgiques que sont les installations de chantier et le dépôt.

Equipements

Les équipements comprennent :

- ◆ un éclairage de base sur toute la longueur des

ouvrages et un éclairage de renforcement dans les entrées ;

- ◆ des plots de balisage lumineux en base de piédroit ;
- ◆ un poste d'appel d'urgence et un extincteur dans chaque niche de sécurité ;
- ◆ un réseau incendie avec un poteau sur chaque tête ;
- ◆ trois caméras de vidéo-surveillance par tube, avec rapatriement des images au poste de supervision ;
- ◆ un système d'analyse d'image sera couplé aux images fournies par les caméras pour assurer la DAI (détection automatique d'incident) dans le tunnel ;
- ◆ des feux de barrage R24 pour interdire l'accès de l'ouvrage en cas d'urgence ; il n'est pas prévu de barrière fermant physiquement l'accès ;
- ◆ la signalisation de police.

L'ensemble des données et informations techniques issues des équipements du tunnel et du local technique seront recueillies et gérées par un automate programmable implanté dans le local technique. Les informations seront rapatriées au poste de supervision par un réseau de transmission spécifique. Le poste de supervision assurera la gestion et la supervision des installations techniques, la surveillance de l'état du trafic et déclenchera les diverses interventions de secours, de dépannage ou de maintenance selon les circonstances et les besoins. Ce poste sera très probablement installé au Centre d'information et de gestion du trafic déjà existant à Saint-Denis de la Réunion.

Il n'est pas prévu de ventilation. Elle n'est pas obligatoire pour ce type d'ouvrage, d'une longueur inférieure à 500 m. En outre, compte tenu de l'importante section aérée des tubes (~ 90 m²), du caractère interurbain unidirectionnel du trafic, et de l'orientation des tubes par rapport aux vents dominants, la ventilation naturelle est suffisante.

■ DOSSIER DE SÉCURITÉ

C'est un recueil de documents relatifs à la sécurité de l'ouvrage souterrain dans son environnement. Il a été élaboré par le bureau d'études Scetauroute DTTS en août 2002, sur la base de l'étude préliminaire d'ouvrage d'art du Cetu en date d'avril 2002.

Il s'agit d'un dossier obligatoire, requis par la circulaire interministérielle 2000-63, pour tous les tunnels routiers du réseau national de plus de 300 m, qu'ils soient en exploitation ou en projet. Cette démarche est également l'occasion pour le maître d'ouvrage d'analyser avec les autres intervenants (pompiers...) l'ensemble des facteurs ayant une incidence sur la sécurité des usagers et de prendre ainsi les dispositions les mieux adaptées. Au niveau du projet, le dossier de sécurité du tun-

nel de Cap-la-Houssaye comporte cinq pièces. On y trouve tout d'abord une description détaillée (issue de l'EPOA) accompagnée de plans de l'ouvrage et de son environnement. Une étude de trafic présente ensuite les répartitions des flux de véhicules à l'horizon 2015 sur l'itinéraire de la route des Tamarins (69 500 véh./j. TMJA – Trafic moyen journalier annuel) et sur la voirie environnante, les périodes de congestion observées sur l'actuelle RN1, ainsi que les itinéraires alternatifs en cas de fermeture du tunnel. Une analyse comparative des risques (ACR) a pour objectif de comparer qualitativement les risques induits par le transport des marchandises dangereuses sur la route des Tamarins (le tunnel du Cap-la-Houssaye présentant un milieu confiné donc potentiellement dangereux) par rapport aux itinéraires alternatifs (RN1 actuelle, RD10, etc.). Cette étude a d'abord fait l'objet d'un recensement de l'ensemble des flux de transport des marchandises dangereuses sur l'île à l'aide d'enquêtes au Port et auprès des transporteurs. Les itinéraires ont ensuite été comparés de manière qualitative (longueur, profil en travers, géométrie, risques spécifiques dus au tunnel de la Route des Tamarins ou aux chutes de pierres sur la RN1, accidentologie, population et lieux publics environnants, facilité d'intervention des secours...). L'étude a retenu l'itinéraire "Route des Tamarins" comme le plus sécuritaire pour le transport des marchandises dangereuses (85 % sont des hydrocarbures). Une étude spécifique des dangers (ESD) décrit les incidents et les accidents, quelle que soit leur origine, susceptibles de se produire en phase d'exploitation ainsi que la nature et l'importance de leurs conséquences éventuelles. Cette étude précise et justifie les mesures propres à réduire la probabilité que ces accidents surviennent et leurs conséquences. Elle permet de conclure que les nouvelles structures et les équipements prévus pour le tunnel du Cap-la-Houssaye sont satisfaisants. Elle constitue un point de départ essentiel des réflexions à mener pour établir les consignes d'exploitation et les procédures d'intervention. L'ensemble du dossier de sécurité a été contrôlé par un expert extérieur (avis de l'expert) puis, conformément à la circulaire 2000-63, soumis au comité d'évaluation de la sécurité des tunnels routiers (CESTR) qui a émis un avis favorable sur le projet. Cette démarche participative a permis de travailler de façon très constructive avec les services de secours (en particulier les pompiers de Saint-Denis : Service départemental d'intervention et de secours (SDIS)) afin d'adapter au mieux le projet du tunnel (les accès, le cheminement des secours, les moyens en eau et en matériel à disposition au niveau du tunnel...).

Le SDIS a été particulièrement moteur, dans un contexte réunionnais où les tunnels sont des ouvrages peu connus : seuls quatre tunnels routiers sont présents à ce jour à la Réunion : l'un à l'en-



Photo 5
Terrassement
des têtes nord
*Earthworks
for the northern portals*



Photo 6

trée de Saint-Denis, les trois autres sur la route de Cilaos.

Six mois avant l'ouverture, le dossier de sécurité sera actualisé et complété par les pièces concernant l'exploitation et en particulier par le plan d'intervention et de sécurité (PIS).

■ TRAVAUX (photos 4, 5 et 6)

Avantages de l'allotissement

Les travaux relatifs au tunnel du Cap-la-Houssaye ont été organisés comme suit :

- ◆ un marché spécifique aux terrassements des têtes du tunnel du Cap-la-Houssaye, préalable à la réalisation du creusement proprement dit du tunnel ;
- ◆ un marché génie civil du tunnel ;
- ◆ un marché équipements du tunnel et de la tranchée couverte du rempart de Saint-Paul.

Photo 7
Terrassement de têtes, foreuse "Eurofor HD 94" utilisée pour le forage des clous et de la voûte parapluie

Portal earthworks, "Eurofor HD 94" drilling machine used for drilling studs and the umbrella arch



© J. Cadural (DDE Réunion)

Photo 8



Les travaux de terrassement de têtes auraient pu être intégrés dans le marché général, cependant leur réalisation dans le cadre d'un marché spécifique présentait de multiples avantages :

- ◆ techniques : le marché de terrassements des têtes de tunnel, préalable au percement principal, permet de tester en vraie grandeur la nature et la tenue des terrains. L'expérience de ces travaux préliminaires permettra à l'entreprise principale d'ajuster son organisation et ses moyens de travaux ;
- ◆ avancement de l'opération : le dossier de consultation des terrassements des têtes de tunnel a pu être achevé avant le dossier, plus conséquent, de consultation des entreprises pour le tunnel (creusement et génie civil), ce qui permet de débiter plus tôt les travaux correspondants ;
- ◆ économiques : les terrassements des têtes de tunnel sont des travaux nettement moins spécialisés que le creusement et le génie civil du tunnel : ils ont donc intéressé un plus grand nombre

d'entreprises, notamment des entreprises réunionnaises, élargissant ainsi la concurrence.

Contrainte de coordination

L'exécution simultanée des ouvrages de la première section de la Route des Tamarins nécessite une coordination avec :

- ◆ les travaux des viaducs de Fleurimont et de Petit-Bras Canot, ouvrages encadrant le tunnel ;
- ◆ le TOARCC (marché de terrassements, ouvrages d'art courants, rétablissements de communications, chaussées) de Plateau-Caillou, chargé de la reprise des matériaux sur dépôt ;
- ◆ les entreprises empruntant les pistes de chantier.

La coordination a été étudiée et définie lors des études initiales. Les travaux imbriqués (notamment au droit des têtes de tunnel) font l'objet d'ordres de service et de délais spécifiques afin de permettre au maître d'œuvre de planifier les interventions de chaque entreprise.

Marché terrassements de têtes

(photos 7 et 8)

Le marché des terrassements des têtes, d'un montant de 3633859,22 euros TTC, a été notifié à l'entreprise Sogea Réunion le 10 mai 2004.

Après une période de préparation, l'ordre de service de commencer les travaux a été notifié le 26 juillet 2004, et les travaux se sont terminés en mars 2005.

Les terrassements des têtes ont été réalisés en plusieurs passes successives présentant des hauteurs variables (de 1,5 m à 2,8 m), tenant compte de la position des ancrages et de la hauteur maximale de travail de la foreuse réalisant la voûte parapluie.

La principale difficulté du marché réside en effet dans la réalisation d'une voûte parapluie 50 cm au-dessus de l'excavation de la demi-section supérieure, sur 22 m de développé.

Elle est constituée de 28 tubes "pétroliers" en acier (\varnothing 109/127) de longueur 20 m, présentant une divergence de 3 degrés par rapport à l'extrados du tunnel.

La réalisation a nécessité une implantation précise et la présence continue d'un géomètre. Les axes ont été matérialisés sur le béton projeté et au sol en deux points à l'avant et à l'arrière de la foreuse. L'inclinaison a été préréglée par un niveau et affiné sous la direction du géomètre. La mise en station de la foreuse, machine Eurofor HD 94 équipée d'un marteau de fond de trou, était primordiale. Le nez de la glissière était en appui sur le béton projeté. A l'arrière, la glissière était équipée d'un système d'appui, composé d'étais tirant-poussant fixés sur un HEB 300 positionné au sol.

Lors de la réalisation du forage, deux contrôles to-

pographiques ont été réalisés à 3 m puis à 20 m. Le scellement des tubes a ensuite été réalisé en maintenant une pression d'injection de 5 bars et en vérifiant les volumes injectés.

Marché tunnel

Le marché de réalisation du tunnel a été attribué au groupement Spie Batignolles/Razel et notifié en août 2005.

ABSTRACT

Section 1 : Saint-Paul/RD10. Cap-la-Houssaye Tunnel

Various auteurs

The Cap-la-Houssaye Tunnel is located in the North West of the Reunion Island. It traverses a hill with a relief radial to the island in the sense "savane". The tunnel consists of two tubes each with three traffic lanes. The excavation diameter is 14 m, the western tube is 368 m long, the eastern tube is 323 m long and the maximum cover is 39 m. The tunnel will be excavated in the volcanic breches of Saint-Gilles, which have a low mechanical resistance but hold together well. The tunnel will be excavated using mechanical excavation methods. The excavation at the portals was completed in the second half of 2004. The civil works for the tunnel will start end 2005 and will last for 2.5 years. The electrical and mechanical installations will be carried out in 2008. It is planned that the tunnel will be opened to traffic early in 2009.

RESUMEN ESPAÑOL

Tramo 1 : Saint-Paul / Carretera Departamental 10. Túnel del Cabo La Houssaye

Autores diversos

El túnel del Cabo La Houssaye se encuentra ubicado al noroeste de la isla de La Reunión y permite atravesar una colina, relieve radial de la isla, en la "sabana". Este túnel incluye dos tubos de tres carriles de circulación, de 14 m de luz cada uno, de 368 m de longitud total para el tubo oeste y de 323 m para el tubo este. La cubierta máxima es de 39 m. La excavación del túnel se ejecuta en las brechas volcánicas de Saint-Gilles, de reducida resistencia mecánica pero de correcto sostenimiento. La excavación será llevada a cabo mediante diversos medios mecánicos. Los movimientos de tierra de frente fueron ejecutados durante el segundo semestre de 2004. Las obras de ingeniería civil del túnel habrán de dar comienzo a finales de 2005 para una duración de 2 años y medio. Los equipamientos serán realizados a mediados de 2008. La entrada en funcionamiento está prevista para principios de 2009.

Le franchissement de la ravine des Trois Bassins a fait l'objet d'un concours de maîtrise d'œuvre, à l'image des franchissements de la grande Ravine et de la ravine de la Fontaine. Trois candidats ont été présélectionnés, deux ont remis une solution en béton à précontrainte extradossée (l'un, Arcadis ESG - Thalès EC - Strates, avec une nappe centrale, l'autre, Setec TPI - Spielmann, avec deux nappes latérales) et le troisième (Ingérop - Incom - Mayeur - Morris-Renaud) a présenté une solution d'ouvrage à deux arcs convergents.

La commission composée comme un jury, suivant l'avis de la commission technique a proposé de retenir la solution du groupement Arcadis ESG - Thalès EC - Strates. La commission permanente du Conseil régional, maître d'ouvrage, intéressée par les qualités esthétiques de la solution en arc, a néanmoins souhaité retenir deux lauréats et a demandé à ce que les deux solutions de pont à précontrainte extradossée à nappe centrale et de pont à deux arcs convergents soient poussées en études jusqu'à la consultation des entreprises, réservant son choix en fonction des résultats de l'appel d'offres.

Nous présentons dans les pages qui suivent les deux projets.

L'appel d'offres a été lancé avec deux solutions, les entreprises pouvant se positionner sur l'une ou l'autre ou les deux.

Deux groupements d'entreprises ont répondu sur la solution à précontrainte extradossée et une seule sur la solution à deux arcs convergents, mais à un prix sensiblement plus élevé. Le Conseil régional a finalement opté pour la solution d'ouvrage à précontrainte extradossée conçue par le groupement de maîtrise d'œuvre Arcadis ESG - Thalès EC - Strates et dont les travaux ont été attribués au groupement Eiffage TP - Razel - Matière.

L'ouvrage d'art exceptionnel de la ravine des Trois Bassins

Un pont en béton à précontrainte

■ LA CONCEPTION GÉNÉRALE DE L'OUVRAGE

Le site

Ouverte sur l'océan, les plages et le spot de la Saline-les-Bains, la ravine des Trois Bassins est très visible de la RN1 côtière, et se présente comme une longue dépression qui s'évase au fur et à mesure qu'elle descend vers la mer.

Elle se distingue donc nettement de la plupart des ravines franchies par la Route des Tamarins, et notamment de celle de la Grande Ravine et de la ravine Fontaine dont les brèches abruptes et profondes sont grandioses.

Au droit du tracé projeté, la brèche présente une dissymétrie marquée par le surcreusement du lit vif en rive droite, et la grande différence d'éclairage et de raideur des versants latéraux (plus de 45 degrés en RD et 15 degrés moyen en RG) et atteint 360 m de longueur et 70 m de hauteur sur le lit vif (figure 1).

L'accessibilité relativement aisée de la rive gauche de la ravine depuis la RD9, et l'inaccessibilité du versant rive droite raide et du lit mineur de la ravine creusé en pied, ont mis en évidence qu'il serait hors d'échelle de s'affranchir de la possibilité d'appui en rive gauche de la ravine, et que la portée minimale de l'ouvrage en rive droite dépassera 120 m.

Les caractéristiques fonctionnelles de la Route des Tamarins

Le calage géométrique de la route a été optimisé au droit du franchissement de la ravine, en vue de réduire la longueur de la brèche, d'éviter les zones écologiquement sensibles (ZNIEFF, aire de reproduction de molosses), et de rechercher les meilleures conditions géologiques en évitant la proximité des cascades du bassin inférieur de la ravine.

Il en résulte un axe quasi perpendiculaire à la ravine, en alignement droit et en pente unique à 3 % sur la totalité de la brèche.

Le profil en travers de la route comporte deux chaussées à deux voies de 7 m, avec bandes dérasées de 1 m et des dévers en toit à 2,5 %.

Les données économiques issues de réalisations récentes de grands ouvrages d'art ont conduit à l'évidence au choix d'un tablier unique.

Les charges d'exploitation retenues pour les ouvrages de la Route des Tamarins sont celles de

l'Eurocode 1 en classe II. La Route des Tamarins n'est pas accessible aux charges militaires et l'ouvrage n'est pas, par suite de l'organisation des chantiers TOARC de part et d'autre de la ravine, concerné par le passage d'engins de terrassements. En dérogation de la section 4.6 de l'EC.1, les charges de fatigue pour les structures métalliques sont les convois type Bf.

La géologie du site

Comme l'ensemble des versants de l'île de la Réunion, les sols sont constitués d'une succession de coulées basaltiques de caractéristiques très différentes suivant les époques, séparées par des couches de scories plus ou moins épaisses et décomprimées.

Le bouclier ainsi formé en versant ouest de l'île est entaillé par les écoulements de la ravine des Trois Bassins qui fait apparaître le faciès des couches volcaniques masqué par la végétation, les éboulis et les érosions.

Les couches de mugéarite des phases II et IV du volcan constituent les événements récents et se trouvent en surface des planèzes des rives droite et gauche, sur une épaisseur de l'ordre de 30 m. Les coulées de basalte plagioclastique et de roche "Pintade" constituent le fond de la ravine et les parties inférieures des versants.

Le lit mineur de la ravine s'encaisse dans ces formations, et est bordé sur sa rive gauche d'un éperon de basalte puissant particulièrement apte à la fondation d'un appui (figure 2).

Les contraintes climatiques

La pluviométrie du site est considérée avec une intensité décennale de 200 mm/h. Le débit cumulé des eaux pluviales de la section amont de la route transitant sur l'ouvrage représente 0,2 m³/s par chaussée.

Les données thermiques homogénéisées pour l'opération conduisent à considérer, au niveau de l'ouvrage d'art, les conditions thermiques suivantes :

- ◆ températures de l'air : $T_{max} = 34\text{ °C}$, $T_{min} = 10\text{ °C}$;
- ◆ températures de l'ouvrage : $T_{max} = 38\text{ °C}$, $T_{min} = 10\text{ °C}$;
- ◆ température initiale moyenne de l'ouvrage : $T_{réf} = 22\text{ °C}$;

Les variations thermiques appliquées à l'ouvrage s'établissent ainsi à 48 °C, réparties en :

- ◆ dilatation = + 26° C;
- ◆ contraction = - 22° C.

de franchissement

Jacques Frappart



DIRECTEUR RÉGIONAL
SUD-OUEST
ARCADIS ESG

extradossée

Le vent : la vitesse moyenne cinquantennale de référence du vent attribuée par l'Eurocode 1 à la Réunion est de 34 m/s à 10 m de hauteur sur site plat de rase campagne de rugosité 5 cm.

Un modèle de vent cyclonique spécifique au site a été ainsi déterminé par le CSTB et appliqué ensuite aux modélisations et études aérodynamiques de l'ouvrage dans son site en vue des calculs de sa réponse au vent.

■ LA SOLUTION "EXTRADOSSÉE"

La solution extradossée pour l'ouvrage d'art résulte des réflexions simultanées menées par une équipe restreinte d'ingénieurs d'Arcadis et de Thales et d'architectes de Strates, et intégrant à tout stade de la conception l'ensemble des paramètres d'insertion, techniques et économiques :

- ◆ franchir le versant rive droite et le lit mineur de la ravine sans appui, avec une ouverture de l'ordre de 120 à 130 m, avec un appui sur le massif basaltique du bord du lit mineur;
- ◆ exploiter la capacité de la rive gauche de la ravine à accueillir des appuis de hauteur réduite (moins de 50 m) mais en nombre limité;
- ◆ affirmer la spécificité du caractère dissymétrique et calme de la brèche à contrario des brèches abruptes et profondes des autres grandes ravines, plus aptes à la conception d'ouvrages complexes ou innovants;
- ◆ éviter les structures d'ouvrage conduisant quasi inévitablement à des dépassements de l'enveloppe financière affectée prévue pour l'ouvrage, en privilégiant des structures dont la maîtrise technique et économique est reconnue sur l'île de la Réunion;
- ◆ exprimer le franchissement de la ravine pour les usagers de la route.

Cette méthodologie a conduit à éliminer un grand nombre de solutions parmi lesquelles :

- ◆ les solutions à haubans pour lesquelles le comportement aéroélastique en période cyclonique n'est pas performant, et dont la hauteur des mâts est disproportionnée avec celle de la brèche;
- ◆ les solutions suspendues esthétiquement inadaptées et hors d'échelle dans le site;
- ◆ les solutions en arc nécessitant des appuis dans les versants dans des conditions géologiques complexes et insuffisantes;
- ◆ les solutions à tablier métallique pénalisées par la complexité des accès multipliant les assemblages, et les conditions économiques de l'île;



Figure 1
Le site de la ravine des Trois Bassins. Vue du littoral

The site of the Trois Bassins ravine. View of the coastline

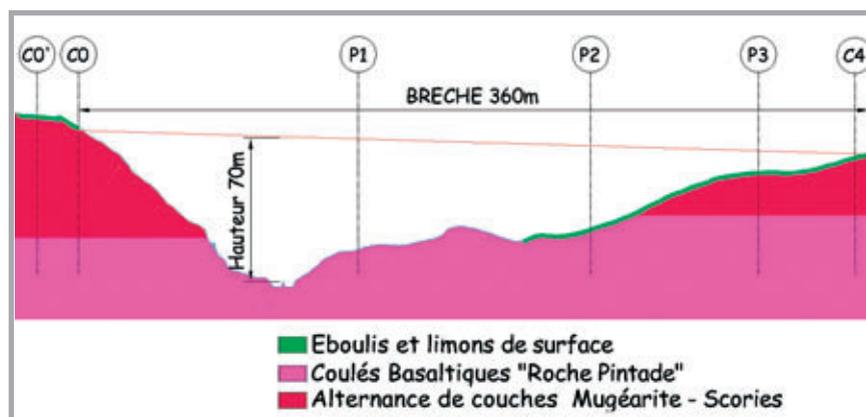


Figure 2
Profil géotechnique du franchissement
Geotechnical profile of the crossing



Figure 3
Solution extradossée à trois travées avec culée avancée
Curved three-span solution with advanced abutment

- ◆ les solutions classiques de tablier en béton précontraint construit par encorbellements, dont les formes trop épaisses n'expriment pas de manière forte le franchissement.

La conception première s'est donc orientée vers un ouvrage à trois travées de longueurs dégradées (126, 108, 72 m), dont la travée principale est en rive droite (figure 3).

Le choix du monotaillier en béton et à bracon de hauteur constante, avec câblage extradossé est un aboutissement technique et architectural, cohérent



Figure 4
Entrée en terre RG
avec travée courte

*Left-bank underground
entrance with short span*



avec l'ensemble des réflexions menées, et constitue un ensemble clair, effilé et presque maritime par ses formes.

La dégressivité des travées, des hauteurs des déviateurs et du nombre de câbles extradossés formant nappes axiales, des goussets du tablier sous les déviateurs, constituent une réponse harmonieuse en miroir au profil de la brèche franchie et invite à la métaphore du voilier.

Les techniques constructives utilisées, par encorbellements successifs depuis les piles et la culée RD, parfaitement maîtrisées sur l'île de la Réunion, sont un gage de réussite qualitative, temporelle et financière.

L'utilisation du béton B60, dont la maîtrise a pu être validée antérieurement à la Réunion, permet une optimisation des structures.

■ LES ÉVOLUTIONS DE LA SOLUTION

Au cours des différentes étapes de la conception, des évolutions ont été apportées au projet en vue de parfaire son insertion dans le site en cohérence avec les calculs de dimensionnement et les résultats des reconnaissances géotechniques détaillées.

L'entrée en terre en rive gauche

Celle-ci se produit en écharpe sur le versant en fort dévers transversal et dégagant une hauteur libre très variable sous le tablier.

La conception initiale prévoyait une avancée de la culée de l'ordre de 50 m dans le versant permettant la diminution de longueur du tablier.

La complexité de l'insertion de cette culée massive, et les difficultés géotechniques rencontrées en rive gauche, ont conduit à son remplacement par une travée courte, et une travure de 126 - 104,40, 75,60 - 43,20 m (figure 4).

La forme des piles

Après de nombreuses recherches architecturales (forme de la section, nature des parements, variation d'épaisseurs,...) et considération des sollicitations définitives sous vent cyclonique et en construction, les piles sont conçues en section elliptique constante sur la hauteur. Les sections des trois piles sont variables d'une pile à l'autre pour renforcer l'effet de dégressivité de l'ouvrage.

Les bracons

Les bracons métalliques participent pour beaucoup à l'identité de l'ouvrage. De nombreuses solutions ont été étudiées : en V ou droits, tubulaires ou en fuseau, rythme d'espacement.

La conception définitive résulte de la prise en considération des contraintes constructives liées à l'intégration des bracons dans l'équipage mobile, du dimensionnement optimal du pas des voussoirs et des consoles latérales du hourdis, et du souci de simplifier la fabrication des pièces métalliques et leurs nœuds avec le béton.

Les bracons ainsi définis comme des griffes en métal blanc semblent sertir le "pont à la coque", et leur forme en gousse ouverte participe à l'élégance générale de l'élévation (figure 5).

La fondation de l'appui du tablier en rive droite

La culée disposée en crête de versant rive droite de la ravine assure l'appui du tablier et du contre-poids d'encastrement de sa travée de rive.

Les conditions géotechniques rencontrées (feuilletage basaltes/scories) ne permettent une fondation superficielle que pour les ouvrages de soutènement et l'appui arrière du contre-poids qui ne nécessitent pas une portance élevée.

L'appui principal de la travée, fortement sollicité sous charges verticales et horizontales transversales (vent cyclonique) imposent une fondation profonde.

La fondation initiale par puits marocains, dont le creusement à l'explosif présente trop de risques par suite du feuilletage des terrains, a été finalement conçue sur micropieux, technique particulièrement éprouvée à la Réunion.

Les déviateurs de piles

Ceux-ci avaient été envisagés initialement en acier. Les dimensionnements réalisés (notamment sous les effets du vent extrême et les conditions de changement ou de rupture d'un câble extradossé) et les contraintes de maintenance, ont conduit à des structures métalliques très lourdes.

Au regard des contraintes de transport et des difficultés d'accès, de la faiblesse des moyens de le-

vage sur l'île (morcelage des pièces, complexité d'assemblage sur site), des contraintes d'interfaces constructives avec les voussoirs, et de coût global, la conception définitive des déviateurs s'est portée sur une structure en béton coulée en place. Des parements en plaques de béton blanc polies ont été adoptés pour assurer les formes retenues après les nombreuses recherches architecturales de détail.

Le principe de la continuité des câbles de précontrainte, au travers de celles de déviateurs, constituée de tubes cintrés injectés et bloqués, a été préféré aux ancrages croisés.

L'épaisseur en pied des déviateurs a pu être optimisée à 1,40 m, limitant ainsi la largeur du TPC central à 2,70 m, et par suite la largeur totale du tablier à 22 m.

Les conditions d'appui du tablier

Le tablier n'est pas, pour des raisons de cohérence architecturale, de faible hauteur des piles et de comportement au vent cyclonique, encastré sur les piles.

Les études définitives au vent extrême ont conduit à des dispositions particulières :

- ◆ blocage latéral du tablier sur l'appui de rive droite par appuis glissants en butée (les efforts transmis tant repris par le massif des micropieux pour l'appui principal, et par bêche dans le basalte pour l'appui du contrepoids.

Ce système de doublet d'appuis-butées constitue un encastrement horizontal du tablier sous le vent, et participe à la réduction des efforts généraux sur la grande pile en service ;

- ◆ conception d'un système optionnel de blocage longitudinal du tablier sur la culée rive gauche.

Les calculs au vent ont montré que la mise en œuvre d'un tel système permet de réduire très sensiblement le balancement horizontal longitudinal du pont sous vent extrême, et par conséquent les efforts sur la grande pile.

Le système est prévu fabriqué, mais mis en œuvre qu'en cas d'alerte maximale cyclonique, et uniquement pour la phase d'encorbellement sur la grande pile ;

- ◆ mise en œuvre d'appareils d'appui à pots fixes ou glissants permettant la transmission des effets de cisaillement transversaux en cas de vent.

L'inclinaison des âmes du caisson de tablier

L'affinage du tracé des câbles de précontrainte et de la position des ancrages, du phasage des voussoirs, et la réduction de l'inclinaison des âmes du tablier de 20° à 10°, ont permis d'éviter toute variation d'épaisseur des membrures du caisson au regard des concentrations de cisaillement issues des études détaillées.

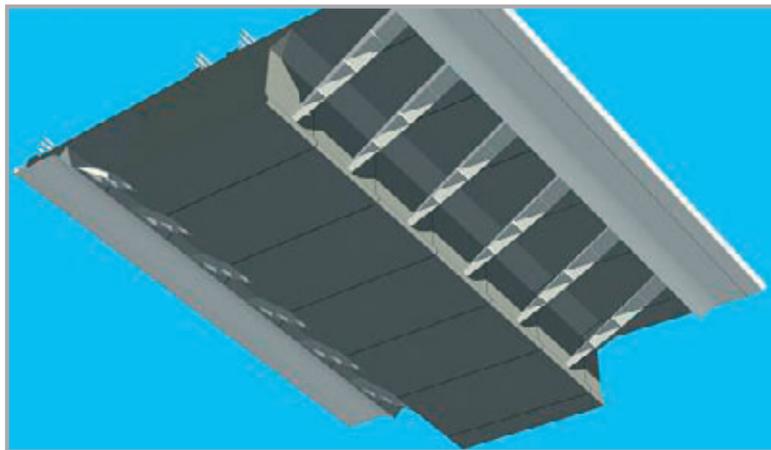


Figure 5
Bracons métalliques définitifs
Final metal brackets

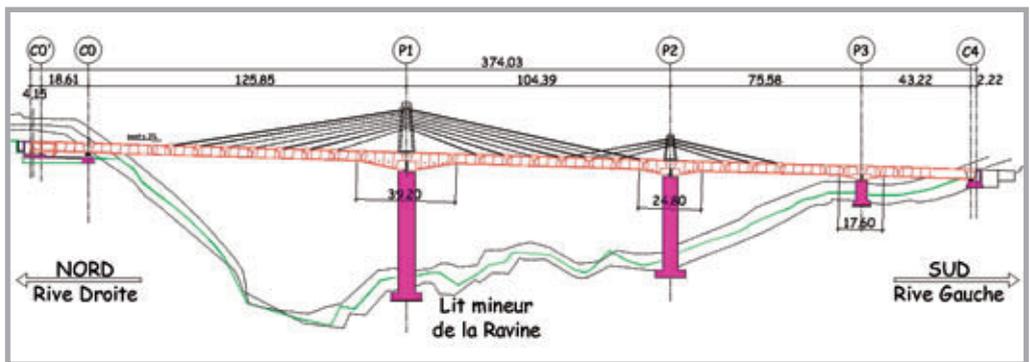


Figure 6
Solution extradossée à quatre travées.
Coupe longitudinale
Curved four-span solution.
Longitudinal section

LE PROJET DÉFINITIF

La géométrie

Les quatre travées définitives (126,00 – 104,40 – 75,60 – 43,20 m) correspondent à un pas constant (3,60 m) des joints de voussoirs et des bracons disposés au milieu. Les joints sont disposés perpendiculairement à l'extrados du tablier en pente à 3 %.

La travée courte d'encastrement du contrepoids en rive droite est finalisée à 18,60 m (22,90 m de longueur totale).

La hauteur du tablier est constante à 4,00 m soit 1/32° de la travée de rive.

Sur les piles, les goussets portent la hauteur totale à 7 m sur P1 (variation sur quatre voussoirs) – 5,80 m sur P2 (variation sur deux voussoirs) – et 5,20 m sur P3 (variation sur un voussoir).

Les goussets sont à pentes longitudinale et transversale (inverses de celles des âmes) constantes. Ils introduisent donc une variation de dimensions des embases des VSP en cohérence avec les dimensions variables des piles (figure 6).

Le tablier

La section transversale

La section définitive est un monocaisson de 22 m de largeur en béton B60, à deux âmes inclinées (10° vers l'intérieur), d'épaisseur constante (0,50 m). Les consoles latérales de 7,80 m du hourdis sont

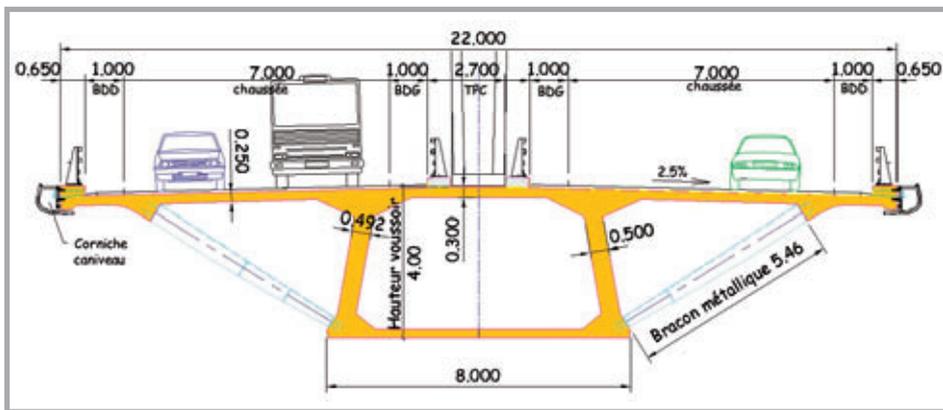


Figure 7
Coupe transversale type
Typical cross section

Figure 8
Principe
de la travée
d'encastrement
C0 - C'0
Schematic
of the end
restraint span
C0 - C'0

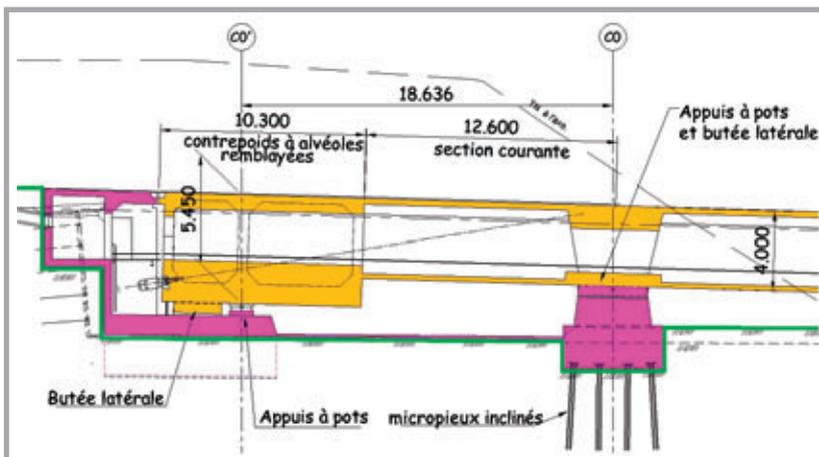


Figure 9
Câblage
extradosé
Curved
cabling



► supportées par des bracons métalliques au pas de 3,60 m. Le hourdis est précontraint transversalement.

Les goussets sont évidés et comportent des boutons d'équilibre des réactions de pied des bracons. Le hourdis inférieur en travée est constant à 8 m de largeur et 0,25 m d'épaisseur.

Le ratio d'armatures passives du tablier s'établit à environ 170 kg/m³.

Le volume de béton représente une épaisseur moyenne de 0,84 m (figure 7).

Les bracons

Les bracons d'un même type tout au long de l'ouvrage sont constitués d'une tôle pliée à 90° et raidie, en forme de gousse ouverte vers le bas, dont les ailes varient de 0,21 m (fixation basse) à 0,53 m

(fixation haute dans un gousset filant du hourdis supérieur formant poutre de rive de la console).

La tôle a 22 mm d'épaisseur, en acier S355 K2.G3. Les fixations sont prévues par platines et goujons d'ancrage de 22 mm de diamètre.

Leurs dimensions (poids 1 tonne, longueur 5,46 m) permettent une fabrication complète finie en usine en métropole, et les transport et mise en œuvre sur site sans contraintes importantes.

La travée d'encastrement C0 - C'0

Celle-ci est constituée en arrière de C0 d'une prolongation de la section courante du tablier sur deux voussoirs et demi (partie partiellement vue dans l'encastrement de la culée), puis du contrepois formé d'une chambre à trois alvéoles, de 22 m de large, 5,50 m de hauteur et 10 m de longueur (partie non vue).

Les deux alvéoles latérales transversales sont remplies de remblai. L'alvéole centrale est évidée pour assurer la continuité du noyau du caisson jusqu'au mur garde-grève de la culée (figure 8).

Le câblage de précontrainte

Le câblage comporte cinq familles de câbles de précontrainte.

Famille 1 : Câbles extradossés, extérieurs au béton et au caisson

Ils sont disposés de façon axiale et s'ancrent dans des bossages - raidisseurs intérieurs au caisson en sous-face du hourdis supérieur.

Ces câbles sont mis en œuvre pendant les phases d'encorbellement des fléaux, puis après clavage des fléaux pour les plus longs. La tension est fixée à 0,6 fprg déduite des surtensions probables sous charges d'exploitation.

Le fléau P1 comporte deux nappes de sept câbles 37T15 S (torons clairs parallèles auto-protégés), espacés de 0,60 m entre axes.

Le fléau P2 comporte une nappe unique de trois câbles 37T15 S s'insérant en travée centrale entre ceux du fléau P1.

Les câbles extradossés sont tous démontables et leur remplacement câble par câble est possible avec maintien partiel de la circulation sur l'ouvrage.

La protection des câbles extradossés est assurée par la gaine des torons unitaires, une gaine PEHD, une isolation thermique de calorifugeage d'environ 30 mm d'épaisseur, puis une coque d'habillage. Le diamètre extérieur fini est de l'ordre de 0,24 m. La déviation et l'ancrage d'un câble dans le déviateur extradossé des piles sont assurés par une selle constituée d'un tube guide cintré scellé dans le béton, d'un tube cintré intérieur enfilable dans le tube guide, dans lequel les torons unitaires dénudés sont scellés par un coulis injecté, et par des systèmes mécaniques de fixation du tube intérieur sur les champs des déviateurs.

Les systèmes de selles et de protection thermique des câbles extradossés, qui peuvent faire l'objet de brevets ou d'innovation, est ouvert à propositions techniques des entreprises lors de la consultation des travaux (figure 9).

Famille 2 : Précontrainte extérieure

Type 19 T15 S en torons clairs sous gaine PEHD injectée de produit souple. Ils sont démontables et assurent une continuité entre la culée C4 et l'about du contrepoids C'0.

Ils sont ancrés au droit des entretoises/déviateurs de chaque pile.

Ils comportent quatre paires en travée 1, trois paires en travée 3, et une paire en travée 4.

Les études de flexion longitudinale ont montré l'inutilité de cette famille en travée 2 centrale par suite du croisement des câbles extradossés.

Famille 3 : Câbles de fléaux

Le fléau P1 nécessite 15 paires de câbles 12 T15 S, plus sept paires destinées à la réalisation du sur-encorbellement dans la travée une (ancrés dans des bossages disposés sous le hourdis supérieur, au droit des raidisseurs des câbles extradossés). Les fléaux P2 et P3 nécessitent respectivement 13 et 7 paires de câbles.

L'encorbellement depuis la culée C0 nécessite 19 paires de câbles de type 19 T 15 S, ancrés en about du contrepoids.

Famille 4 : Câbles éclisses

Ces câbles 12 T15 S sont nécessaires en vue de la mise en précontrainte après clavage en travées. Les nombres prévus sont une paire en travées 1 et 2, deux paires en travée 3, et une paire en travée 4.

L'ancrage est assuré dans des longrines transversales inférieures disposées à mi-voussoirs, et aux abouts des travées de rives.

Famille 5 : Câbles transversaux du hourdis

Le câblage transversal assure la résistance du hourdis en flexion, et l'équilibre des efforts de traction concentrés des bracons (trois câbles 4 T15 S au droit de chaque bracon; un câble 4 T15 S par mètre de hourdis).

Ces câbles sont prévus disposés en gaines et ancrages plats pour assurer les meilleures conditions d'enrobage et d'ancrage dans le hourdis de 0,25 m d'épaisseur.

Les ancrages sont calepinés dans une légère sur-épaisseur de rive du hourdis, de façon homogène avec les fixations des corniches et les plots d'armatures des BN4.

Les ratios d'armatures de précontrainte du projet s'élèvent à 45 kg/m³ de béton pour la précontrainte longitudinale (dont 30 % pour la précontrainte extradossée) et 8,2 kg/m² du hourdis pour la précontrainte transversale.

Le mode constructif

Le tablier est construit par encorbellements successifs à l'aide d'une paire d'équipages mobiles, en pleine section avec intégration des bracons, suivant le phasage suivant :

- ◆ encorbellement P3 (6 voussoirs);
- ◆ travée de rive P3/C4 (sur étaieage);
- ◆ encorbellement P2 (12 voussoirs);
- ◆ clavage travée P2/P3;
- ◆ encorbellement P1 (14 voussoirs);
- ◆ clavage travée P1/P2;
- ◆ surencorbellement P1 côté C0 (7 voussoirs) avec un équipage;
- ◆ contrepoids C0/C'0;
- ◆ encorbellement C0 et clavage travée C0/P1 (11 voussoirs), avec l'autre équipage.

Les déviateurs extradossés en béton sont réalisés dès achèvement des voussoirs sur piles de façon à permettre la mise en œuvre du premier câble extradossé en cours d'encorbellement.

Au projet, la réalisation de voussoirs par l'équipage mobile est envisagée en pleine section avec intégration des bracons.

Le phasage retenu assure une accessibilité à l'avancement du tablier depuis la culée C4 dès les clavages achevés, et un comportement optimal sous vent cyclonique.

Les déviateurs extradossés

Ils sont constitués d'un noyau en béton B60 de section rectangulaire variable coulé entre des plaques préfabriquées de béton blanc poli formant parements en élévation.

Les variations de la section, suivant la hauteur (18 m pour P1 et 9 m pour P2) résultent de l'intégration des recherches architecturales (cohérence de l'élévation générale, perception par l'utilisateur) et des dimensionnements techniques (résistance de la section d'encastrement, insertion des selles de déviateurs des câbles extradossés).

Les sorties de câbles des selles sont protégées par des ailettes en tôle blanche (figure 10).

Les appuis

Les piles P1, P2 et P3

Les fûts des piles en béton B45 sont de sections oblongues (double anse de panier) évidées dégrossives de P1 vers P3.

La pile P1 a une hauteur de 48,10 m, des dimensions de 7,80 m x 6,80 m, et des épaisseurs de béton de 0,60 m et 0,85 m à la base.

La pile P2 a une hauteur de 37,20 m, des dimensions de 8,40 m x 5,80 m, et des épaisseurs de béton de 0,60 m et 0,80 m à la base.

La pile P3 a une hauteur de 8,20 m, des dimensions de 8,70 m x 4,60 m, et une épaisseur de béton de 0,60 m.

Les têtes des piles comportent un chevêtre plein de 4 m de hauteur réalisé sur prédalle. Le chevêtre



Figure 10
Déviateur extradossé sur P1
Curved deviator on P1

LES QUANTITÉS PRÉVISIONNELLES

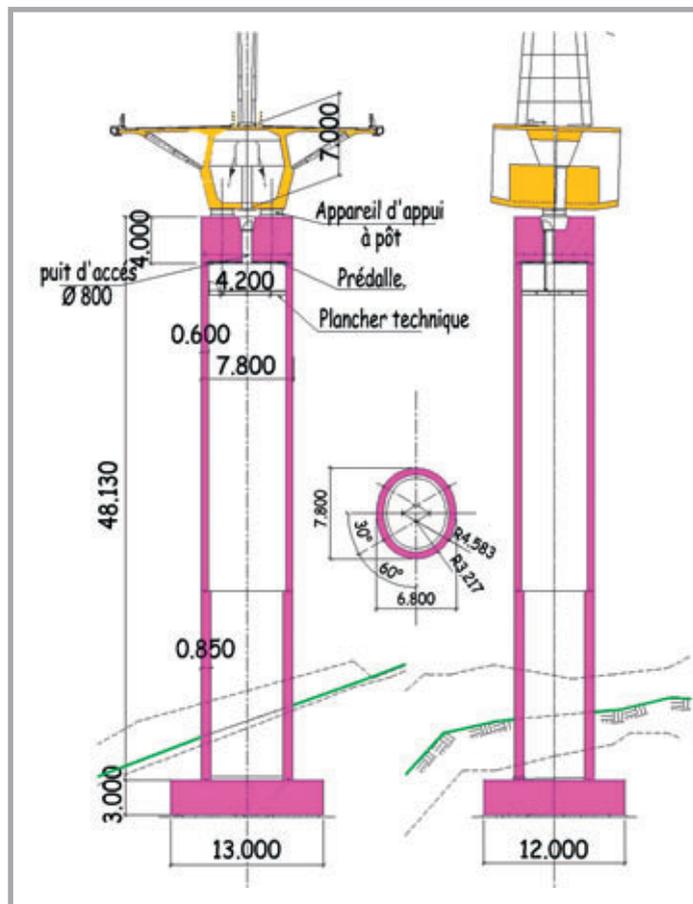
Tablier

- Béton B60 : 6950 m³
- Aciers passifs : 1180 t
- Précontrainte longitudinale : 315,4 t
- Précontrainte transversale : 67,4 t

Appuis

- Béton B35 et B45 : 3910 m³
- Aciers passifs : 645 t
- Micropieux : 1100 m
- Terrassements : 15000 m³ (1/3 en rocher)
- Parois clouées : 630 m²

Figure 11
Principe
de la pile P1
Schematic
of pier P1



► comporte des dispositifs d'accès depuis les VSP à une plate-forme métallique de visite et de travail disposée en tête du fût. Les encastremements provisoires des fléaux d'encorbellement sur les piles sont assurés par des cales et des câbles de clouage ancrés en sous-face des chevêtres. Toutes les piles sont fondées sur des semelles superficielles assises sur les massifs ou bancs basaltiques. La semelle de la pile P1, la plus sollicitée en construction et sous vent cyclonique, est prévue coulée en pleine fouille dans le massif basaltique prédécoupé de la rive gauche au lit mineur (figure 11).

La culée C0/C'0

Cette culée comporte un massif d'appui de la travée de rive principale du tablier (C0), disposé en retrait par rapport à la crête du versant, et fondé sur un ensemble de micropieux inclinés de 250 mm de diamètre minimum et de 15 m de longueur. Ce massif comporte les éléments de butées latérales du tablier. L'ensemble C0/C'0 est réalisé à l'intérieur d'une excavation dans laquelle s'insère la travée d'encastrement de rive droite et dont les talus sont raidis par des parois clouées définitives. La culée C'0 assure l'appui et la butée latérale du contrepoids par une semelle superficielle et une bêche coulée dans le sol, et constitue l'ensemble des structures de soutènement, d'accès à l'ouvrage, et de chambre de travail en about du tablier.

La culée C4

Elle est constituée d'un chevêtre d'appui de la travée de rive gauche du tablier, fondé sur micropieux inclinés par suite du feuilletage des sols d'assises et des efforts sous vent cyclonique. Le raccordement de la culée au terrain naturel est prévu par une culée creuse disposée sous la demi-chaussée aval fondée sur micropieux, et dont les voiles inclinés assurent une transition de forme avec le caisson du tablier. La culée est complétée par un modelé de terrain et un accès pour matériel depuis la plate-forme routière (figure 12).

Les équipements

Les appareils d'appui sont des appuis à pots fixes (deux appuis de 5 500 t sur P1) ou glissants. Ils assurent, sauf sur C0, la transmission aux fondations des efforts horizontaux transversaux.

La collecte des eaux de ruissellement est assurée par des corniches caniveaux latérales desservies par des goulottes dans les longrines, et des réceptacles d'abouts des culées assurant le transit du réseau courant de la route.

L'étanchéité du tablier est assurée, y compris dans le TPC, par une chape en film mince adhérent.

La couche de roulement est constituée de 4,5 cm de BBSG (incluse dans les travaux du pont) et 2,5 cm de BBTM réalisés ultérieurement.

Les dispositifs de sécurité sont des BN4 peintes, en bord de tablier et en TPC pour protection des câbles et déviateurs extradossés.

Les joints de chaussée, équipés de systèmes de collecte des eaux, supportent un trafic T0 pour des souffles de 150 mm (C'0) et 200 mm (C4).

L'accessibilité dans l'ouvrage est assurée par :

- ◆ des rampes, escaliers, échelles et plates-formes au droit et à l'intérieur des culées ;
- ◆ un platelage continu horizontal à l'intérieur du caisson ;
- ◆ des trémies d'accès et de visite d'appuis en tête des piles depuis les VSP ;
- ◆ des plates-formes métalliques de visite disposées à l'intérieur et en tête des fûts des piles.

Quinze fourreaux sont prévus dans un caisson chemin de câble disposé sous le platelage intérieur du caisson.

Le tablier, les têtes de piles et les culées sont munies d'un équipement électrique d'éclairage et de prises raccordables à un générateur.

■ LES CALCULS DE L'OUVRAGE

Flexion longitudinale du tablier

Elle a fait l'objet d'un calcul ST1 avec fluage scientifique sur les bases du phasage et d'un planning prévisionnels.

Flexion transversale du caisson à bracons

Elle a fait l'objet de modélisation aux éléments finis permettant d'apprécier le comportement d'ensemble du hourdis supérieur et des bracons.

Les piles

Ont fait l'objet de calculs en flexion composée déviée et au flambement pour les phases de construction et de services, en intégrant les efforts résultant des calculs aéroélastiques sous vent cyclonique.

Les études au vent

Ont été évaluées à l'aide d'un calcul stochastique modal 3D par le logiciel HERCULE associé à son module HVT.

Les données sont les caractéristiques du modèle de vent, ainsi que les paramètres aérodynamiques de l'ouvrage mesurés sur maquettes rigides et aéroélastiques lors des essais en soufflerie, fournis par le CSTB pour trois orientations du vent (200°, 240° – vent transversal – et 270°).

Modèle de vent

Vent moyen : 48,8 m/s au niveau du tablier (incidence 14°).

Vitesse de pointe associée = 62,1 m/s.

Vitesse pour calcul ELU = 76,1 m/s (soit $V_p \times \sqrt{1,5}$ donnant une sollicitation en pression dynamique majorée par 1,5).

Caractéristiques aérodynamiques du tablier

Coefficients stationnaires

$C_x = 0,218$ (trainée) en construction et service, et $C_y = 0,388$ (portance).

$C_m = 0,165$ (moment) en construction et 0,188 en service.

Amortissements structurels et aérodynamiques

En construction, la dérivé du coefficient C_y par rapport à l'incidence devient négative dans la plage d'incidence du vent sur le site.

Si cet effet n'est pas gênant en service (valeurs négatives plus faibles de la pente du coefficient de portance, premier mode de flexion à 0,86 Hz, prépondérance de l'amortissement structurel positif), il pénalise fortement la phase critique de construction (surencorbellement de P1) dont la fréquence du fléau n'est que de 0,31 Hz, et pour laquelle l'amortissement négatif prédomine.

La maîtrise de ces phénomènes a conduit à augmenter l'encorbellement depuis C0 à 12 voussoirs, au profit du surencorbellement limité à sept vous-

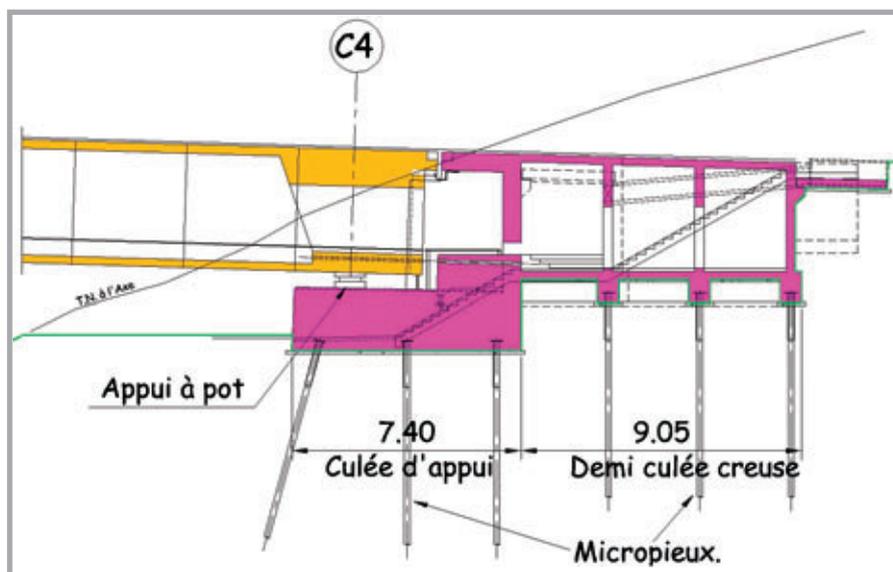


Figure 12
Principe de la culée C4
Schematic
of abutment C4

soirs, et à l'engagement par le CSTB de nouveaux essais sur un modèle aéroélastique en construction.

L'amortissement global à prédominance négative n'apparaît en construction que pour des vitesses moyennes réelles de vent supérieures à 66,8 m/s, valeur supérieure au vent cyclonique.

Coefficients des piles et déviateurs

Les piles sont considérées avec les caractéristiques les plus défavorables entre une section circulaire et une section rectangulaire à angles arrondis :

◆ P1 : C_x varie de 0,67 à 0 et C_y varie de 0 à 0,97; pour les directions du vent de 0 à 90°.

◆ P2 : C_x varie de 0,36 à 0 et C_y de 0 à 1,13.

Les déviateurs sont décomposés en trois éléments rectangulaires superposés.

◆ P1 : C_x varie de 2,19 à 1,94 et C_y varie de 0 à 1,35 pour les directions 0 à 35°.

◆ P2 : C_x varie de 2,14 à 1,82 et C_y varie de 0 à 1,26.

La prise en compte des efforts de vent dans les combinaisons

Phases de service

Le vent extrême cinquantenal est appliqué à la structure et les efforts associés sont pondérés par 1,00 en ELS et 1,5 en ELU fondamental.

Le vent extrême n'est pas cumulé avec les charges routières (alerte cyclonique).

Phases de construction

Eu égard à la durée de construction du tablier (environ 2 ans, considérée comme courte durée), la vitesse du vent en construction est prise égale de façon usuelle à 90 % de vent cyclonique.

Pour les phases supposées réalisées en période cyclonique (mi-novembre à mi-avril) les effets du vent sont pondérés par 1,5 en ELU fondamental.

Les vérifications hors périodes cycloniques (dont le surencorbellement) sont effectuées avec un vent cinquantenal, issu des données du CSTB (V_m)

Figure 13
Insertion
du projet
dans le site

Project
integration
into the site



► = 24,7 m/s transversal), avec des écarts types identiques à ceux des conditions cycloniques. Par sécurité, la stabilité et la résistance des piles ont été également justifiées en construction dans les cas :

- ◆ où le surencorbellement serait nécessairement réalisé en période cyclonique.

Un dispositif optionnel de blocage de l'about du tablier sur C4, préfabriqué et mis en œuvre en cas d'alerte cyclonique, réduit très fortement les efforts de balancement et assure la justification de l'ouvrage en ELU fondamental sous 90 % x vent ;

- ◆ accidentel ELU par application du vent extrême cyclonique cinquantenal en toutes phases.

Amortissements structuraux (décrément logarithmique δ pris en compte dans les calculs :

- **Piles** : $\delta = 0,05$ dans les cas de faibles sollicitations (fléau P3, C0, ouvrage après clavage).

$\delta = 0,10$ dans les cas de fortes sollicitations (suivant EC1 partie 2,4).

- **Tablier** : $\delta = 0,05$ en tous cas (béton précontraint classe 2).

- **Câbles extradossés** : $\delta = 0,02$ (rôle dans le mode de flexion du tablier).

La planification

La conception de l'ouvrage

Les périodes incluent l'ensemble des délais d'exécution des missions de maîtrise d'œuvre, des délais de réalisation des phases successives d'études complémentaires (géotechnique, vent, topographie), les contraintes de planification imposées par la coordination avec la maîtrise d'œuvre générale de la section 2, les délais d'avis des organismes de contrôle, et les délais de validation et de décision du maître d'ouvrage.

Avant-projet d'avril à septembre 2002.

Projet de décembre 2002 à juillet 2003.

DCE de novembre 2003 à janvier 2004.

La consultation des entreprises (sur appel d'offres restreint)

Pré-information en août 2003.

Avis d'appel public à la concurrence en septembre 2003,

Sélection de quatre candidats en CAO en février 2004 :

- ◆ Eiffage TP/Razel/Matière ;

- ◆ Bouygues TP ;

- ◆ Spie Batignolles TPCI ;

- ◆ Vinci Construction GP/Dodin/SBTPC.

Consultation de juin 2004 à septembre 2004.

Ouverture des deux offres remises en CAO en septembre 2004 (Eiffage TP/Razel/Matière TP et Vinci Construction GP/Dodin/SBTPC).

Attribution du marché de travaux à Eiffage TP/Razel/Matière TP en CAO en janvier 2005.

Notification du marché de travaux et OS de démarrage de la période de préparation le 18 juillet 2005.

Les travaux

Un planning détaillé de travaux a permis de valider leur programmation sur 33 mois dont 3 mois de période de préparation incluant les travaux de pistes et de plates-formes.

Le planning des travaux de l'entreprise, recalé à juillet 2005, fait apparaître une réalisation des appuis en 11,5 mois, du tablier en 24 mois, des superstructures et finitions en 10 mois et une livraison mi-avril 2008.

Le surencorbellement réalisé de mi-avril à fin juillet 2007 échappe à la période cyclonique.

L'estimation de l'ouvrage

L'enveloppe financière prévisionnelle des travaux avait été évaluée par le maître d'ouvrage lors du concours de maîtrise d'œuvre base septembre 2000 à 23 M€ HT.

Cette enveloppe a été confirmée sur la base d'une mercuriale de prix de travaux récents spécifiques à la Réunion et relative à des ouvrages d'art importants et notamment construits par encorbellements successifs.

Au cours de la période 2000/2004, les évolutions constatées (mais non reflétées par les indices d'actualisation des prix) des conditions économiques particulières sur l'île de la Réunion, et les augmentations sensibles des coûts de matériaux et de main d'œuvre, ont conduit à la nécessité de réévaluer l'estimation de l'ouvrage d'art des Trois Bassins

L'analyse de ces conditions a conduit le maître d'œuvre à proposer une estimation prévisionnelle au stade DCE de 33,22 M€ TTC, base 2004.

Par décision de la PRM, le montant estimatif a été fixé à 33,55 M€ TTC, soit 30,92 M€ HT.

Les deux offres remises pour les travaux étaient inférieures à ce montant.

L'offre retenue par le maître d'ouvrage (Eiffage TP/Razel/Matière TP) et sur laquelle est passée le marché travaux, s'élève à 31,463 M€ TTC, base août 2004.

Le ratio à la surface de l'ouvrage ressort donc à 3519 €/m²

L'image de synthèse (figure 13) présente la solution extradossée mise en site.

LES PRINCIPAUX INTERVENANTS

Maître d'ouvrage

Région Réunion. Direction d'Opération Route des Tamarins

Maître d'œuvre

Groupement de maîtrise d'œuvre :

- Ingénierie Arcadis ESG (mandataire)
Thalès EC
- Architecture Strates

Directeur de projet

Jacques Frappart (Arcadis ESG)

Tablier

J.-L. Michotey et Nastaran Vivan (Thalès EC)

Appuis et fondations

Michel Boy et Olivier Givet (Arcadis ESG)

Architecture

JV Berlottier et Damien Renaud (Strates)

Etudes dynamiques

Denis Rigault (Arcadis ESG)

Conseils et technologies

Bernard Gausset (Arcadis ESG)

Directeur de travaux

Dominique Aubron (Arcadis ESG)

ABSTRACT

The exceptional engineering structure crossing the Trois Bassins ravine. A curved prestressed concrete bridge

J. Frappart

The curved prestressed concrete bridge is a particularly elegant solution for crossing the Trois Bassins ravine, with its slender, asymmetric shapes suggesting the metaphor of a sail boat. The solidity of the successive cantilever construction technique and the widespread use of concrete, perfectly mastered on Reunion Island, are an assurance of the economic and qualitative success of the project.

RESUMEN ESPAÑOL

La excepcional obra de fábrica de franqueo del barranco de Les Trois Bassins. Un puente de hormigón pretensado con trasdosado

J. Frappart

El puente de hormigón pretensado con trasdosado constituye una solución particularmente elegante para el franqueo del barranco de Les Trois Bassins, cuyas formas disimétricas y delgadas incitan a la metáfora del velero. La solidez del modo de construcción por voladizos sucesivos y el empleo privilegiado del hormigón, perfectamente controlado en la isla de La Reunión, constituyen una prueba de éxito económico y cualitativo de la obra.

L'ouvrage d'art exceptionnel de la ravine des Trois Bassins

Pont à deux arcs convergents

Avec en contrebas la beauté du rivage que dessine le lagon sur l'océan Indien, dominé en arrière-plan par le relief démesuré de la ravine, le site de l'ouvrage Trois-Bassins génère un panorama époustouflant, d'une diversité étonnante. C'est sans doute l'un des franchissements les plus significatifs de la Route des Tamarins. Les grandes lignes du projet ont pour objectif de révéler le site en exprimant la dissymétrie de la brèche en centrant l'ouvrage sur l'axe de la ravine et de préserver le milieu naturel en fond de ravine par un ouvrage sans appui dans la zone.

La force du lieu a privilégié le choix d'une structure aérienne dont l'expression valorise le site et dont l'élégance naturelle de l'arc "métaphore de l'envol du paille-en-queue" s'accorde avec les contraintes techniques de réalisation.

La structure est constituée de deux arcs en béton d'environ 225 m de portée dont la section rectangulaire a une largeur de 4 m pour une hauteur variable de 2,50 m à 6,00 m à la base. Côté nord, les arcs sont convergents entre les deux demi-tabliers.

Le tablier est constitué de deux caissons métalliques à dalle orthotrope de 2 m de hauteur reliés entre eux par des entretoises tous les 12 m. Il est accroché aux arcs par des suspentes disposées en éventail.

ANALYSE DU SITE

Un ouvrage à l'image d'un site exceptionnel

Avec en contrebas la beauté du rivage que dessine le lagon sur l'océan Indien, dominé en arrière-plan par le relief démesuré de la ravine, le site de l'ouvrage Trois Bassins génère un panorama époustouflant, d'une diversité étonnante.

C'est sans doute l'un des franchissements les plus significatifs de la Route des Tamarins. En effet sa situation exceptionnelle dans le paysage lui confère une lisibilité dans toutes les directions, et plus encore une lecture qui s'appréhendera tout autant par-dessus que par-dessous.

L'ouvrage offre à la vue des utilisateurs de la RN1, d'une façon dynamique, l'une des plus longues séquences visuelles du parcours, ce qui lui donne un statut particulier. Il peut devenir le symbole qualitatif de la Route de Tamarins. Une référence exceptionnelle en réponse aux ambitions et aux enjeux qui président à la construction de cette voie pour l'île de La Réunion.

DONNÉES

Implantation de l'ouvrage

L'analyse du site a fait apparaître combien les soutènements de la route, dans sa partie courante, seront lus d'une manière prégnante dans le pay-

sage (figure 1). Plus particulièrement encore à partir de la RN1, d'où l'implantation à mi-pente du tracé sera perçue de façon frontale.

Cette singularité du projet, nous a conduits à remonter le tracé en plan en amont de la ravine, d'environ 50 m par rapport à l'axe de base, et à le faire pivoter afin de tangenter les courbes de niveaux de la rive gauche.

Ce déplacement, associé à une légère modification du profil en long de l'ouvrage, permet à la voie de s'intégrer à la pente d'une façon plus respectueuse du site. En effet, autant sur la rive droite la voie est portée par le versant, sur la rive gauche la pente du versant est plus faible et la lecture de remblais importants risque d'altérer le caractère naturel du site.

L'analyse des contraintes écologiques du site montre par ailleurs que le déplacement de l'axe routier en amont de la ravine protège les zones florales menacées qui sont toutes concentrées en aval de l'axe initial.

Enfin, cette disposition nouvelle de l'ouvrage permet aussi un accès presque plan à partir de la RD9 jusqu'aux pieds des piles, ce qui minimise les difficultés d'approvisionnement du chantier et sauvegarde le fond de ravine.

Parti architectural

La brèche au droit du franchissement de la Route des Tamarins a un profil fortement dissymétrique. Cette particularité est induite par l'axe principal de la ravine calé le long de la rive droite et reliant deux

Figure 1
Plan de situation de l'ouvrage
Location drawing of the structure



de franchissement



Figure 2
Mise en situation
dans le site
*Simulation of situation
in the site*

chutes naturelles, sur un dénivelé de près de 200 m. Cela génère, vue de la RN1, un profond sillon dans le paysage, décalé du centre de l'ouvrage (figure 2).

Les grandes lignes du projet s'articulent autour des principes suivants :

- ◆ dissymétrie : exprimer la dissymétrie de la brèche en centrant l'ouvrage sur l'axe de la ravine ;
- ◆ préserver le milieu naturel :
 - protéger le milieu naturel en fond de ravine par un enjambement sans appui dans cette zone,
 - diminuer l'emprise des remblais,
 - atténuer l'impact de l'emprise des remblais et des soutènements sur la rive gauche en faisant tangenter la route avec les courbes de niveaux, et en remontant le tracé en amont de la ravine.

Parti structurel

L'arc : la réunion du volcan et du ciel

La force du lieu, sa grandeur et les difficultés inhérentes à la construction par phase des grands ouvrages, nous conduisent à privilégier le choix d'une structure aérienne dont l'expression valorise le site.

L'arc offre l'élégance et la légèreté d'un tablier suspendu, sans les contraintes esthétiques des solutions haubanées qui induisent l'émergence de matures dont le caractère aigu n'est pas adapté au tracé à mi-pente de la voie (figure 3).

L'arc comme une évidence dans le site

Métaphore de l'envol du paille-en-queue, l'arc exprime le traitement particulièrement attentif qu'il



Figure 3
Détail
vue architecturale
dans le site
*Details of architectural
view in the site*

faut porter à l'axe du fond de la ravine et à la préservation de sa flore menacée.

Le choix d'une pile concentrée et massive située à la bordure du "tombant", avec une géométrie en pyramide inversé, marque le caractère explosif et sauvage du lieu, par référence à la nature volcanique du sol.

Données fonctionnelles

Tracé en plan. Profil en long

L'ouvrage de franchissement de la ravine est en alignement droit avec une pente longitudinale de 3 % (rampe ascendante vers le nord).

Profil en travers

Le profil en travers fonctionnel comporte, par sens, une bande dérasée de 1,00 m, une chaussée de



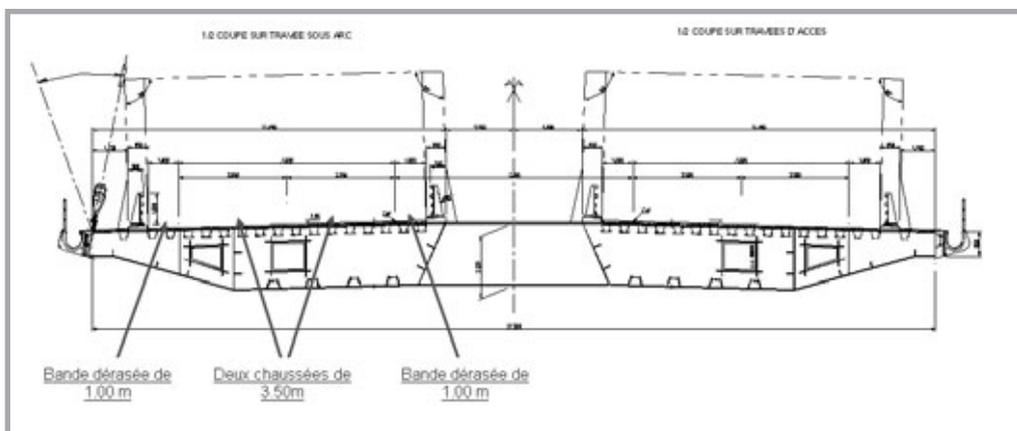


Figure 4
Profil en travers
Cross section

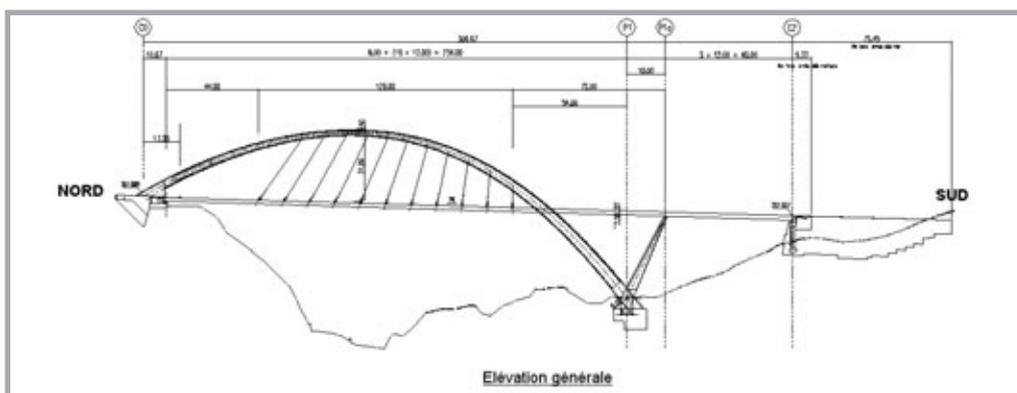


Figure 5
Elévation générale
General elevation view

► 2 x 3,50 m, et une bande dérasée de 1,00 m. Chaque chaussée est déversée à 2,5 % vers l'extérieur (figure 4).

Superstructures

Le tablier comprend les équipements et superstructures suivants :

- ◆ des barrières de sécurité de type BN4;
 - ◆ des corniches caniveaux ramenant les eaux du tablier jusqu'à la culée sud;
 - ◆ des réseaux divers : côté mer 12 Ø 45, 2 Ø 160.
- Le tablier comprend un complexe roulement étanchéité de 7 cm adapté aux contraintes particulières imposées par la dalle orthotrope.

DESCRIPTION GÉNÉRALE DE L'OUVRAGE

La structure porteuse principale est constituée par deux arcs de 227 m de portée. Ces arcs sont situés dans des plans verticaux convergents côté nord, entre les deux demi-tabliers. Côté sud, ils vont s'encaster au fond de la ravine sur un méplat en basalte sain.

Le tablier est composé de deux caissons métalliques à dalle orthotrope accrochés aux arcs par des suspentes disposées en éventail.

Il est également supporté par deux piles inclinées solidarisées à la base avec les arcs (figure 5).

Côté nord, le chevêtre de la culée est solidaire de la naissance des arcs. Côté sud la culée est constituée par un chevêtre et un garde-grève appuyés sur deux poteaux encastres dans une semelle. Le soutènement des terres est assuré par un mur en terre armée (figures 6 et 7).

Le schéma statique

Les arcs sont encastres à leurs bases côté nord et côté sud.

Les conditions d'appuis du tablier sur les culées et la pile sont reportées sur la figure 8.

Les fondations

Culée nord (appui des arcs côté nord)

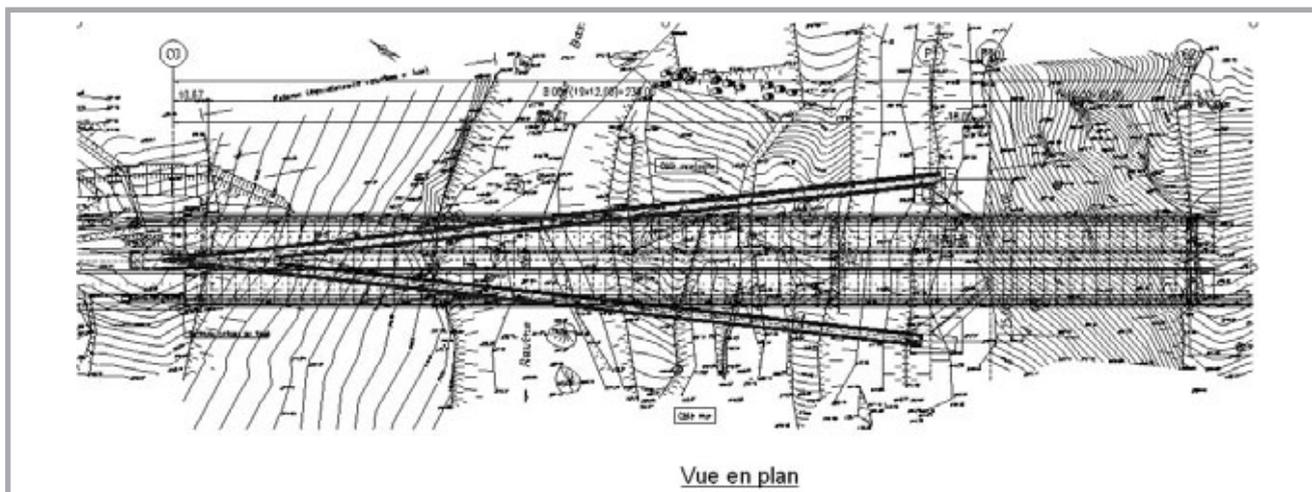
Les fondations des arcs sont des massifs en béton armé B30 ancrés dans le rocher.

La naissance commune aux deux arcs s'appuie sur un massif en forme de tronc de pyramide dont la base est perpendiculaire à la résultante des efforts des deux arcs.

Cette base mesure 18 m de long et 14 m de largeur.

Le sol de fondation est renforcé par des clous d'une dizaine de mètres de longueur (figure 9).

Figure 6
Vue en plan
Plan view



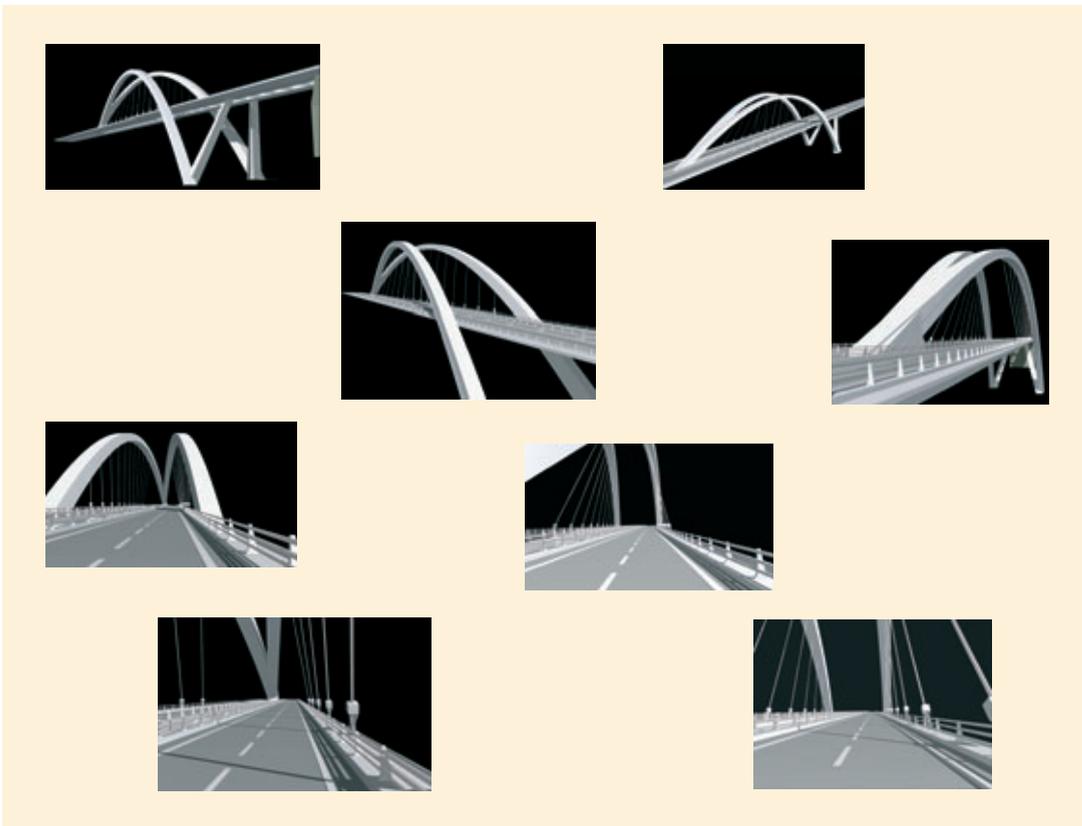


Figure 7

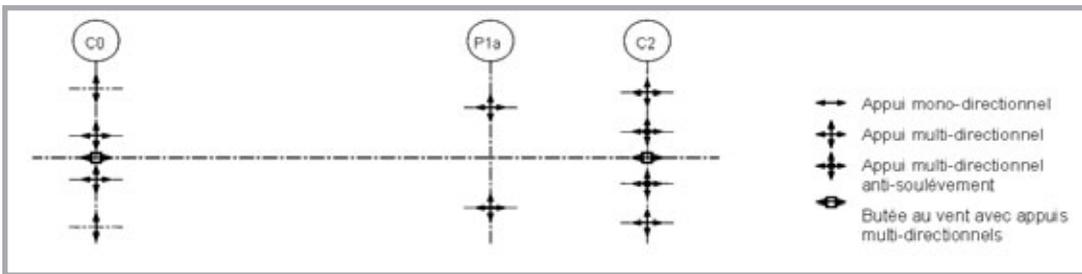


Figure 8
Conditions d'appui
du tablier sur les culées
et la pile

*Conditions of deck
support on the abutments
and the pier*

Appui des arcs côté sud

Sur les côtés montagne et mer, les fondations de l'arc et de la pile sont communes. Les appuis des arcs et des piles sont donc constitués par deux massifs indépendants (un par association pile/arc). Ces massifs sont sur un versant de pente assez importante et sont donc fondés à deux altimétries différentes. Ils ont les dimensions suivantes :

- ◆ côté mer : le massif de fondation consiste en un parallélogramme de surface au sol 13,00 m par 11,00 m et de 6,50 m de haut, dont l'angle supérieur côté sud est biseauté ;
- ◆ côté montagne : ce massif est également inscrit dans un parallélogramme tronqué de 15,60 m par 11 m pour une hauteur de 10,00 m (figure 10).

Culée sud

L'intégration de la culée dans le site s'effectue au moyen d'un massif en Terre Armée avec parements architecturaux. La culée sud reçoit la réaction d'appui verticale du tablier.

Les arcs

Les arcs sont en béton armé B40. Ils sont situés dans des plans verticaux. Leur géométrie a été élaborée selon deux principes majeurs :

- ◆ les arcs sont funiculaires des charges permanentes ;
- ◆ ils respectent le gabarit routier de 4,85 m.

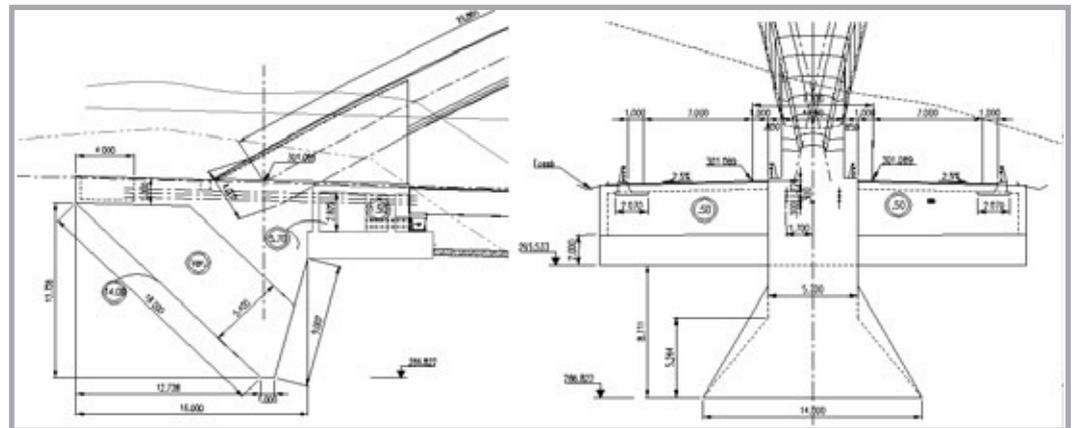


Figure 9
Appui des arcs
côté nord
*Support for arches
on the northern side*

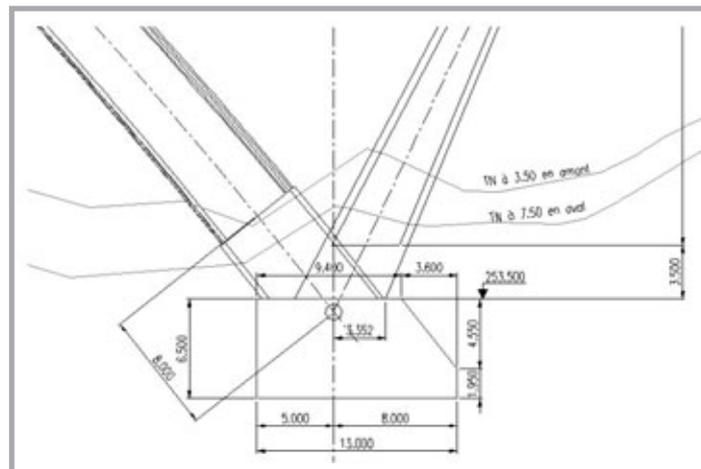


Figure 10
Appui des arcs
côté sud
*Support for arches
on the southern side*

Figure 11
Les arcs
Arches

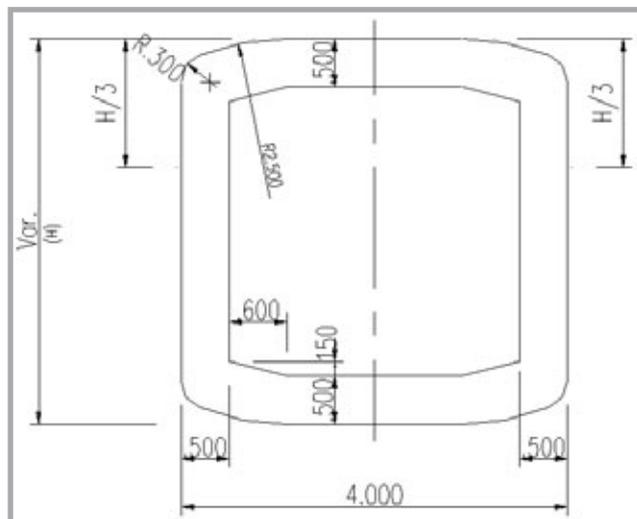


Figure 12
Les suspentes
Suspenders

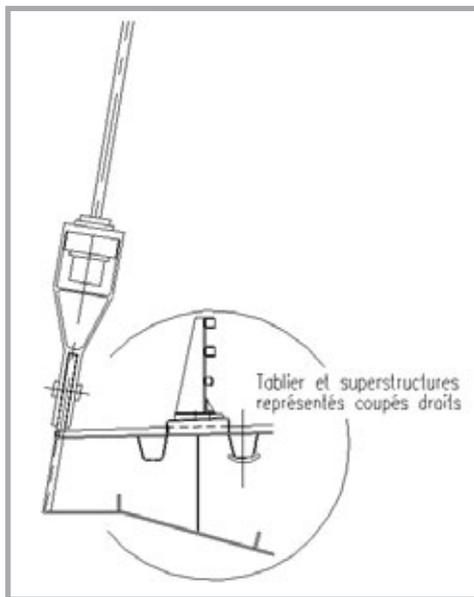
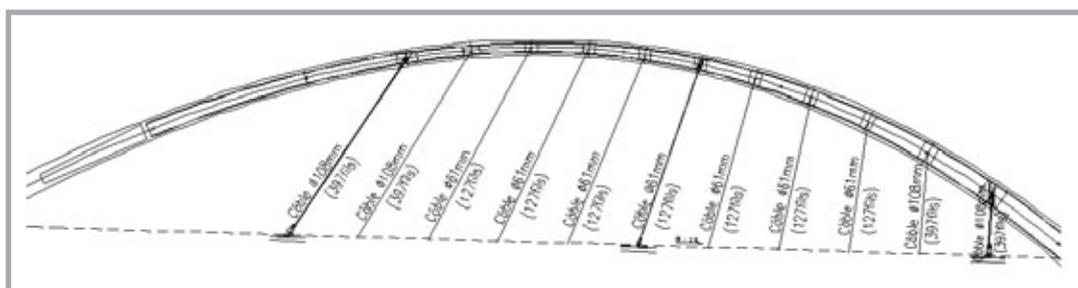
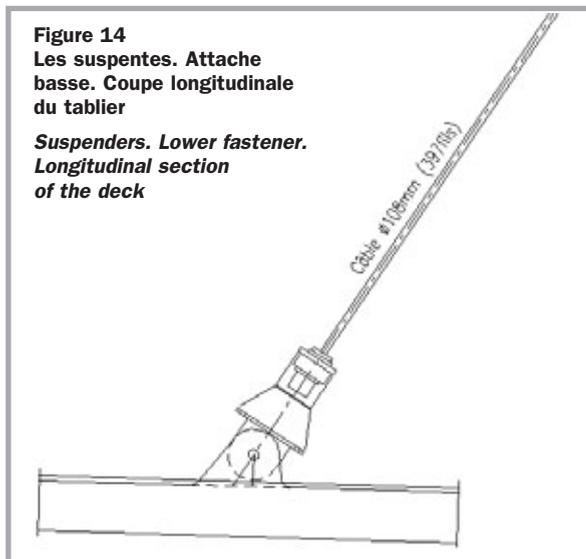


Figure 13
Les suspentes. Attache basse. Coupe transversale du tablier

Suspenders. Lower fastener. Cross section of the deck

Figure 14
Les suspentes. Attache basse. Coupe longitudinale du tablier

Suspenders. Lower fastener. Longitudinal section of the deck



Ce gabarit fait apparaître deux points durs (au niveau du nez de l'arc côté nord, de la première suspente côté nord).
Les extrados des arcs culminent à environ 34,4 m au-dessus du tablier.
Les pieds des deux arcs sont espacés de 50 m au niveau des fondations.
La section des arcs est de forme rectangulaire, avec des angles biseautés sur 1,10 m, puis arrondis suivant un rayon de 30 cm.
La section est variable, pleine aux extrémités, et creuse d'épaisseur 50 cm en section courante.
Ces arcs ont une largeur constante de 4,00 m. Leur hauteur varie d'environ 3,85 m à la jonction des

deux arcs, à 2,50 m au sommet et 6,00 m côté sud.

Sur le tiers supérieur de la hauteur, des rainures architecturales sont mises en place tous les 200 mm (figure 11).

Les piles inclinées

Côté sud, le tablier s'appuie sur deux piles creuses inclinées en béton précontraint B40.

Ces piles sont de section rectangulaire variable. La section en tête de piles Est et Ouest est de 4 m x 1,80 m. En pied de pile, elle est de 5,40 m x 5,50 m. L'épaisseur des voiles est de 0,50 m avec une partie pleine en tête et en pied.

Pour chaque pile, 20 câbles 19T15S sont ancrés d'un côté régulièrement dans le fût de pile et de l'autre côté dans le massif de fondation.

Le tablier

Le tablier est constitué par deux caissons à dalle orthotrope de 2 m de haut réunis entre eux par des pièces de pont de 4,40 m de long espacées de 12 m. Des entretoises sont disposées tous les 4 m à l'intérieur des caissons.

Il est accroché aux arcs par des suspentes en câbles disposées en éventail du sud vers le nord.

Il s'appuie de chaque côté sur les culées, et repose également, à 236 m de la culée nord, sur les deux piles inclinées. Les efforts dus à l'inclinaison des suspentes sont repris dans la culée nord.

Les éléments de tablier sont en acier S355.

Les suspentes

Les suspentes sont constituées par des mono-torons. Il a été envisagé deux familles de suspentes. Les deux premières suspentes côté nord et les deux premières côté sud reprennent des efforts importants. Elles sont constituées par des câbles composés de 397 fils de 4,7 mm de diamètre (Ø 108). Les suspentes courantes sont des câbles de 127 fils de 4,7 mm (Ø 61) (figure 12).

L'attache basse des suspentes est réalisée de la manière suivante. Localement, le bandeau de rive du tablier remonte au-dessus de la surface de roulement pour constituer une chape mâle sur laquelle s'articule une chape femelle en acier moulé. Le câble mono-toron est ancré dans un culot en acier moulé fileté à l'extérieur (le filetage étant de type dit d'artillerie). Ce culot prend appui sur la platine supérieure de la chape femelle par l'intermédiaire d'une bague fileté formant écrou (figures 13 et 14).

La chape femelle présente à mi-hauteur deux consoles triangulaires sur lesquelles s'appuient les barres de précontrainte qui permettent la mise en tension et le réglage des suspentes.

L'attache haute est réalisée comme suit. Deux

tôles équipées de connecteurs servent de coffrages intérieurs aux âmes et aux goussets du caisson de l'arc. La longueur, l'épaisseur de ces tôles et le nombre de connecteurs sont fonction de l'effort apporté par le hauban à ancrer. Sur ces tôles sont soudées deux "persiennes" normales aux âmes de l'arc. Ces persiennes servent d'appui à la plaque d'ancrage du hauban.

L'appui du culot du hauban se fait comme en partie basse par l'intermédiaire d'une bague filetée, la surface d'appui de cette bague étant sphérique afin de tenir compte des éventuels petits défauts d'alignement lors de l'exécution (figures 15 et 16).

L'ensemble des tôles coffrantes et persiennes s'intègre dans l'outil coffrant servant à la réalisation des arcs.

■ CONSTRUCTION DE L'OUVRAGE

Fondations, piles et culées

Les fondations, les piles et les culées sont réalisées de manière traditionnelle. Le béton des massifs de fondation des arcs est coulé en majorité à pleine fouille.

Construction des arcs

Après plusieurs études, nous avons opté pour une solution consistant à construire les arcs sur un cintre général car cette technique nous est apparue comme étant la plus sûre en particulier dans le cas où, suite à un dérapage du planning, une partie de la construction des arcs aurait lieu en période cyclonique.

Le cintre

Chaque arc est construit sur un demi-cintre, les deux demi-cintres convergeant au voisinage de la culée nord, chaque demi-cintre est constitué par une poutre triangulée de hauteur variable dont la membrure supérieure suit la forme des arcs et dont la membrure inférieure est rectiligne et suit approximativement le profil en long de l'ouvrage.

Côté sud, chaque poutre est encastrée sur un ensemble de deux palées verticales contreventées entre elles. Côté nord, la partie commune des deux demi-cintres est simplement appuyée sur la culée. Les deux demi-cintres sont contreventés entre eux au niveau de leurs membrures supérieures et inférieures. Au niveau des membrures inférieures des traverses supportent un pont de service. Le cintre est construit par encorbellements successifs à partir des palées sud. Il a été vérifié que cet ensemble était capable de résister à un cyclone même lorsque l'extrémité nord n'est pas en appui sur la culée (figure 17).

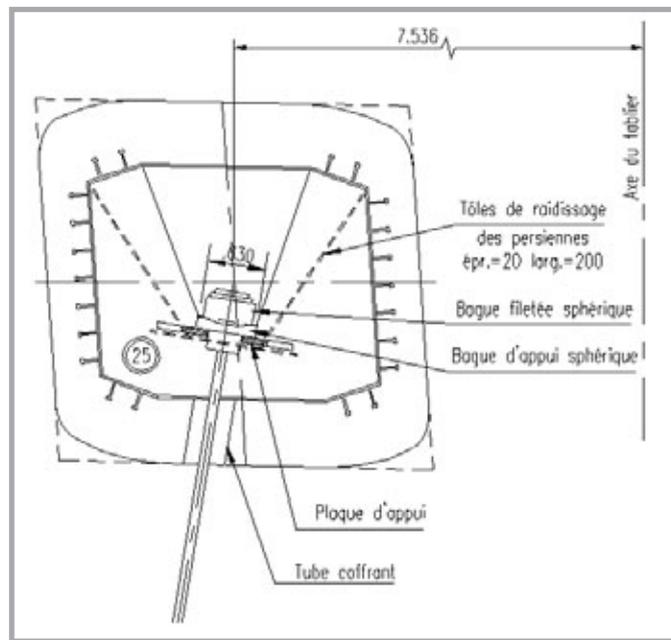


Figure 15
Les suspentes. Attache haute du hauban. Coupe transversale de l'arc

Suspenders. Upper fastener of the stay cable. Cross section of the arch

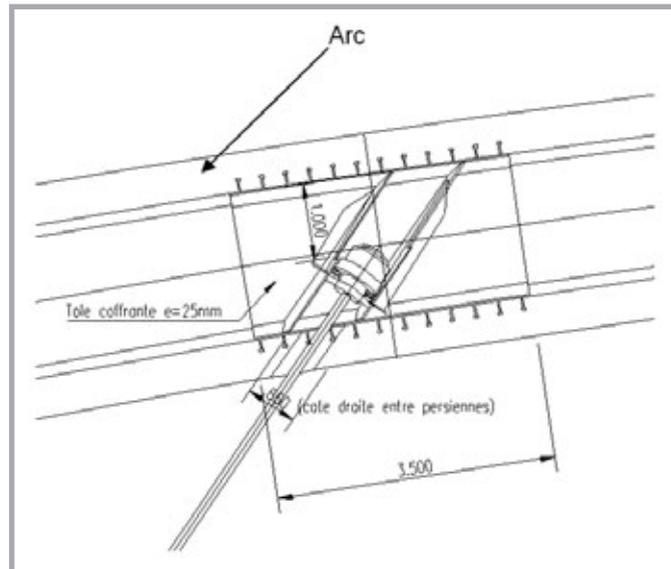


Figure 16
Les suspentes. Attache haute du hauban. Coupe longitudinale de l'arc

Suspenders. Upper fastener of the stay cable. Longitudinal section of the arch



Figure 17
Le cintre
Centering

Construction des arcs

Côté sud, chaque arc est construit à l'aide d'un outil coffrant dont la longueur utile (27,25 m) est égale à la trame de la triangulation du cintre, ainsi toutes les charges sont appliquées aux nœuds de la triangulation.

Cet outil permet la réalisation de voussoirs d'environ 5 m de long.

Le poids de l'outil ainsi que celui du béton avant

Figure 18
Phasage
de construction
des arcs
*Arch construction
scheduling*

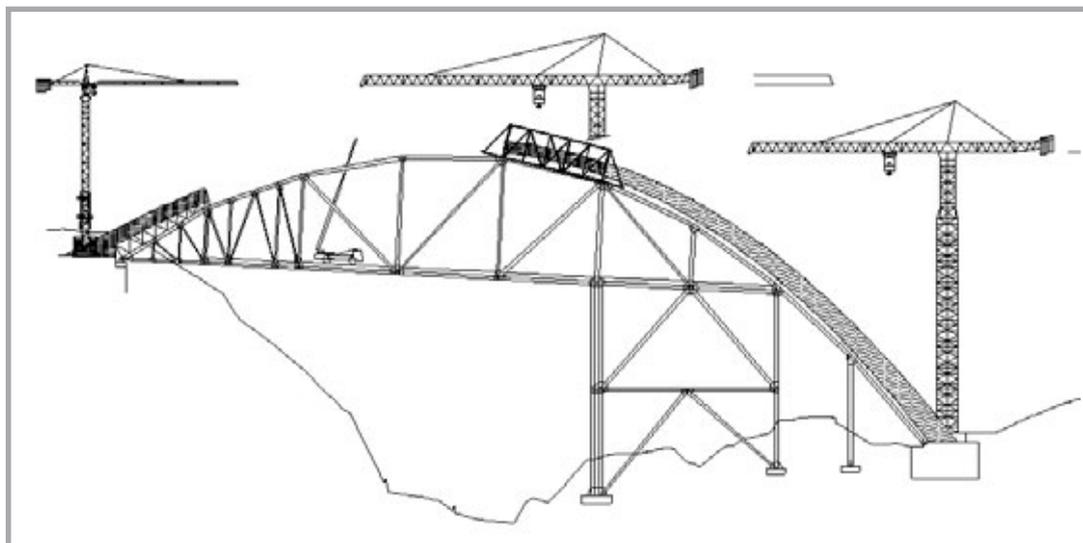
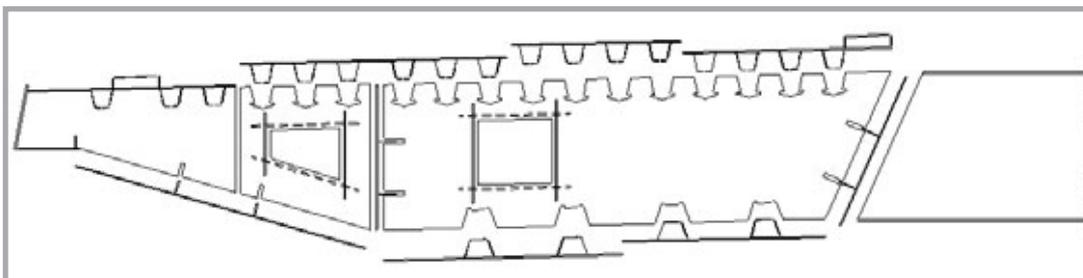


Figure 19
Vue schématique
du tablier
*Schematic view
of the deck*



et après coffrage sont transmis au cintre par des potelets et des vérins disposés verticalement, et encastrés dans l'arc. Ainsi les cintres ne subissent aucune composante horizontale.

Côté nord, les deux premiers tronçons de 27,25 m sont coulés sur des coffrages directement appuyés sur le cintre ce qui a nécessité la réalisation d'une triangulation secondaire entre les membrures supérieures et inférieures.

Le dernier plot est coulé par voussoirs en partant de la culée nord. L'équipage s'appuie à l'avant sur le plot nord coulé en place.

Après clavage, le décintrement des arcs se fait par dévérinage des potelets d'appui des arcs sur les cintres (figure 18).

La cadence moyenne de construction des arcs est de 1,25 mois pour une trame de 27,25 m soit un temps global de 9 mois (les deux tronçons côté nord étant réalisés en temps masqué).

Après décintrement des arcs, le démontage des cintres s'effectue par "désencorbellement". Les palées étant maintenues en place et équipées pour servir d'appuis provisoires au tablier métallique lors de son lancement.

D'autre part, on profite de la présence du cintre pour mettre en place trois traverses appuyées sur les arcs, et les suspentes provisoires qui serviront ultérieurement au lancement du tablier.

Construction du tablier

La construction du tablier métallique selon la méthodologie définie ci-après nous est apparue comme étant la plus raisonnable.

Il est évident que l'on peut recourir à d'autres méthodes, mais elles doivent respecter certains impératifs vis-à-vis de la sécurité de l'ouvrage. En particulier la durée pendant laquelle l'ouvrage en cours de lancement présente un porte-à-faux important, doit être suffisamment courte pour être réalisée sous couverture météorologique vis-à-vis des cyclones.

Fabrication du tablier

Le tablier est fabriqué et construit par tronçons de 12 m de long, cette dimension qui correspond à trois longueurs de panneaux de dalle orthotrope ne semble pas poser de problème pour l'approvisionnement de panneaux raidis sur le site (figure 19).

En usine, chaque tronçon de tablier est découpé en panneaux élémentaires, correspondant à la dalle orthotrope, aux âmes, aux fonds des caissons, aux rives extérieures des caissons, aux diaphragmes, et aux pièces de pont. Ces éléments sont transportés sur le site et assemblés sur la plate-forme côté sud.

Mise en place du tablier

Préalablement à toute opération de lançage, on équipe l'extrémité du tablier d'un avant-bec de 25 m et on construit une palée provisoire juste en avant de la pile P1.

La mise en place du tablier s'effectue selon le phasage suivant :

- ◆ lancement jusqu'à ce que le tablier soit en porte-à-faux de 48 m au-delà de la palée nord ;
- ◆ mise en place et mise en tension d'une première suspente provisoire ;
- ◆ avancement du tablier de 24 m ;
- ◆ mise en place et mise en tension d'une deuxième suspente provisoire ;
- ◆ déplacement de l'ancrage bas de la première suspente de 24 m vers l'arrière. Mise en tension des suspentes ;
- ◆ avancement du tablier de 24 m ;
- ◆ même principe d'avancement du tablier avec mise en place d'une troisième suspente ;
- ◆ avancement jusqu'à l'appui sur la culée nord ;
- ◆ mise en place des suspentes définitives ;
- ◆ mise en œuvre des appareils d'appuis ;
- ◆ pose des superstructures et réglage final de la tension des suspentes.

CONCLUSION

L'ouvrage présenté au travers du présent article a été mis en consultation au troisième trimestre 2004 simultanément avec la solution à précontrainte extradossée concurrente qui s'est révélée sensiblement moins chère. Le Conseil régional, maître d'ouvrage, a finalement décidé de ne pas donner suite à la solution à deux arcs convergents.

ABSTRACT

The exceptional engineering structure crossing the Trois Bassins ravine. Bridge with two converging arches

Y. Maury, M.-V. Peron, N. Mayeur

With down below the beauty of the shore of the lagoon on the Indian Ocean, dominated in the background by the vast relief of the ravine, the site of the Trois-Bassins project provides an astounding panorama, of astonishing diversity. It is undoubtedly one of the most significant crossings on the Route des Tamarins highway.

The main features of the project are designed to reveal the site by expressing the asymmetry of the breccia (the structure being located on the centre-line of the ravine), and to protect the natural environment at the bottom of the ravine by a structure with no supports in the area.

Given the powerful scenery, an above-ground structure was chosen, whose expression enhances the standing of the site, with the natural elegance of its arch "mimicking the flight of the tropicbird" while complying with the technical constraints of construction. The structure consists of two concrete arches of approximately 225 metres in span, with a rectangular cross section of width 4 metres and of variable height 2.50 m to 6.00 m at the base.

On the northern side, the arches are convergent between the two half-decks. The deck consists of two orthotropic-slab steel box girders 2 metres high connected together by braces every 12 metres. It is attached to the arches by suspenders arranged fanwise.

RESUMEN ESPAÑOL

La excepcional obra de fábrica de franqueo del barranco de Les Trois Bassins. Puente de dos arcos convergentes

Y. Maury, M.-V. Peron y N. Mayeur

Con una vista panorámica que contempla la belleza del litoral dibujado por la albufera sobre el océano indico y, dominado en segundo plano por el relieve desproporcionado del barranco, el emplazamiento de la obra de Les Trois-Bassins, genera una perspectiva asom-

brosa, con una diversidad sorprendente. Sin lugar a duda se trata de uno de los franqueos más significativos de la carretera de los Tamarindos.

Las grandes líneas del proyecto tienen como objetivo poner de manifiesto el emplazamiento expresando la disimetría de la brecha y centrando la obra sobre el eje del barranco y preservar así el medio natural en el fondo del barranco por una estructura sin apoyo en la zona.

La intensidad del paraje ha dado preferencia a la opción de una estructura aérea cuya expresión valoriza el emplazamiento y cuya elegancia natural del arco "metáfora del despegue del ave tropical denominado paille-en-queue" se ha valorizado con los imperativos técnicos de realización.

La estructura está formada por dos arcos de hormigón de 225 metros de luz cuya sección rectangular tiene una anchura de 4 m para una altura variable de 2,50 m a 6,00 m en la base.

Por el lado Norte, los arcos son convergentes entre los dos semitableros.

El tablero está compuesto por dos cajones metálicos de losa ortótropa de 2 m de altura conectados entre sí por traviesas cada 12 m. El tablero está colgado a los arcos mediante cables de suspensión dispuestos en abanico.

Le viaduc de la Grande Ravine

Un pont à effet d'arc limité

Le viaduc de la Grande Ravine fait partie des ouvrages dits exceptionnels de la Route des Tamarins. L'ouvrage franchit la brèche de la Grande Ravine, dont les dimensions vertigineuses sont d'environ 320 m de largeur au niveau du terrain naturel et 170 m de profondeur. Les principales contraintes du projet sont environnementales (faune et flore protégées), topographiques (pentes très importantes sur les flancs et très grande profondeur interdisant toute construction à partir du fond de la ravine) et climatiques (risques cycloniques tant en construction qu'en service).

L'ouvrage est constitué d'un tablier métallique à dalle orthotrope de 288 m de long rotulé sur deux bracons en béton précontraint hautes performances inclinés de 20° par rapport à l'horizontale. Le tablier est mis en place par lancement depuis les deux bords de la ravine. Les bracons sont encastrés en pied sur des culées contrepoids et tenus en tête par des tirants constitués de câbles de précontrainte extérieure situés à l'intérieur du tablier. Les culées sont fondées sur semelle superficielle à l'arrière sous le contrepoids et sur puits à l'avant.

Le phasage de construction et les fonctionnements structurels différents avant et après clavage, ainsi que le rôle des tirants provisoires et définitifs en font un ouvrage particulier, qui peut se définir comme un pont avec effet d'arc limité et contrôlé.

■ PRÉSENTATION DU PROJET

Le viaduc de la Grande Ravine s'intègre dans le tracé de la Route des Tamarins sur la commune de Trois Bassins (figure 1).

L'attribution du marché de maîtrise d'œuvre pour l'étude et la construction de l'ouvrage d'art exceptionnel sur la Grande Ravine a fait l'objet d'une procédure de consultation par concours. La commission permanente du Conseil régional, dans sa séance du 29 mars 2002, a désigné le groupement Setec TPI/Spielmann comme lauréat du concours.

Les études d'avant-projet et de projet ont été conduites entre 2002 et 2004, sous le contrôle du Setra. Un premier appel d'offres ouvert pour la réalisation des travaux a été lancé en décembre 2004 et déclaré infructueux en mai 2005. Un second appel d'offres ouvert est en cours. Les travaux de réalisation de l'ouvrage devraient débuter début 2006.

■ CONTRAINTES DU PROJET

Contraintes fonctionnelles

Le profil en long de l'ouvrage est en pente unique à 0,5 %, en descendant de la rive droite vers la rive gauche. Le tracé en plan est rectiligne. Le profil en travers est en toit, avec un dévers de 2,5 %, le tablier unique étant de largeur roulable 18,60 m.

Données naturelles

L'ouvrage est exceptionnel de par les dimensions de la brèche : largeur de 320 m au niveau du terrain naturel et profondeur de 170 m. Les pentes

très importantes sur les flancs et la très grande profondeur interdisent toute construction à partir du fond de la ravine.

Les bords de la Grande Ravine sont constitués d'alternance de bancs métriques de basalte et de scories de qualité moyenne. Le pendage général de ces bancs est d'environ 15° vers l'aval. La contrainte admissible du terrain de fondation dépend de l'horizon concerné : forte sur les bancs de basalte à moyenne voire faible pour les scories.

Ces données, comme les données géométriques, ont conduit à concevoir un ouvrage "léger" dont les fondations sont à une distance de l'ordre de 25 m des falaises de la ravine (figure 2).

L'île de la Réunion, de par sa situation dans le sud-ouest de l'océan Indien, est sur la trajectoire de phénomènes climatiques tels que les dépressions tropicales et les cyclones. Il est donc impératif de prendre en compte les risques cycloniques aussi bien lors de la construction que lors des phases de service. L'ouvrage est étudié pour résister en service à des vents cycloniques pouvant atteindre 270 km/h en pointe. L'étude de ces vents a fait l'objet d'essais en soufflerie au CSTB.

Contraintes environnementales

Le fond de la Ravine abrite une faune et une flore sensibles qu'il convient impérativement de protéger.

La Grande Ravine présente notamment des sites de nidification de puffins de baillon, espèce protégée d'oiseaux indigènes. Il est estimé que les risques de collision des puffins de baillon avec des éléments de l'ouvrage traversant la ravine sont augmentés si ces éléments sont de faible dimension. En conséquence, le programme établi par le maître d'ouvrage indiquait qu'en application du principe de précaution, toutes les solutions d'ouvrage à suspension (haubans, câbles, suspentes) étaient interdites. Les systèmes de suspension ou de haubanage provisoires étaient en revanche autorisés, sous réserve d'en étudier les dispositions vis-à-vis des collisions par les puffins de baillon et d'en limiter le temps d'utilisation.

■ CONCEPTION GÉNÉRALE DE L'OUVRAGE

L'ouvrage est constitué d'un tablier métallique à dalle orthotrope de 288 m de long rotulé sur deux bracons en béton précontraint hautes performances

Figure 1
Plan de situation
de l'ouvrage
Location drawing
of the structure



Ravine et contrôlé

inclinés de 20° par rapport à l'horizontale. Le tablier est mis en place par lancement depuis les deux extrémités. Les bracons sont encastrés en pied sur des culées contrepoids et tenus en tête par des tirants constitués de câbles de précontrainte extérieure situés à l'intérieur du tablier. Les culées sont fondées sur semelle superficielle à l'arrière sous le contrepoids et sur puits à l'avant (figure 3).

■ PARTI ARCHITECTURAL

Le site de la Grande Ravine est exceptionnel : à quelques distances de l'océan Indien immense et bien visible depuis le site, une brèche large de 300 m et profonde de 170 m évoque les canyons légendaires.

Cette brèche véritablement unique offre à l'observateur une relation hors norme entre toute construction humaine qui la franchit et le site qui apparaît comme un défi à relever. La puissance émotionnelle qui émerge du site nous a inspiré de proposer un tablier fin et linéaire comme une lame venant se poser entre les parois, discrètement et avec élégance.

L'esthétique minimaliste a été proposée pour mettre en valeur le site et accuser le contraste entre les parois verticales et l'horizontalité du pont. Accuser ce contraste entre la profonde faille du site et la finesse de notre ossature produit un effet saisissant : voilà ce qui a été recherché et étudié jusque dans le détail.

La finesse et l'élégance de notre parti architectural se décrit ensuite dans les diverses parties du projet.

Le tablier à quatre âmes est inspiré de celui de Saint-Cloud dans sa première version métallique, et les bracons sont un développement des béquilles du pont de Garabit et des études d'ouvrages à doubles béquilles (A86, Auxerre). L'alliance du métallique et des culées et bracons en béton exprime ce parti architectural.

Le programme du concours demandait un ouvrage discret qui s'efface devant le site, qui soit marquant et qui vienne s'insérer dans la Grande Ravine sans "perturber ni la faune ni la flore". Il est apparu très souhaitable de proposer un ouvrage à tablier léger, facile à lancer, métallique, de hauteur constante qui apparaisse comme une lame dans le paysage. L'ouvrage est repris par des bracons encastrés dans des fondations elles-mêmes enfouies dans la roche des deux rives. Cette proposition avec des bracons très inclinés dérive des ponts à béquilles



Figure 2
Intégration de l'ouvrage dans le site (photomontage)
Integration of the structure into the site (photomontage)

Jean-Emile Croiset

DIRECTEUR
Setec TPI



Jacques Ryckaert

DIRECTEUR DE PROJET
Setec TPI



Alain Spielmann

ARCHITECTE



Grégory Viel

INGÉNIEUR PRINCIPAL
Setec TPI

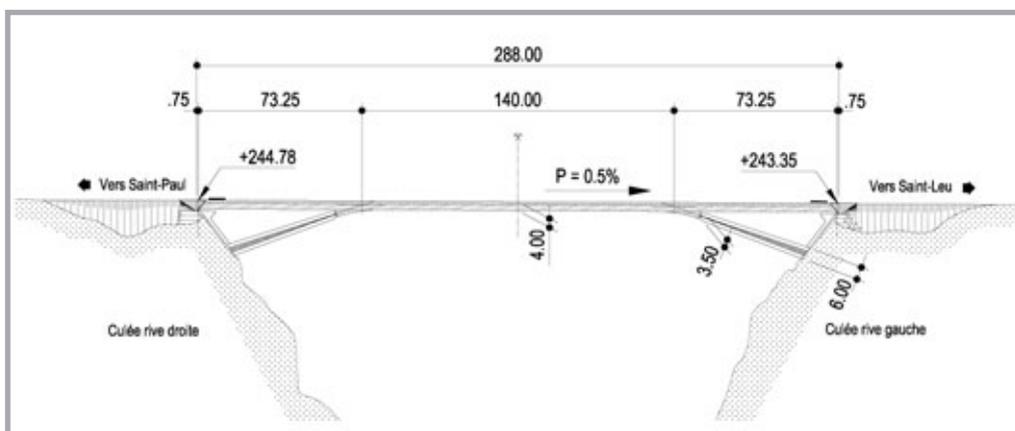


Figure 3
Élévation de l'ouvrage
Elevation view of the structure

mais a des proportions plus "tendues". Elle offre ainsi à la vision un aspect dynamique tout en "consommant" peu de terrain. Cette solution économique en dégradation de roche permet de conserver le plus possible l'environnement et le site. La hauteur du tablier est minimale. Les impacts, en terme de surface dans les deux falaises, ont été réduits pour ne pas perturber les falaises et leur laisser tout leur caractère (figure 4).

L'ouvrage plat, très effilé, très tendu exprime avec vigueur le dynamisme et la puissance nouvelle de la technique du XXI^e siècle : la haute technologie permet de nouveaux progrès et génère de nouvelles



Figure 4
Photomontage
de l'ouvrage
*Photomontage
of the structure*



Figure 5
Maquette
de l'ouvrage
*Mock-up
of the structure*

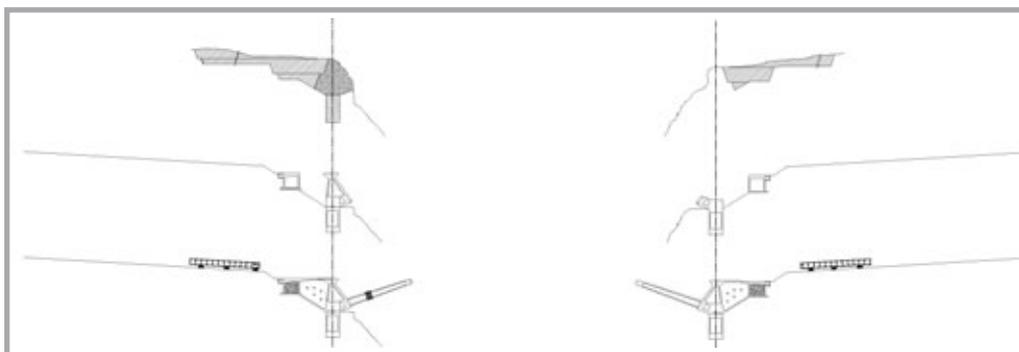


Figure 6
Cinématique 1
Kinematic 1

formes. L'inclinaison des bracons et l'horizontalité du tablier symboliseront l'ouvrage et sa modernité :

- ◆ un tablier métallique lançable, "une lame dans le paysage" longue de 288 m, "une lame dans le ciel", d'épaisseur 4,00 m, soit 1/70 de la largeur totale de la brèche (1/35 de la portée entre appuis), ce qui donne à ce pont une allure hors normes ;
- ◆ deux bracons en béton de chaque côté qui reprennent les efforts, de largeur identique au hourdis inférieur du tablier, 6 m environ, pour assurer la continuité visuelle des plans, qui "soutiennent la lame" comme "un doigt qui porte la lame" ;
- ◆ une culée à nervure, saillante, de largeur égale au bracon ;
- ◆ une culée à deux murs latéraux pris dans le terrain pour limiter l'impact dans l'environnement ;
- ◆ des murs en retour avec des abouts subverticaux parallèles aux corbeaux du mur de front ;
- ◆ un ouvrage qui donne l'impression d'être posé

en contraste avec le site de falaises et de canyons ;
◆ un ouvrage très profilé, métallique, sobre qui recherche l'extrême simplicité de ses lignes et l'élégance (figure 5).

■ CINÉMATIQUE DE CONSTRUCTION

Réalisation des culées et des bracons

Dans un premier temps sont réalisés les terrassements généraux et les fondations des culées. Les bracons sont ensuite construits par encorbellement à partir des culées (figure 6).

Mise en place d'un tirant provisoire reliant la tête du bracon à la culée et lancement du tablier

Ce tirant est destiné à soulager le moment d'encastrement du bracon dans la culée, limitant ainsi la quantité de précontrainte à mettre en œuvre dans le bracon. La demi-longueur totale du tablier est assemblée sur la rive, puis lancée dans un premier temps jusqu'à une position légèrement au-delà du bracon, position à laquelle est mis en place un arrière-bec et un portique d'accrochage sur la culée, permettant d'assurer l'équilibre statique en fin de lancement. La deuxième phase de lancement est alors engagée, jusqu'à la position de clavage, cette phase se devant d'être rapide et sous couverture météo, l'ouvrage étant alors très sensible aux vents violents. Les deux demi-tabliers sont lancés simultanément et brûlés dès la position finale atteinte, le brûlage permettant de supporter un vent décennal hors période cyclonique. La tension du tirant provisoire en tête de bracon est ajustée en fonction de l'augmentation progressive de la réaction d'appui du tablier. Des appuis glissants montés sur un bâti provisoire en tête de bracon, constituent l'appui provisoire amont. L'articulation définitive, en tête de bracon, est mise en place pendant les opérations de lancement, en utilisant le tablier déjà partiellement lancé pour son transport. Le bâti de l'articulation est ensuite soudé au tablier en fin de lancement. A la fin du lancement, le tablier est cloué sur la culée (figure 7).

Transfert des tirants et déverinage de l'appui de lancement

Sur chaque rive successivement, les articulations en tête de bracon, mises en place au cours du lancement et soudées depuis sous le tablier, vont progressivement être mises en charge au cours d'une opération conjuguant par phases mise en tension

partielle des câbles de tirant définitif, dévêrinage partiel de l'appui de lancement, détension partielle des câbles de tirant provisoire.

A l'issue de cette opération, le tirant provisoire a été transféré de la tête de bracon à l'intérieur du tablier en tirant définitif, conservant ainsi la limitation du moment d'encastrement à l'enracinement du bracon sur la culée (figure 8).

Clavage central du tablier, vérinage et pose des superstructures

Suite à ce clavage, les extrémités de tablier sont vérinées verticalement de 50 cm. Les appuis définitifs du tablier sur les culées, ainsi que les butées transversales définitives, sont alors mis en place. Ce vérinage a pour double objectif de soulager le moment dans le tablier au droit des bracons et d'augmenter la réaction positive du tablier sur les culées sous charges permanentes.

A partir du moment où l'ouvrage est clavé, il fonctionne comme un pont à béquilles.

DESCRIPTION DE L'OUVRAGE

Tablier

Le tablier est un caisson profilé, métallique multi-tubulaire à dalle orthotrope :

- ◆ droit avec pente constante de 0,5 %;
- ◆ hauteur constante 4,00 m, sauf au droit des sabots d'appui des rotules;
- ◆ largeur 19,90 m (hors corniches);
- ◆ longueur totale 288 m;
- ◆ distances : 73,25 m - 140 m - 73,25 m entre points d'intersections des lignes moyennes du tablier et des bracons;
- ◆ aciers constitutifs S355 (zones courantes) et S460 (zones renforcées au droit des articulations) (figure 9).

Le tablier s'appuie sur les bracons à l'aide d'articulations. Il repose au droit des culées sur des appuis classiques glissants avec des butées d'immobilisation transversales. Des tirants définitifs courent à l'intérieur du caisson depuis les zones de renfort au droit des articulations jusqu'aux culées. Ils ne sont liés au tablier qu'au droit des articulations, les tôles qu'ils traversent ensuite (cadres renforcés et fermeture du tablier) laissant passer les câbles sans les dévier. Ainsi, ces câbles ne sont déviés qu'à l'intérieur des culées.

La transmission des efforts du tablier aux articulations se fait par le biais de deux flasques rentrant dans le caisson et s'accrochant aux semelles supérieures et inférieures de celui-ci. Les flasques font environ 14 m de longueur. Elles vont de la position finale de l'appui de lancement jusqu'au-delà des ancrages des tirants définitifs, renforçant le ta-

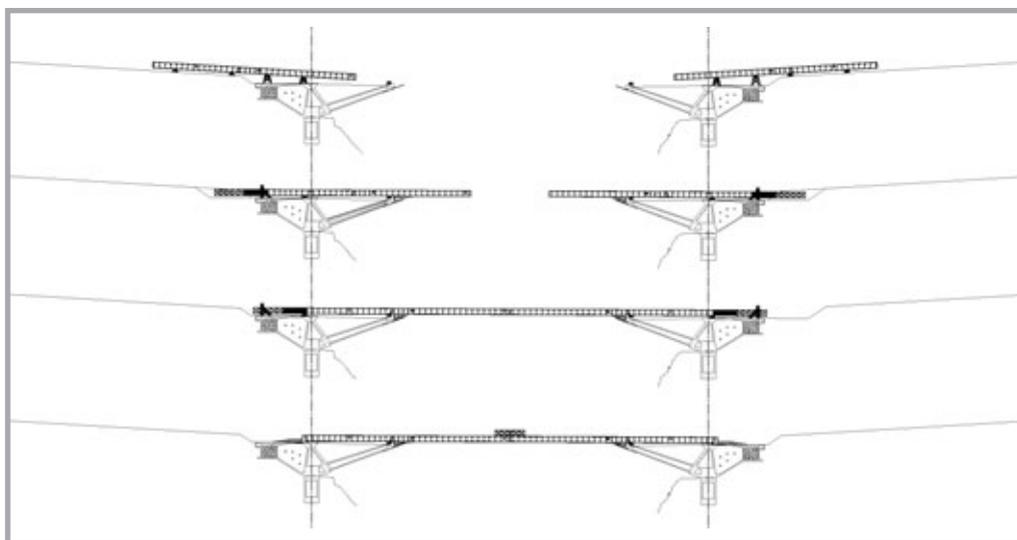


Figure 7
Cinématique 2
Kinematic 2

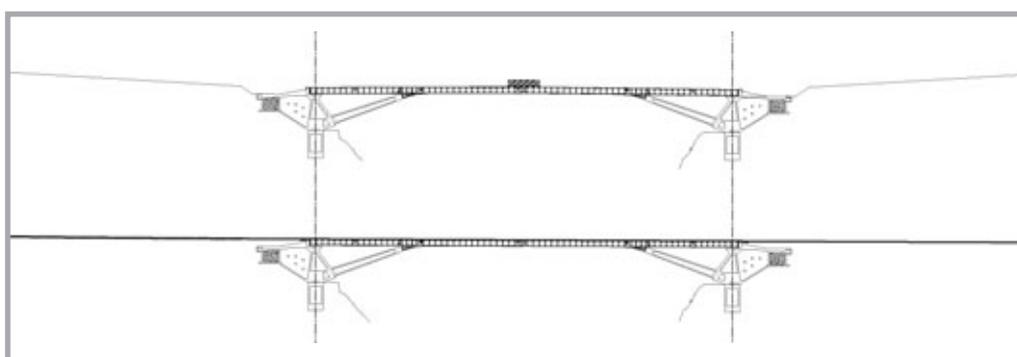


Figure 8
Cinématique 3
Kinematic 3

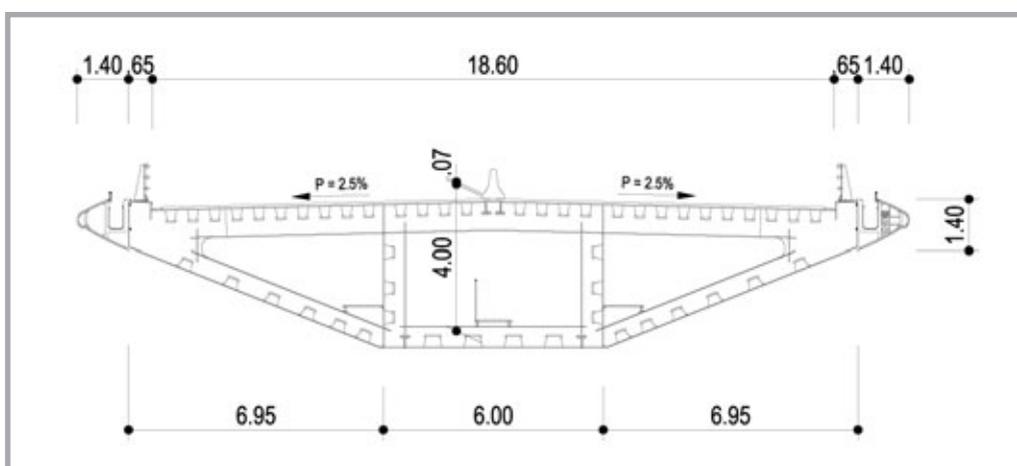


Figure 9
Coupe transversale du tablier
Cross section of the deck

blier à la fois pour la construction (lançage inclus) et le service. L'effort de chaque rotule agit sur une platine de 2 m x 2,5 m de surface raidie par quatre raidisseurs soudés sur deux flasques. Transversalement, quatre cadres spéciaux renforcés rigidifient l'ensemble et permettent la transmission de l'effort vertical des âmes du caisson aux flasques centrales. Deux cadres sont situés en face des platines de la rotule et de son raidisseur extérieur. Les deux autres sont placés d'une manière équidistante par rapport à ces premiers. Le tirant définitif prend appui sur des persiennes accrochées aux âmes du caisson central d'une part, et aux flasques intérieures de la rotule d'autre part.

Figure 10
Coupe du bracon
Cross section of the bracket

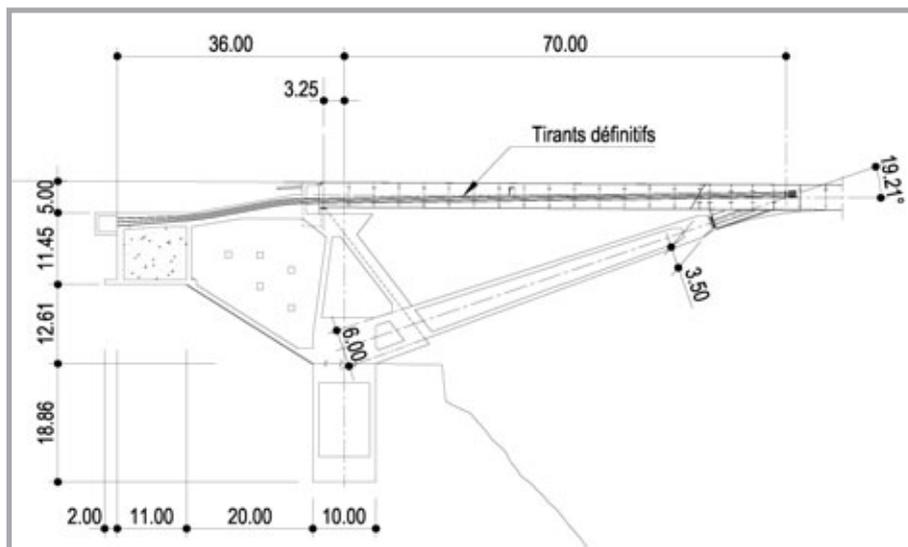
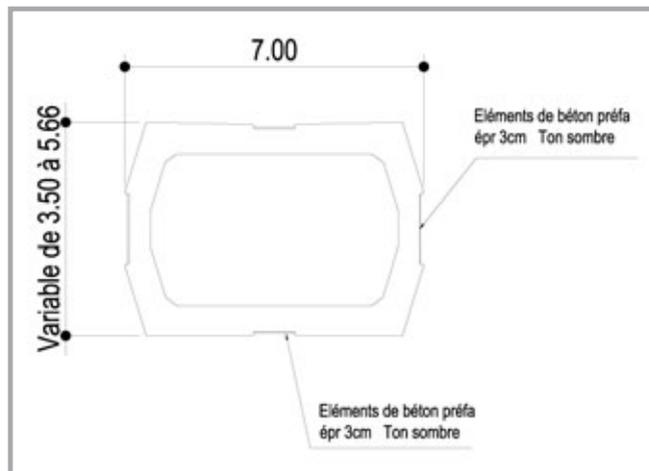


Figure 11
Coupe longitudinale sur culées
Longitudinal section on abutments

Bracons

Les bracons sont constitués d'un caisson en béton hautes performances précontraint, incliné de 20° par rapport à l'horizontale, de largeur constante 7 m, de hauteur variable de 6 m à 3,50 m et de longueur environ 50 m. La construction se fait par encorbellements successifs avec utilisation d'une précontrainte dite de fléau, disposée dans le hourdis supérieur, composée de 32 câbles 12T15S à raison de deux par voussoirs de 3 m. Pour limiter les effets du fluage qui accroissent les moments de flexion, et pour la résistance au flambement, il a été choisi d'utiliser un béton à haute performance B60 avec fumée de silice (figure 10).

Culées et terrassements

Les culées sont constituées d'un caisson précontraint en béton B40 armé et partiellement précontraint à hauteur variable fondé sur semelle superficielle à l'arrière sous le contrepoids, et sur puits à l'avant :

- ◆ largeur entre voiles principaux 12 m ;
- ◆ hauteur variable de 11,50 m (à l'arrière) à 24,50 m (à l'avant) ;
- ◆ semelle arrière de 13 m sur 16 m ;

- ◆ glacié précontraint à l'avant de la culée (10 câbles 12T15S) ;
 - ◆ puits avant de 10 m de diamètre et 19 m de profondeur environ (figure 11).
- Le rôle de ces culées est de conduire les différents efforts aux fondations par l'intermédiaire des voiles longitudinaux principalement, efforts dus :
- ◆ à l'enracinement du bracon ;
 - ◆ au lest à l'arrière et au poids des terres sur les débords de la semelle arrière ;
 - ◆ aux efforts d'ancrage et de déviation des câbles des tirants provisoires et définitifs ;
 - ◆ aux appuis d'extrémité du tablier ;
 - ◆ au mur garde-grève, aux remblais et à la chaussée au-dessus de la dalle supérieure ;
 - ◆ à la poussée des terres sur les parois latérales.

Tirants

Les tirants se décomposent en deux familles :

- ◆ tirants provisoires extérieurs au tablier au cours de la construction, constitués sur chaque rive de 10 câbles 31T15S et ancrés dans la culée en extrémité arrière et dans la tête du bracon ;
- ◆ tirants définitifs intérieurs au tablier pour le service, constitués sur chaque rive de 10 câbles 31T15S, ancrés dans le renfort prévu au droit de l'articulation et en extrémité de culée.

■ ÉTUDES DE PROJET

Les calculs effectués en phase projet se sont basés sur un certain nombre de modèles, à barres, à éléments finis, ou de sol.

Le principal modèle de calcul de la structure est un modèle à barres avec des culées indéformables reposant sur des appuis raides, pour lequel Setec TPI a utilisé son logiciel PYTHAGORE, logiciel spécialisé dans le calcul des ouvrages d'art, qui a permis :

- ◆ la modélisation spatiale complète de l'ouvrage à partir d'éléments de poutre ;
 - ◆ la prise en compte du phasage détaillé de construction, avec le comportement à court terme et à long terme du béton, incluant retrait et fluage calculé scientifiquement ;
 - ◆ la modélisation du vent turbulent cyclonique (avec des valeurs maximales de vent moyen allant jusqu'à 52 m/s) et le calcul des effets dynamiques du vent sur la structure ;
 - ◆ le calcul en grands déplacements de la structure contre-fléchée avec défaut de forme dans les bracons pour vérifier ces derniers au flambement ;
 - ◆ la vérification des sections en béton avec prise en compte du béton fissuré ;
 - ◆ la vérification au voilement des sections minces du tablier métallique.
- C'est à partir de ce modèle qu'a été dimensionnée la structure en construction et en service, à l'ex-

LES PRINCIPALES QUANTITÉS

- Surface utile de tablier : 5 360 m²
- Déblais : 90 000 m³
- Béton : 15 000 m³
- Aciers passifs : 2 500 t
- Aciers de précontrainte : 210 t
- Charpente métallique : 3 500 t

clusion des culées et du sol. Le dimensionnement des culées a fait l'objet d'un modèle particulier, établi à partir du modèle précédent en ajoutant des éléments de plaques pour les culées et des ressorts pour le sol. Une vérification de l'influence sur les dimensionnements de paramètres de sol variant à l'intérieur d'une fourchette de valeur a aussi été réalisée (figure 12).

La diffusion des efforts dans la zone de sabot et d'ancrage des tirants définitifs et la vérification du raidissage du tablier au cours du lancement (calcul en grands déplacements intégrant des défauts de forme dans les modes principaux de flambement) ont fait l'objet d'une modélisation aux éléments finis sur le logiciel ANSYS (figure 13).

Une modélisation spécifique de sol a été effectuée par la société Terrasol avec le logiciel CESAR pour vérifier que l'interaction de la structure et du sol était conforme aux résultats observés dans le modèle PYTHAGORE.

■ L'EFFET D'ARC LIMITÉ ET CONTRÔLE

Le comportement de l'ouvrage en construction et en service est basé sur des modes de fonctionnement structurels très différents, dont l'élément central est le tirant, qu'il soit provisoire ou définitif.

Lors de sa construction, c'est-à-dire avant clavage, chacun des demi-ouvrages est construit en console. L'utilisation du tirant provisoire permet de limiter le moment d'encastrement à la base du bracon au cours du lancement du tablier. L'ensemble est équilibré grâce au contrepois à l'arrière de la culée. Lors du transfert de tirant, le fonctionnement reste le même, le tirant définitif étant l'équivalent du tirant provisoire, mais protégé à l'intérieur du tablier. De plus, l'excentrement du tirant définitif par rapport à la rotule permet de clouer le tablier sur son appui sur culée. Lors du clavage, les charges de poids propre ne créent aucun effort au travers du joint de clavage. Une fois la structure clavée, les efforts dus aux charges de superstructure et aux charges d'exploitation (vent, charges routières et thermiques) créent un effort normal dans la structure dû à l'effet d'arc. En raison de la faible inclinaison des bracons et des conditions d'appui (encastrement en pied de bracon, rotule en tête et appui glissant sur culée), une partie des efforts passent en flexion, la flexion dans les bracons se transmettant en moment de basculement dans les culées.

L'effet d'arc limité et contrôlé s'explique donc par la présence des tirants, qui permettent de limiter les poussées horizontales dans le massif en reprenant les charges de poids propre par un moment de basculement dans les culées, moment équilibré par le contrepois. Les charges d'exploitation et de superstructures créent un effort nor-

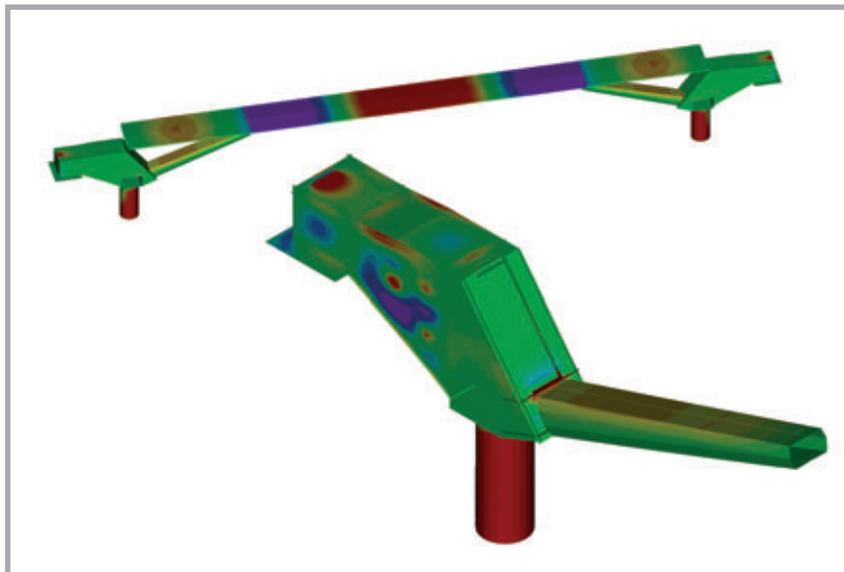


Figure 12
Modèle de calcul
PYTHAGORE
*"PYTHAGORE" design
calculation model*

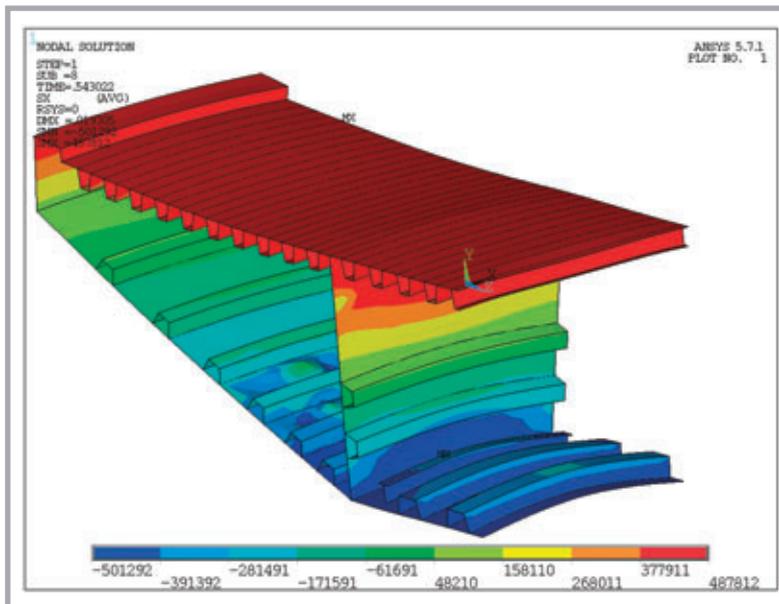


Figure 13
Modèle ANSYS
de vérification
du patchloading
*ANSYS model
for checking
patchloading*

mal dans la structure et une poussée horizontale dans le massif, ces efforts étant bien moindres que si l'ensemble de la structure fonctionnait en arc, ce qui répond à une exigence du programme de limiter les poussées dans le terrain en évitant des structures fonctionnant complètement en arc. La poussée horizontale maximale en ELS rare vaut 5900 t. Si l'on détend les tirants définitifs après clavage pour faire fonctionner la structure complètement en arc, cette poussée horizontale maximale vaut alors 10700 t. Les déformations principales dues à la mise en charge des culées se produisent sous charges de poids propre lors de la construction. La mise en œuvre des tirants définitifs permet de ne pas introduire de nouvelles déformations importantes après clavage sous ces mêmes charges permanentes.

L'ajustement de la tension dans le tirant définitif permet donc d'agir séparément sur le bracon et la culée, découplant deux dimensionnements majeurs de la structure. Avant clavage, on règle le moment

▶ dans le bracon afin d'avoir des contraintes admissibles dans le béton précontraint en service. Après clavage, on transfère un effort horizontal sur la culée dû à un fonctionnement en arc en un moment de basculement repris par le contrepoids à l'arrière de la culée, sans changer le fonctionnement du bracon.

Ces effets peuvent être inversés en relâchant le tirant.

■ CONCLUSION

L'ouvrage de la Grande Ravine, qui reprend l'idée d'une "lame dans le paysage" pour le tablier, soutenu par deux bracons très inclinés, présentera à l'observateur une image totalement neuve, un nouveau dessin de structure, dérivé des ponts à béquilles ou en arc. La finesse du tablier, l'inclinaison des bracons, l'absence de toute décoration, ainsi que le fonctionnement structurel avec effet d'arc limité et contrôlé basé sur le rôle des tirants, donneront à cette construction un caractère unique.

LES PRINCIPAUX INTERVENANTS

Maitre d'ouvrage

Région Réunion

Assistant maître d'ouvrage

DDE Réunion - Service des Grands Travaux

Maitre d'œuvre

Setec TPI

Architecte

Alain Spielmann

Etudes géotechniques

Terrasol

ABSTRACT

The viaduct of the Grande Ravine. A bridge with a limited and controlled arch effect

J.-E. Croiset, J. Ryckaert, A. Spielmann, Gr. Viel

The viaduct of the Grande Ravine is part of the so-called exceptional bridges of the Route des Tamarins. The structure is exceptional for the dimensions of the breach : 320 metres wide at natural ground level and 170 metres deep. The principal constraints of the project are environmental (protected fauna and flora), topographical (very steep slopes on the flanks and very great depth ruling out any construction from the bottom of the ravine) and climatic (risk of cyclones both during construction and in service). The structure consists of a 288 m long metal deck with orthotropic slab, hinged on two high performance prestressed concrete braces inclined at 20° to the horizontal. The deck is launched from both sides of the ravine. The braces are cantilevered from counterweight abutments and maintained at their heads by external prestressing cables situated inside the deck. The abutments are founded on superficial footings at the rear under the counterweight and on a large diameter concrete pile at the front. The phasing of construction and the different structural behaviour before and after midspan connection, as well as the role of the provisional and final stays make it a very special structure, which may be defined as a bridge with a limited and controlled arch effect.

RESUMEN ESPAÑOL

El viaducto del Gran Barranco. Un puente de efecto de arco limitado y controlado

J.-E. Croiset, J. Ryckaert, A. Spielmann, y Gr. Viel

El viaducto del Gran Barranco forma parte de las obras denominadas de excepcionales de la Carretera de los Tamarindos. La obra franquea la brecha del Gran Barranco, cuyas vertiginosas dimensiones son de aproximadamente 320 m de anchura a nivel del terreno natural y 170 m de profundidad. Los principales imperativos del proyecto son medioambientales (fauna

y flora protegidas), topográficos (pendientes sumamente importantes en los costados y muy importante profundidad que impide cualquier construcción a partir del fondo del barranco) y climáticos (riesgos ciclónicos tanto en construcción como en servicio). La obra está compuesta por un tablero metálico de losa ortótropa de 288 m de longitud articulado sobre dos jabalones de hormigón pretensado de elevadas características inclinados a 20° con respecto al horizontal. El tablero se instala en voladizo a partir de ambos bordes del barranco. Los jabalones están empotrados en su base sobre estribos contrapesos y mantenidos en cabeza por tirantes formados por cables de pretensado exterior ubicados en el interior del tablero. Los estribos van cimentados en zapata superficial en la parte posterior bajo el contrapeso y sobre pozos en la parte delantera. La puesta en fase de construcción y los funcionamientos estructurales distintos antes y después de la clave de dovela, así como el papel de los tirantes provisionales y definitivos vienen a situar este viaducto como una obra particular, que se puede definir como un puente con efecto de arco limitado y controlado.

Géologie et géotechnique à la Réunion : les particularités du sous-sol de l'île volcanique

Cet article présente le contexte géotechnique général rencontré sur les trente kilomètres du projet de la Route des Tamarins entre les communes de Saint-Paul et de l'Etang Salé. Une présentation de la géologie de cette partie de l'île de la Réunion est faite ainsi qu'une description de toutes les formations rencontrées. Les matériaux volcaniques présentent un certain nombre de particularités géotechniques aussi bien du point de vue comportement que mécanique qui sont citées où décrites sommairement : eau de constitution, phase argileuse constituée entièrement de smectites, tunnel de lave. La grande difficulté a été l'étude et la caractérisation des alternances, essentiellement basaltes/scories, compte tenu des très fortes hétérogénéités géométriques et mécaniques des différentes formations et par voie de conséquence, l'établissement de profils géotechniques représentatifs. Quelques recommandations et dispositions constructives sont données, mais l'établissement d'une méthodologie applicable à ces alternances reste à élaborer.

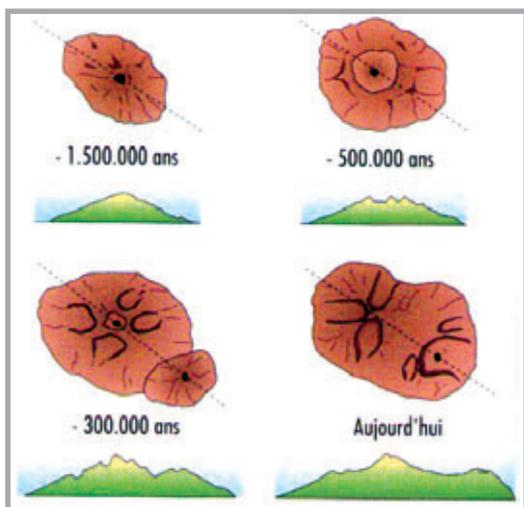


Figure 1
Phases du volcan
Volcano phases

Cet article a pour but de présenter les conditions générales rencontrées sur les trente kilomètres du projet ainsi que les principales difficultés et dispositions générales adoptées. Les points spécifiques aux différents ouvrages seront décrits dans les présentations spécifiques.

■ GÉOLOGIE GÉNÉRALE

La Réunion est une île volcanique de forme elliptique allongée NNW-SSE. Elle est formée par la juxtaposition de deux appareils volcaniques principaux, le massif du Piton des Neiges au nord et le massif de la Fournaise au Sud. Les premiers centres éruptifs sont apparus au nord-ouest de l'île (massif de

la Montagne) puis se sont déplacés vers le sud-est où le volcan de La Fournaise est toujours actif. L'île est jeune (Pliocène) et les phénomènes d'érosion sont fortement actifs.

Le Piton des Neiges est un volcan de type Hawaïen (ou de point chaud) caractérisé par l'émission de laves très fluides s'étalant largement et construisant un cône à pente douce. Les pentes externes du massif (planèzes) sont de 5 à 10° vers la mer. Les laves émises sont typiques d'un volcanisme alcalin à alcalino-calcique. On rencontre principalement des basaltes à plagioclases, des basaltes à olivines, des océanites, des mugéarites, plus rarement des andésites et trachytes.

De Saint-Paul à L'Etang-Salé-les-Bains, le projet rencontre des formations issues du massif du Piton des Neiges (figure 1).

Phases d'activité du Piton des Neiges

Le massif s'est édifié à partir d'un volcan sous-marin qui a commencé à émerger il y a environ 2 millions d'années. On distingue quatre grandes phases d'activité (figure 2).

La phase I dont les formations ne sont rencontrées qu'au cœur de l'île à la faveur des grandes ravines et des cirques, sous forme de terrains profondément zéolités.

La phase II débute avec l'émersion par des empilements de coulées qui ont constitué l'ossature du massif du Piton des Neiges. Cette phase d'activité dure jusqu'il y a 430 000 ans. La migration vers le sud-est des centres d'activité volcanique est déjà

Bernard Bescond
CHEF DU DOMAINE
GÉOTECHNIQUE
CETE Méditerranée



Pierre Azémard
CHEF DU SERVICE
GÉOLOGIE -
TERRASSEMENT
CETE Méditerranée



Bernard Gaudin
EXPERT
Scetauroute



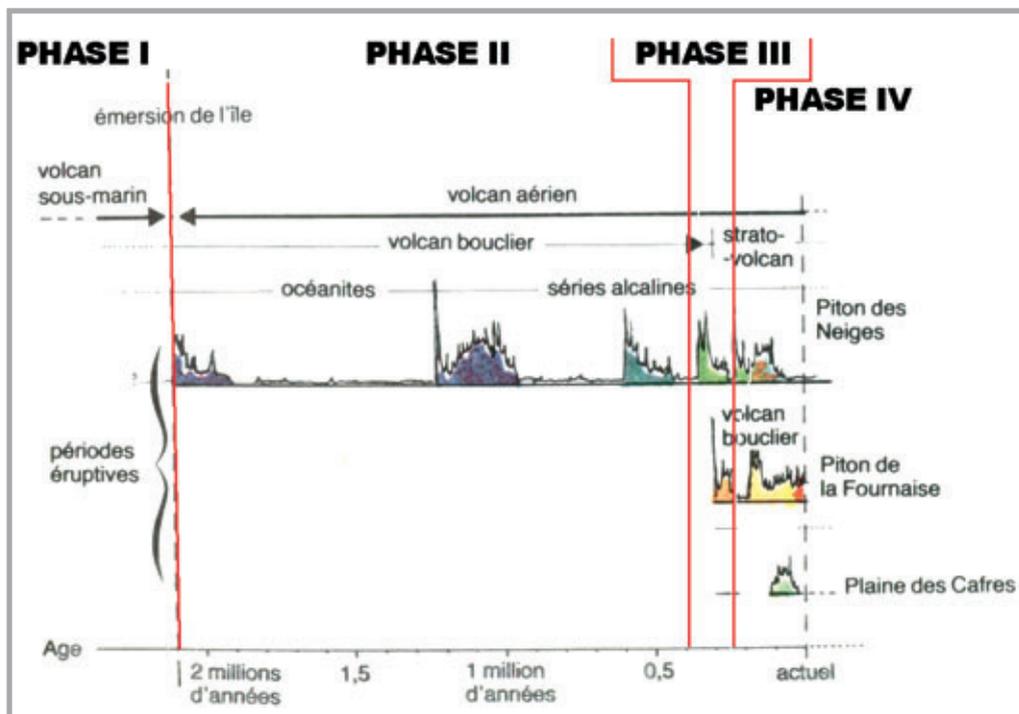


Figure 2
Principales phases de l'activité volcanique à la Réunion
Main phases of volcanic activity on Reunion Island

présente. Les datations (Mc Dougall 1969) indiquent trois groupes d'âges :

- ◆ 2,1 MA – 1,9 MA;
- ◆ 1,2 MA – 950 MA;
- ◆ 600 MA – 430 MA.

La phase II est donc entrecoupée de longues périodes calmes permettant érosion et altération. Pendant la période de calme qui suit la phase II, d'une durée d'environ 80 000 ans, l'altération pédologique et l'érosion sont très importantes. La phase III dure environ 100 000 ans (350 à 250 000 ans). Les coulées nappent les versants, comblent les dépressions et s'écoulent dans les vallées que l'érosion a dégagées pendant la période de calme qui a suivi la phase II. Des dépôts d'avalanches de débris (les brèches de Saint-Gilles) sont générés dans l'ouest de l'île durant la fin de la phase II et toute la phase III. Ils trouvent leur origine dans la déstabilisation d'un flanc de l'appareil volcanique par les injections de magma qui "gonflent" le centre du volcan. Une nouvelle période de calme dure 20 000 ans. La phase IV débute il y a 230 000 ans et se termine il y a environ 70 000 ans. Les coulées comblent les reliefs précédents, nappent l'ensemble des planètes et débordent localement sur les cônes alluviaux.

Évolution morphologique

L'édification des massifs volcaniques est une compétition entre les phénomènes éruptifs et les phénomènes d'érosion. Si l'on peut définir des phases d'activité et de repos du volcanisme, l'érosion, elle, reste permanente, même pendant les phases d'activité du volcan.

Les périodes de calme volcanique permettent le développement d'une altération pédologique, pouvant atteindre la dizaine de mètres d'épaisseur, et de l'érosion qui a creusé des ravines. Par ailleurs, les fluctuations du niveau marin ont permis le développement de surcreusements pouvant atteindre une centaine de mètres sous le niveau actuel de la mer. Lors de la remontée du niveau marin, de puissants remplissages alluviaux se sont alors constitués, même dans des vallées étroites.

Les premières coulées des phases éruptives qui suivent ces périodes calmes empruntent d'abord ces vallées. Ces coulées, qui ne peuvent s'étaler largement, sont généralement très épaisses (> 10 m) et souvent prismées. Elles finissent par combler les vallées et les coulées suivantes s'étalent alors sur les plateaux.

Dans les vallées importantes, la ravine reprend souvent son lit sur un des bords de la coulée ce qui décale l'axe de la vallée. En bordure de mer l'érosion marine (action de la houle) forme des falaises. L'altération est plus profondément développée sur la partie sud de la zone d'étude, conséquence directe d'une plus forte pluviosité.

Lithologie - Nature des formations rencontrées

Formations superficielles

- ◆ Sables et galets de plage (sable basaltique dominant) rencontrés sur les plages de Saint-Paul (M2) mais également à l'extrémité sud du projet (Étang-Salé-les-Bains) sous forme de sables dunaires (D).
- ◆ Alluvions fluviales récentes (Fz) : sables, graviers, galets et blocs rencontrés dans le lit des principaux cours d'eau.
- ◆ Alluvions fluvio-marines (argiles, limons, sables, galets) dans les plaines de comblements rencontrées au niveau de l'origine du projet dans la plaine de Saint-Paul (MF₁). Les sables et galets sont rares, limités aux chenaux des ravines secondaires.
- ◆ Eboulis de pente formés de blocs de toutes dimensions plus ou moins colmatés de limons d'altération.
- ◆ Limons d'altérations des coulées, bruns à noirs, avec des proportions de blocs très variables rencontrés en poches discontinues (figure 3).

Formations du massif du Piton des neiges

Phase II

Il s'agit d'empilements de coulées ($\beta\pi_{II}$) de basaltes aphyriques ou à olivine et d'océanites séparés par des niveaux de scories. Ces coulées présentent des alternances décimétriques à métriques, localement décamétriques en remplissage de paléovallées. On y rencontre parfois de grands ensembles scoriacés correspondant à des cônes éruptifs.

Photo 1
Tunnel
du Cap-la-Houssaye –
Brèches
de Saint-Gilles
*Cap La Houssaye
Tunnel – Saint-Gilles
breccias*



▶ le caractère subaffleurant du massif rocheux très affirmé. Des niveaux de scories caverneuses et des tunnels de lave sont fréquents. Ces terrains constituent la majeure partie des formations rencontrées par le tracé.

■ TERRASSEMENTS : QUELQUES PARTICULARITÉS

Comportement vis-à-vis de l'eau

Les matériaux volcaniques rencontrés (coulées et limons d'altération ; granulats) ont un comportement particulier vis-à-vis de l'eau. La microporosité des grains absorbe une part significative de l'eau du matériaux qui ne participe plus à la modification du comportement. Aussi, par rapport aux matériaux classiques de métropole, les teneurs en eau de référence sont décalées vers le haut. Ceci se retrouve en terrassements au niveau des caractéristiques Proctor mais également pour la fabrication des enrobés et des bétons pour lesquels on a classiquement recours à une mise en saturation avant fabrication.

Les brèches de Saint-Gilles

Vis-à-vis des terrassements, il s'agit de matériaux assez homogènes en grand (par opposition aux alternances basalte/scories), compacts mais tendres, peu résistants (photo 1).

L'évolutivité mise en évidence est liée à une phase argileuse de faible importance mais entièrement constituée de smectites. Elle ne joue qu'à long terme (plus de 15 ans sur les talus de déblai) mais interdit un réemploi autre qu'en remblai.

Les coulées de laves

Quelles que soient la lithologie et la phase éruptive auxquelles elles sont rattachées, les coulées forment l'essentiel du massif rocheux. Elles se présentent classiquement comme une succession de

bancs rocheux et de bancs scoriacés, donnant à l'ensemble un aspect feuilleté.

Les bancs de basaltes

Les niveaux rocheux sont constitués des roches massives, dures mais fracturées essentiellement par des fentes de retrait avec des espacements généralement submétriques et des ouvertures variables de quelques millimètres à quelques centimètres.

Les brèches de progression (ou scories)

Les niveaux scoriacés sont constitués par des fragments rocheux irréguliers (centimètres à décimètres) plus ou moins liés par une matrice souvent rougeâtre (recuit, oxydation). Les éléments sont très anguleux. L'ensemble présente de nombreux interstices.

La cohésion de la matrice ainsi que sa proportion est extrêmement variable. On peut trouver tous les intermédiaires entre des scories très poreuses (jusqu'à 50 % de vides), imbriquées en agrégats cohérents et des brèches à liant limono-sableux induré ne laissant que peu de vide.

Malgré une apparente régularité à grande échelle, l'extension des coulées est toujours limitée. L'épaisseur des niveaux scoriacés/basaltiques est extrêmement variable dans le détail (photo 2).

En falaise ou en talus, la dégradation des scories forme d'importants sous-cavages qui déchaussent les coulées massives sus-jacentes. Les carottages indiquent **une proportion de scories de 30 à 70 % selon les secteurs** avec une moyenne proche de 50 %.

Cette disposition en alternance très irrégulière pose de nombreux problèmes de géotechnique : difficultés de reconnaissances, réalisation des terrassements (extraction, granulométrie des matériaux extraits, stabilité des talus...), modes et niveaux de fondation des ouvrages les plus importants.

Le minage, indispensable pour un chantier de cette importance dans les délais impartis, est lui aussi tributaire de ces conditions géotechniques particulières : forations difficiles, éboulements fréquents des trous, très forte hétérogénéité de compacité rendant plus aléatoire le travail des explosifs, etc.

L'optimisation du réemploi passe par une réduction granulométrique complémentaire via des concasseurs primaires.

Pour une réutilisation en granulat la pétrographie et le degré d'altération sont les principaux paramètres à considérer.

■ FONDATIONS, SOUTÈNEMENT : QUELQUES SPÉCIFICITÉS

Le contexte géologique décrit ci-dessus conduit pour le projet, à la définition de trois types de formations géotechniques :

- ◆ les formations superficielles, alluvions, colluvions, dépôts lacustres et éboulis ;
- ◆ les brèches de Saint-Gilles et par extension, toutes les autres brèches et coulées en grande masse à l'exception des brèches de progression ou scories ;
- ◆ les coulées en place.

Les formations superficielles

Les alluvions, colluvions, dépôts lacustres et les éboulis ne présentent pas de particularisme fort si ce n'est l'éventuelle présence de tunnels hydrauliques dans les alluvions. En conséquence, ils seront considérés comme des sols et les moyens de reconnaissance et les référentiels techniques seront ceux utilisés classiquement notamment à partir des essais pressiométriques : Fascicule 62 titre V, Recommandations Clouterre, etc.

Les alluvions sableux-graveleux sont présentes au début du projet jusqu'à la falaise de Saint-Paul : elles sont compactes (pression limite moyenne de 2,5 MPa) à très compactes (pression limite supérieure à 5 MPa). L'exécution de fondations profondes dans ces derniers niveaux nécessitent l'utilisation de moyens type roche avec des rendements faibles et des difficultés de tenue de parois (liant sableux très fin et très dense).

Les colluvions ont une épaisseur faible et des caractéristiques médiocres à moyennes : elles ne constituent pas en général un niveau de fondation pour les ouvrages du projet, sauf pour un appui du viaduc de Fleurimont.

Les dépôts lacustres de l'étang Saint-Paul sont constitués essentiellement de limons argileux : ils ont été rencontrés au début du projet et leur épaisseur ne dépasse pas 2 m en moyenne. Malgré leur compressibilité (indice de compression Cc de 0,25) et leur faible résistance (pression limite pl de 0,42 en moyenne), ils ne constituent pas une contrainte forte pour le projet : seule une bêche d'ancrage de pied a été nécessaire pour les remblais de hauteur supérieure à 4,5 m.

Les éboulis ont été rencontrés en particulier au pied de la falaise de Saint-Paul, localement sur deux niveaux avec intercalation d'une coulée plus récente et sur des hauteurs très variables allant de 1 à plus de 30 m. Ils présentent de très bonnes caractéristiques mécaniques (pression limite supérieure à 5 MPa) et constituent un niveau d'encastrement potentiel pour des éléments de fondation profonde. La réalisation de cet encastrement nécessite l'utilisation de moyens type roche.

Les brèches

Les brèches à l'exclusion des scories et les coulées boueuses seront considérées comme des matériaux "homogénéisés" pour lesquels l'approche sols a été également retenue. Les référentiels tech-



Photo 2
RD12 -
Hétérogénéité
des alternances
basalte/scorie
fb_{αIII}
County road RD12
- **Heterogeneity**
of fb_{αIII}
basalt/scoria
alternations

niques classiques cités ci-dessus et appliqués en particulier à partir des essais pressiométriques ont été validés.

Ce sont des matériaux cohérents de bonnes à très bonnes caractéristiques mécaniques (pression limite pl supérieure à 5 MPa) : aussi, les ouvrages non courants de la Savane ont été fondés sur semelle superficielle dans ces matériaux.

Les coulées

La description qui en est faite dans le paragraphe "Les coulées de laves" ci-dessus montre bien la difficulté d'établir localement des profils géotechniques représentatifs. De l'aspect global d'alternance basaltes/scories à l'échelle du versant, il faut passer, à l'échelle d'un appui, à une répartition "fluviatile" des différents faciès, basaltes et scories mais aussi paléosols formés entre deux périodes d'activité. L'hétérogénéité est généralement pluridécimétrique, localement décimétrique en plan et décimétrique, métrique à plurimétrique en altitude : l'existence de coulées massives type ravine Trois Bassins ou d'amas importants de scories reste plutôt marginale. Cette hétérogénéité géométrique s'accompagne d'une très forte hétérogénéité mécanique : rapport supérieur à 10 entre les caractéristiques de ces différents matériaux.

Problèmes posés par les fondations

Il faut croiser cette variabilité naturelle avec celle apportée par les sollicitations très variables des ouvrages projetés : sollicitations inférieures à la contrainte de référence du faciès le plus faible (en général, scories lâches) pour des ouvrages courants (PIPO), sollicitations supérieures à la contrainte de référence du faciès le plus faible (tranchée couverte de Saint-Paul), sollicitations importantes très concentrées au droit des ouvrages non courants et exceptionnels.

Enfin, pour ce qui est des fondations, les ouvrages d'art non courants (OANC) ou exceptionnels (OAE) franchissent des ravines dont la topographie consti-



tue une contrainte géométrique, les appuis potentiels étant implantés dans ou en crête de versants.

Quelques spécificités des niveaux de basalte

Outre les variations géométriques rapides déjà évoquées (une coulée peut disparaître brutalement), les basaltes présentent un pendage moyen de l'ordre de 8 à 10° vers la mer. A cette direction, il faut rajouter les fractures de retrait, globalement orthogonales à la coulée, subverticales voire pentées vers l'amont à 60/80°.

L'anomalie la plus forte est constituée par la présence éventuelle de tunnels de laves, notamment dans le secteur de Saint-Gilles.

Ces niveaux sont des formations rocheuses qui peuvent être caractérisées classiquement à partir de sondages carottés moyennant quelques précautions (utilisation de la couronne diamant, diamètre de foration supérieur ou égal à 85 mm, etc.).

Quelques particularités des brèches de progression ou scories

Elles constituent les semelles des coulées de basalte. Comme indiqué ci-dessus et outre leur variabilité géométrique associée à celle des basaltes, la compacité et la porosité de ces niveaux sont très variables. Elles présentent en place une "cimentation" au contact des constituants élémentaires qui leur donne une cohésion certaine, même si elles apparaissent friables. Cette cohésion est d'autant plus forte que le niveau étudié est profond, ce qui justifie l'existence des remparts actuels de plusieurs centaines de mètres en certains points de l'île.

Les scories ont généralement été assimilées à des sols.

Moyens mis en œuvre

Dans ce contexte, les études vont de la simple reconnaissance visuelle à la mise en œuvre de moyens tels que tomographies sismiques avec réalisation de nombreux sondages de toutes natures (carottés, pressiométriques, destructifs avec diagraphies).

Sondages carottés

Ils sont parfaitement adaptés à l'étude des niveaux de basalte et servent de base à l'étude classique d'une roche.

Par contre, dans les niveaux de scories et celles que soient les précautions prises, l'énergie transmise par le carottier, l'action du fluide de foration et les conditions de pressions adaptées au carottage du banc de basalte sus-jacent font que le matériau est récupéré sous la forme de cailloux, blocs et graviers avec un faible pourcentage de récupération. Ce résultat conduit systématiquement à la prise en compte de valeurs caractéristiques sous-évaluées.

Sondages pressiométriques

Bien que systématiquement utilisés, ils sont mal adaptés à l'étude de ces alternances.

Dans les basaltes, dont la compression simple peut varier de 20 à plus de 100 MPa, la notion de pression limite perd sa signification dans la mesure ou les limites des appareillages (en général 5 MPa, ponctuellement 8 MPa) restent très loin de la frontière éventuelle du domaine élastique : ce point est encore accentué par la dernière version de la norme pressiométrique (NF-P 94 110.1) qui limite la pression limite à la valeur de la dernière pression mesurée. Pour ce qui est des modules, les limites de l'appareillage au-delà de module de quelques centaines de MPa conduisent à des valeurs très sous-estimées pour ces matériaux.

Dans les scories, la quasi impossibilité de réaliser un forage de diamètre conforme à la mise en œuvre de l'essai (irrégularité, remaniement) et la nature agressive des parois du forage qui amène l'opérateur à limiter la pression de l'essai afin d'éviter l'éclatement intempestif des sondes, conduisent à une sous-estimation des caractéristiques même si certaines courbes d'essai présentent une allure classique.

Les sondages destructifs avec enregistrements de paramètres de forage

Ils présentent les difficultés habituelles d'interprétation renforcées par le fait que l'absence de remontées de cuttings se produit assez régulièrement à partir du premier banc de basalte et conduit à la mauvaise connaissance de la lithologie, rarement compensée par l'extrapolation à partir de sondages voisins. Le postulat implicite – Via faible = terrain résistant de bonne qualité, Via forte = terrain faible de qualité médiocre –, est assez souvent mis en défaut (Via : vitesse instantanée d'avancement).

En conclusion, il est très difficile de définir correctement l'extension spatiale des matériaux constituant les coulées d'une part, de les caractériser de manière satisfaisante sur le plan mécanique d'autre part, d'où, conséquence logique, d'établir le modèle géotechnique du massif.

Observations sur le terrain

La conclusion ci-dessus renforce la nécessité de faire un maximum de constations et relevés sur le terrain. Ces éléments qui font partie de la méthodologie et participent à l'élaboration du modèle géologique du site sont particulièrement intéressants dans ce contexte. Dès l'avant-projet, il avait été procédé, au droit des principales brèches à franchir, à des levés précis de la falaise suivant deux ou trois profils afin d'ébaucher le modèle géologique d'une part et de repérer les éventuelles anomalies (sous-cavages, disparition ou apparition d'un niveau, volumes instables) ayant une incidence sur le projet d'autre part. Ces levés complètent la car-

tographie géologique de surface classique faite sur la planèze en arrière de la crête des brèches. L'ensemble de ces relevés ont nécessité un débroussaillage de ces surfaces.

L'analyse de ces relevés sur site avec le regard d'un géologue et d'un géotechnicien (avec une double approche mécanique des sols/mécanique des roches) apporteront beaucoup à la définition du modèle géotechnique le plus pertinent à utiliser pour la conception et le dimensionnement des fondations. En particulier, la morphologie des ravines constitue un premier élément à prendre en compte :

◆ morphologie en U. Elle traduit la présence de coulées de forte épaisseur notamment en crête et se traduit par des falaises verticales au droit de ces coulées et des pentes moyennes du parement de l'ordre de 1/3 (base/hauteur). Une autre constatation est relative à la présence fréquente en fond de ravine d'un banc de basalte en affleurement. Nous reviendrons plus tard sur l'approche de la stabilité de ces parements ;

◆ morphologie en V. Elle est certainement liée à l'absence de coulée de forte épaisseur et à une plus grande proportion de scories pour les hauteurs moyennes ou à des régressions "banc sur banc" pour les grandes hauteurs. Certains sites peuvent résulter d'un écroulement historique en grande masse.

Quelques dispositions et préconisations dans les coulées

Du point de vue de la conception (à l'exception du viaduc de Saint-Paul) et afin d'aboutir à une contrainte de référence peu élevée, tous les ouvrages sont fondés sur semelle superficielle ou semi-profonde (puits "marocain"), de grandes dimensions. La solution puits marocain bien adaptée au contexte (pas de nappe, pente transversale forte) n'a pas été retenue souvent.

Pour ce qui est du dimensionnement et devant l'omniprésence de l'essai pressiométrique, à défaut d'autres essais mieux adaptés, le fascicule 62 titre V a été utilisé moyennant certaines adaptations.

Force portante

Pour les **semelles superficielles**, compte tenu des réserves et commentaires faits sur la pertinence de l'approche pressiométrique, il a été préconisé de retenir forfaitairement la valeur de 0,5 MPa comme contrainte de référence à l'ELS sous combinaisons rares.

La minoration pour la proximité de la pente i_s n'a pas été appliquée car la résistance du massif est conditionnée par des ruptures guidées par la fracturation des niveaux compétents et non par une plastification généralisée. Ces préconisations ont été appliquées pour les OANC de la 2^e section.

Les **semelles filantes de la tranchée couverte de Saint-Paul** appliquent une contrainte de 2,1 MPa qui est localement supérieure à la contrainte de référence du sol à l'ELS combinaisons rares. Une substitution par du gros béton jusqu'à 2 m ou le traitement par injection des scories plus profondes ont alors été préconisés.

Une **solution massif** a été retenue pour le franchissement en arc de la Ravine Fontaine avec une limitation à 1 MPa de la contrainte de référence à l'ELS sous combinaison rares.

La **solution puits marocain (20 m)** a été retenue pour l'OAEx de la Grande Ravine avec une valeur de contrainte de référence inférieure à 1,5 MPa pour l'ELS sous combinaisons rares.

La **solution barrettes** a été retenue pour le viaduc de Saint-Paul compte tenu de la présence de 20 m d'alluvions limono-sablo-graveleuses en surface avec un taux de travail permettant une contrainte de 6 MPa dans le béton des fondations quel que soit le niveau d'encastrement retenu. L'hétérogénéité du massif a conduit à établir plusieurs profils de calcul par appui et le traitement localisé des niveaux de faiblesse dans la zone d'influence de la fondation préconisée (injection sous haute pression, jet grouting).

Déformabilité

L'estimation des tassements et/ou rotations qui se produiront en quasi totalité lors du chargement des massifs et semelles par le poids de l'ouvrage en construction, n'est pas satisfaisante car la méthode pressiométrique n'est pas adaptée.

Cette difficulté a conduit au niveau des études de POA à retenir une solution homogénéisation des sols de fondations par renforcements par inclusions rigides. Cette disposition est ensuite apparue non justifiée compte tenu des taux de sollicitations des fondations (souvent inférieurs à 0,2 MPa) d'une part et suite à l'expérience du Bras de la Plaine d'autre part où, par un calcul à rebours, le module des alternances a été estimé à 300 MPa, valeur qui conduit à un tassement négligeable des fondations projetées.

Stabilité globale, stabilité locale en paroi

La **stabilité globale** des parois peut être considérée à l'échelle de la durée de vie des ouvrages comme assurée sauf au droit d'un site où un phénomène de rupture en grande masse est amorcé (fissures au-delà de la crête). Les phénomènes connus sont des ruptures de type "écailles" qui se développent sur toute ou partie de la hauteur de la falaise et qui intéressent une tranche de l'ordre de 3 à 15 m en fonction essentiellement de la hauteur de la falaise. De tels phénomènes existent : Rivière de l'Est, Rivière des Roches, Bras des Lianes, Rivière des Pluies, ravine du Bras de la Plaine... Ils se développent lentement, certains sites étant connus et suivis depuis plus de 20 ans, l'évolution se pro-

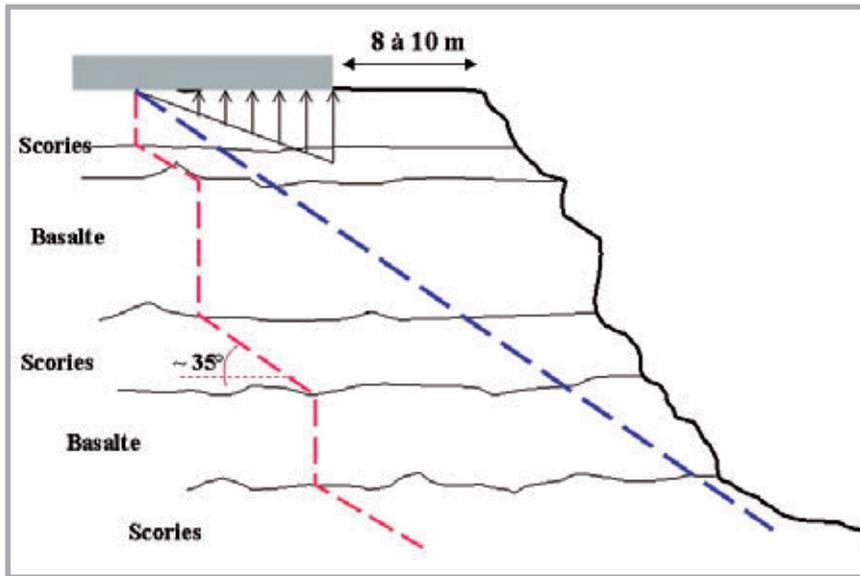


Figure 5
Principe de vérification de la stabilité globale. La surface de rupture potentielle en rouge, guidée par la fracturation naturelle subverticale dans les basaltes, ne peut pas déboucher, donc il n'y a pas de risque d'instabilité. La surface plane en bleu, qui nécessiterait des ruptures intramatricielles dans les niveaux de basaltes pour se développer, conduit à un facteur de sécurité très élevé compte tenu de la résistance mécanique des basaltes

Schematic of overall stability verification. The potential failure surface in red, guided by natural subvertical fracturing in the basalts, cannot emerge, hence there is no risk of instability. The flat surface in blue, which would require intramatrix failures in the basalt levels to develop, leads to a very high security factor given the mechanical strength of the basalts

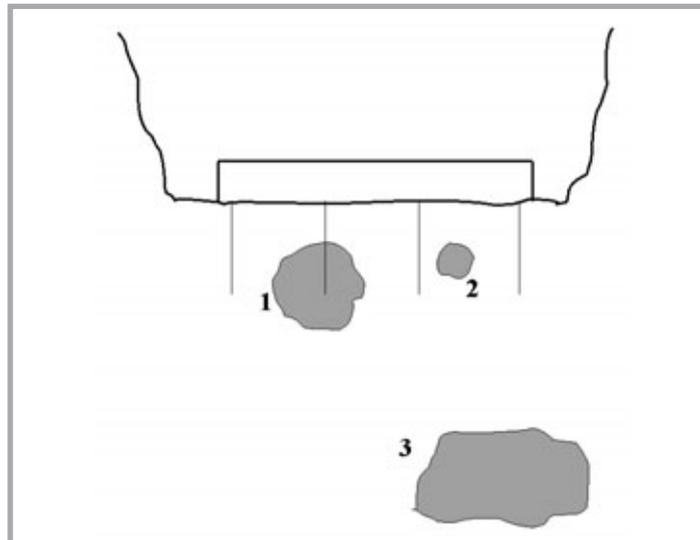


Figure 6
Principe des reconnaissances pour détecter les tunnels de lave en fond de fouille sous une semelle de largeur B : le maillage doit permettre de détecter dans la zone proche de la semelle sur une hauteur comprise 0,5 B et 0,8 B approximativement la présence d'un tunnel de lave d'un diamètre suffisamment important (tunnel 1) pour compromettre la portance du massif sur une fraction de surface notable de la semelle. Les tunnels 2 (petit diamètre et proche) et 3 (grand diamètre et plus profond) seront sans effet et peuvent donc échapper aux investigations

Schematic of reconnaissance to detect lava tunnels in the bottom of the excavation under a footing of width B. The meshing should make it possible to detect, in the area close to the footing over a height ranging between approximately 0.5 B and 0.8 B, the presence of a lava tunnel of sufficiently large diameter (tunnel 1) to compromise the bearing capacity of the rock mass on a major fraction of the area of the footing. Tunnels 2 (small diameter and close) and 3 (large diameter and deeper) will have no effect and can therefore escape investigations

duisant essentiellement lors des épisodes cycloniques. Sur le projet, aucun phénomène de ce type n'a été repéré.

Ce constat élimine la possibilité de déduire les caractéristiques moyennes "homogénéisées" du massif par un calcul à rebours supposant une valeur du coefficient de sécurité de 1 le long d'une surface de rupture (figure 5).

L'appréciation du risque d'une telle rupture sous la fondation doit donc se faire géométriquement en tenant compte de la structure générale du massif et en suivant une courbe guidée par la fracturation naturelle du massif : suivant la verticale dans les basaltes et suivant un plan incliné à ϕ dans les scories, le point de départ de la courbe étant le point de contrainte nulle sous la fondation. Si une telle courbe ne ressort pas en falaise, nous considérons que la stabilité globale est assurée. Une garde conservatoire minimale de 5 m entre le bord aval de la semelle et le parement, à adapter à la géométrie et l'état de la falaise, est préconisée : elle a pour but d'éliminer toute interférence entre les fondations et la falaise.

Les **instabilités locales** susceptibles d'entraîner une régression de la tête de la falaise d'une part ou de menacer un appui situé en contrebas d'autre part seront confortées (sous-cavage, blocs instables). Il est préconisé de traiter une bande débordant de 10 m en amont et en aval de l'ouvrage sur une hauteur minimale de 10 m à adapter au projet. L'objectif est de maintenir les falaises en l'état afin de pérenniser les conditions géométriques dans la zone d'influence des appuis d'une part ou d'éviter le choc d'un bloc sur une pile d'autre part. Les techniques de traitement à mettre en œuvre sont classiques : purge, boulonnage, filets, comblement des sous-cavages par du béton.

Les tunnels de lave

Le risque de présence de tunnels de lave est avéré et leur présence aléatoire. Deux approches ont été faites : prise en compte d'un coefficient de sécurité supplémentaire d'une part, mise en œuvre d'une recherche systématique lors de la réception des fouilles d'autre part. La troisième voie qui consiste à repérer ces tunnels au moment des études n'a pas été mis en œuvre (couverture importante par rapport aux niveaux de fondations à étudier, d'où surcoût important).

La prise en compte d'un coefficient de sécurité supplémentaire (dont il faut déterminer la valeur) a vite montré ses limites : cumulé à la limitation de la mesure de la pression limite et à l'application du fascicule 62 titre V, il conduisait, avec la valeur de 3 proposée par le BE géotechnique, à des contraintes de référence très faibles et irréalistes.

C'est donc la solution reconnaissance systématique qui a été retenue d'autant plus qu'elle s'imbrique dans la démarche de réception des fonds de fouille prévue en contrôle d'exécution. Par exemple,

sur la deuxième section, les critères suivants ont été retenus : diamètre du tunnel 3 m, hauteur maximale reconnue de 7 m (0,66 x B, largeur de la fondation) avec un maillage de 3 x 3 m. Une grille de décision est associée pour guider le maître d'œuvre (figure 6).

■ CONCLUSIONS

La principale difficulté géotechnique rencontrée sur ce projet est la présence de coulées qui par nature cumulent des hétérogénéités géométriques, de faciès et mécaniques très fortes. A cette donnée naturelle, il faut rajouter le nombre important d'intervenants : cinq maîtres d'œuvre et huit bureaux de géotechnique. Dans ces conditions, il n'a pas été possible d'établir un cadre réglementaire particulier avec des prescriptions techniques imposées à tous.

Le présent article se limite volontairement à présenter une synthèse des principales solutions et dispositions constructives préconisées dans le cadre des études. Ce bilan sera enrichi par le suivi des travaux d'une part et du comportement des ouvrages d'autre part. In fine, nous disposons peut être de suffisamment d'éléments pour envisager la rédaction de préconisations spécifiques à ces matériaux, ce qui permettrait de combler, au moins pour partie, un vide méthodologique certain.

ABSTRACT

Geology and geotechnics on Reunion Island : the specific features of the volcanic island's subsoil

B. Bescond, P. Azémard, B. Gaudin

This article presents the general geotechnical context which is found on the thirty kilometer long project of "Route des Tamarins", between St-Paul and Etang-Salé communes. Geology of this part of Reunion Island is presented and all natural geological grounds are described. Volcanic materials present some geological characteristics, for the behaviour as well as mechanically ; these characteristics are briefly described : constituting water, clayey part, entirely constituted with "smectites", lava tunnel.

The great difficulty was the study and precise description of alternances, principally basalt/scoria alternances, because of the very important geometrical and mechanical heterogeneity of the various grounds ; therefore, drawing up representative geotechnical profiles was very difficult.

Some recommendations and constructive techniques are given but one methodology for those alternances remains to carry out.

RESUMEN ESPAÑOL

Geología y geotécnica en La Reunión : las particularidades del subsuelo de la isla volcánica

B. Bescond, P. Azémard y B. Gaudin

En este artículo se presenta el contexto geotécnico general encontrado en los treinta kilómetros del proyecto de la Carretera de los Tamarindos entre los municipios de Saint-Paul y l'Etang Salé. Figura así una presentación de la geología en esta parte de la isla de La Reunión así como una descripción de todas las formaciones existentes. Los materiales volcánicos presentan cierto número de particularidades geotécnicas tanto desde el punto de vista del comportamiento como mecánico que se mencionan o describen de forma compendiada : agua de constitución, fase arcillosa formada en su totalidad por esmecticas, túnel de lava. La mayor dificultad ha consistido en el estudio y

la caracterización de las alternancias, principalmente basaltos/escorias, habida cuenta de las muy importantes heterogeneidades geométricas y mecánicas de las distintas formaciones y, por consiguiente, el establecimiento de perfiles geotécnicos representativos. Se indican algunas recomendaciones y disposiciones constructivas, pero el establecimiento de una metodología aplicable a dichas alternancias sigue por elaborar.

Actions des vents cycloniques de la Route des Tamarins

Les études conduites pour définir les conditions de vent sur les sites des grands ouvrages de la Route des Tamarins sont présentées ici. Compte tenu du fort relief qui modèle le vent sur ces sites et de la sévérité des cyclones dans ces régions tropicales, des études spécifiques, numériques et expérimentales sur maquette topographique en soufflerie ont été conduites pour définir les conditions de vent sous la forme de "modèles de vents". Ceux-ci définissent à la fois le niveau des événements cycloniques sous forme probabiliste (vent "cinquantennal") et les caractéristiques spatio-temporelles de la turbulence (taux, échelles, homogénéité...) sur les sites des ouvrages. Des mesures des propriétés aérodynamiques (coefficients stationnaires) des tabliers des ouvrages projetés ont aussi été réalisées pour donner aux bureaux d'études les éléments nécessaires au dimensionnement des ouvrages au vent. Les données météorologiques relatives aux périodes non cycloniques plus propices aux phases finales de construction des ouvrages ont aussi été analysées.

■ CONDITIONS CLIMATIQUES À LA RÉUNION

Généralités

La Réunion est une île tropicale située par 21° Sud à 200 km au-dessus du tropique du capricorne.

Les températures sont élevées, mais adoucies par l'océan, et leurs variations sont faibles. Le vent dominant, l'alizé, souffle en provenance d'Est-Sud-Est et les pluies sont abondantes (7 milliards de m³ par an) mais inégalement réparties dans l'espace et dans le temps. Le Sud-Ouest de l'océan Indien est également le lieu d'importants cyclones pendant la saison chaude.

On distingue, en effet, deux saisons :

- ◆ une saison fraîche, qui va de mai à octobre et qui reçoit le tiers des pluies annuelles ;

- ◆ une saison chaude et humide s'étendant de novembre à avril qui regroupe les deux autres tiers.

Les pluies se concentrent essentiellement sur un trimestre, de janvier à mars, au cours duquel tombent 62 à 74 % des pluies de la saison humide, soit 50 % des pluies annuelles, les cyclones apportant 12 à 15 % des pluies durant ce trimestre là.

Les régions climatiques se différencient en une région au vent, une région sous le vent et une région d'altitude.

Au vent : côte Nord-Est, côte Est et côte Sud

C'est un climat tropical avec des températures modérées et régulières, une amplitude thermique faible, un alizé presque constant. L'humidité y est forte mais les précipitations diminuent du Sud au Nord, ainsi que le nombre de jours de pluies.

Sous le vent : côte Nord-Ouest et côte Ouest

C'est la zone où l'ensoleillement et l'évaporation sont très importants. Les reliefs, de la Montagne (quartier de Saint-Denis) au Nord jusqu'au volcan au Sud-Est, mettent cette région en position d'abri du vent dominant.

La chaleur y est plus forte que dans la région au vent (de 1 à 2°) ainsi que les écarts de température entre le jour et la nuit, l'hiver et l'été tandis que l'humidité y est plus faible et les précipitations moindres.

L'altitude et le relief jouent un rôle important

Les Hauts connaissent des températures plus basses (10° en moins en moyenne) et des précipitations plus abondantes que les régions côtières. Les brouillards y sont fréquents. Dans la partie orientale de l'île, le maximum de pluviosité est constaté entre 800 et 1 000 m d'altitude.

Phénomènes extrêmes : les cyclones

Le Sud-Ouest de l'océan Indien est l'un des lieux de prédilection de ces dépressions barométriques intenses dont le caractère destructeur constitue une menace pour les populations de ces régions. On peut dire que tous les ans, pendant la saison chaude, le sort économique de l'île dépend des cyclones qui rodent et tournent dans ce secteur de l'océan Indien.

Selon la vitesse des vents, on distingue :

- ◆ la dépression tropicale quand la vitesse est inférieure à 63 nœuds (117 km/h) ;

- ◆ le cyclone tropical quand la vitesse dépasse 64 nœuds (118 km/h).

Les cyclones sont doués de deux vitesses :

- ◆ vitesse de rotation du tourbillon autour de son centre ("l'œil du cyclone" est la zone centrale, calme) qui peut atteindre 200 à 300 km/h, par rafales, avec une moyenne fréquente de l'ordre de 180 km/h ;

- ◆ vitesse de translation, le long de sa trajectoire, au contraire très lente, de l'ordre de 8 à 12 nœuds (15 à 25 km/h). Cette vitesse subit de grandes variations : certains cyclones peuvent stationner pendant plusieurs jours tandis que d'autres se précipitent à 25 nœuds (figure 1).

Les trajectoires des cyclones sont très capricieuses. Il y a en moyenne six vrais cyclones par an dans le Sud-Ouest de l'océan Indien : on estime qu'un cyclone sur neuf intéresse la Réunion et l'île est in-

Figure 1
Image satellite
d'un cyclone avec l'œil
en son centre

Satellite picture of a cyclone
with the eye at the centre



sur les ouvrages d'art

| Année | Passage au plus près des côtes | Paramètres extrêmes | Dégâts |
|--------------------|--------------------------------|---|--|
| 1948 | 30 km | Pression : 967 hPa au Port Vents estimés >250 km/h Pluies : 625 mm en 24 h à Saint-Paul | 165 morts perte totale des cultures vivrières |
| 1952 " Jenny " | Sur l'île | Pression : 954 hPa à Gillot (aéroport de Saint-Denis) Vents estimés >250 km/h Pluies : modérées | 36 morts Dégâts importants dus au vent |
| 1964 " Giselle " | 20 km | Pression : 968 hPa à Gillot Vents : 180 km/h à Gillot Pluies : diluviennes, 1698 mm en 24 h à Bélouve | Dégâts par ravinement, aux cultures |
| 1966 " Denise " | Sur l'île | Pression : 978 hPa à Gillot Vents : 180 km/h à Saint Denis (Chaudron) Pluies : diluviennes 1825 mm en 24h au volcan | 3 morts Routes coupées Dégâts aux cultures |
| 1980 " Hyacinthe " | 70 km | Pression : 978 hPa au Port Vents : 137 km/h à Gillot Pluies : considérables du 16 au 27 janvier (plusieurs passages du cyclone) : 5181 mm au volcan | 25 morts Dégâts considérables dus aux pluies |
| 1981" Florine " | 20 km | Pression : 973 hPa à Gillot Vents > 234 km/h à la Plaine des Cafres Pluies : importantes, 1161 mm en 48 h | 95 logements détruits |
| 1989 " Firinga " | Sur l'île | Pression : 962 hPa au Port Vents : 216 km/h à Saint-Pierre Pluies : très importantes, 1309 mm en 24 h au volcan | 4 morts dégâts très importants dans le sud |
| 1993 " Colina " | Sur l'île | Pression : 976 hPa à Saint-Pierre Vents : 205 km/h à la Plaine des Palmistes Pluies : 894 mm en 24 h à Mafate | 2 morts Dégâts importants aux infrastructures, aux cultures |
| 1994 " Hollanda " | 20 km | Pression : 967 hPa à Saint-Pierre Vents : 234 km/h à Sainte-Rose Pluies : 741 mm en 24 h à Grand Coude | Dégâts importants aux réseaux, aux cultures |

fluencée en moyenne par deux cyclones tous les ans.

La période où ils sont les plus fréquents est la saison chaude, de janvier à mars : 81,5 % des cas pour la Réunion, 70,8 % pour l'océan Indien.

Le maximum est toujours atteint en février.

Certains cyclones sont plus venteux que pluvieux, d'autres amènent des chutes d'eau véritablement démesurées, les "avalasses", qui provoquent inondations, coulées de boue et glissements de terrain. Les records du monde d'eau tombée en 24 heures sont à la Réunion.

La bande du territoire concernée par le projet de la Route des Tamarins est partie intégrante de l'Ouest réunionnais. Située à une altitude inférieure à 400 m, elle est comprise dans la zone la plus sèche que l'on peut caractériser comme suit :

- ◆ des températures les plus fortes de la Réunion : plus de 26° C de moyenne en janvier, plus de 20° C de moyenne et une moyenne annuelle de 22 à 24° C. La température maximale relevée à Saint-Leu a été de 36° C le 16 janvier 1955 ;
- ◆ un effet de fœhn dû aux vents dominants de secteur Est, qui augmente la température et assèche l'air dans cette zone "sous le vent" ;
- ◆ une pluviométrie annuelle sur toute la zone in-

férieure à 1 m, avec un déficit prononcé d'avril à octobre et une hygrométrie moyenne inférieure à 75 % ;

◆ une exposition aux risques cycloniques qui reste relativement faible. Par exemple, pour la région du Port, la période de retour des vents cycloniques (supérieurs à 118 km/h) est estimée de l'ordre de 20 à 25 ans.

Les conditions climatiques de cette zone "sous le vent" étant les plus favorables de l'île, la population s'y est davantage fixée, à la fois le long du littoral (habitat, tourisme, loisirs) mais également sur les pentes jusqu'à près de 2 000 m d'altitude où les conditions climatiques sont alors plus favorables à une économie rurale.

Historique des grands cyclones de la Réunion

Les principaux cyclones qui ont marqué la deuxième moitié du XX^e siècle sont récapitulés dans le tableau I (source Météo-France).

Plus récemment, les cyclones Ando (2001) et Dina (2002, 277 km/h de vent au Maïdo) ont laissé des souvenirs récents et très prégnants (figure 2, photos 1 et 2).

Gérard Grillaud

RESPONSABLE SCIENTIFIQUE VENT-ENVIRONNEMENT CSTB Nantes



Christian Barré

INGÉNIEUR D'ÉTUDES CSTB Nantes



Michel Kahan

CHEF DU SERVICE DES GRANDS TRAVAUX DDE de la Réunion



Tableau I Principaux cyclones de la seconde moitié du XX^e siècle (source Météo-France)

Chief cyclones in the second half of the 20th century (source : Météo-France weather service)

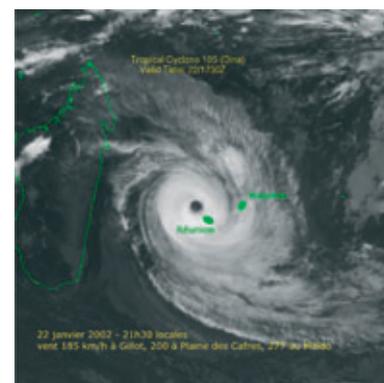


Figure 2 Dina par satellite
Dina by satellite



Photo 1 Route de Cilaos emportée par Dina
Cilaos highway carried away by Dina

Photo 2 Cascade sur la route du Littoral pendant Dina

Fall on the coastal road during Dina





■ PRISE EN COMPTE DES CONDITIONS CLIMATIQUES DANS LES ÉTUDES DE LA ROUTE DES TAMARINS

Définition des températures de référence

Les errements habituels consistant à retenir des variations uniformes de température dans les ouvrages d'art entre - 30 °C et + 40 °C (dont ± 10 °C à court terme) ne sont pas adaptés au climat de la Réunion. Avec l'appui du Setra, des valeurs de températures ont été définies en référence à la norme prEN 1991-1-5 (Eurocode 1, partie 1-5).

Les températures maximales et minimales annuelles de l'air, notées T_{\max} et T_{\min} , sont déterminées pour une période de retour de 50 ans. Après enquête auprès des services de Météo-France qui disposent d'enregistrements sur 50 ans au niveau de la mer sur deux sites dans l'Ouest et sur 30 ans sur un site à une altitude de 550 m, les valeurs suivantes ont été adoptées :

- ◆ $T_{\min} = 10 \text{ °C}$ au niveau de la mer et à 500 m d'altitude ;
- ◆ $T_{\max} = 37 \text{ °C}$ au niveau de la mer, 32 °C à 500 m d'altitude.

Pour les ouvrages, suivant leur structure, les températures extrêmes suivantes ont été prises en compte :

- ◆ Structures en béton ou mixtes :

$$T_{e\max} = T_{\max} + 4 \text{ °C}$$

$$T_{e\min} = T_{\min}$$

- ◆ Structures métalliques :

$$T_{e\max} = T_{\max} + 17 \text{ °C}$$

$$T_{e\min} = T_{\min}$$

Les écarts de températures constatés sont bien moindres que ceux considérés par les textes en métropole. Néanmoins, par mesure de sécurité, des écarts plus importants ont été adoptés pour certains ouvrages importants.

Le marché des études de vents

Les données génériques disponibles en matière de caractérisation du vent étaient insuffisantes pour mener à bien le dimensionnement des ouvrages importants de la Route des Tamarins, tant en phase de construction, qu'en service. Si la côte Ouest est à l'abri des vents dominants, les cyclones ont un parcours chaotique qui peut les amener à longer cette même côte. Les vents sont alors sans commune mesure avec ceux enregistrés couramment.

Par ailleurs, le relief montagneux introduit des effets de site, tant en vitesse, qu'en orientation et en intensité de turbulence.

Il a donc été décidé d'engager, avec l'assistance du Setra, des études en vue de la définition de modèles de vent et de la caractérisation du compor-

tement aérodynamique, voire aéroélastique, des ouvrages d'art qualifiés d'exceptionnels de la Route des Tamarins (le viaduc de Saint-Paul et les ouvrages de franchissement de la Ravine Trois Bassins, de la Grande Ravine et de la Ravine Fontaine). Ces études ont été confiées au Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB) à Nantes.

Les études, décomposées en plusieurs phases, ont eu pour objet, dans un premier temps, de définir par des moyens numériques et expérimentaux (en soufflerie atmosphérique sur des maquettes topographiques), les vents de référence sur les quatre sites d'implantation des grands ouvrages mentionnés ci-dessus. Le recueil de ces éléments (vent moyen, incidence, caractéristiques de la turbulence) est classiquement du ressort du maître d'ouvrage en tant que données du programme.

L'étude s'est ensuite portée sur la détermination expérimentale, en soufflerie sur maquettes à échelle réduite, des caractéristiques aérodynamiques des solutions projetées pour les ouvrages et sur la détection d'éventuels phénomènes d'instabilité. Si cette partie d'étude relève plus naturellement de l'exercice de la maîtrise d'œuvre, il a été jugé préférable de l'intégrer dans le marché général d'étude de vent de façon à réaliser des économies d'échelle, assurer une cohérence technique et faciliter le contrôle technique par les services techniques de l'Équipement (Setra).

Les résultats de ces études ont été fournis aux différents maîtres d'œuvre chargés de la conception des ouvrages d'art.

■ LES ÉTUDES DE SITE - MODÈLES DE VENT

Lorsque l'on veut dimensionner au vent un ouvrage il est nécessaire de définir la sévérité des tempêtes que cet ouvrage aura à affronter durant son existence.

Pour un ouvrage en service, la démarche moderne consiste à définir le vent "caractéristique" (utilisé pour le calcul des sollicitations dans l'ouvrage) par la vitesse de référence ayant une probabilité annuelle d'occurrence de 0,02 (Eurocode, ISO), c'est-à-dire aussi ayant une "période de retour" de 50 ans. L'événement météorologique ainsi défini est relativement rare, donc sévère : il ne se produit qu'un petit nombre de fois (en moyenne 2 fois) par siècle ; à l'échelle de sa durée de vie normale (un demi-siècle ?), une construction a cependant de bonnes chances (environ 6 chances sur 10) d'avoir à le subir. Elle aura sans doute à affronter un vent plus fort encore ; par exemple la période de retour de la vitesse du vent a dépassé 200 ans en certains points lors des deux "ouragans" qui ont traversé la France fin 1999 ; c'est à dire 5 à 10 % de plus que la vitesse cinquantennale.

On admet que ce risque, pour la construction, d'avoir

à subir un vent plus sévère que le vent caractéristique, est couvert par le coefficient de majoration appliqué aux sollicitations dans les vérifications aux états limites ultimes, 1,5 en général.

Pour les départements et territoires d'outre-mer sujets aux cyclones tropicaux comme la Réunion, auxquels correspond la zone 4 de l'Eurocode, ce niveau de vent caractéristique est :

$$\bar{V}_{ref} = 34 \text{ m/s}, 122 \text{ km/h}$$

C'est un vent moyen sur 10 minutes défini dans des conditions météorologiques standard, hauteur de mesures 10 m, rugosité de type rase campagne. Il résulte d'analyses statistiques et de simulations (méthode de Monte Carlo) calibrées sur les cyclones observés sur la base du nombre de cyclones approchant le site pendant une saison cyclonique, de la pression atmosphérique au centre du cyclone, de la trajectoire et de l'extension horizontale du cyclone [1].

A ce vent moyen sur 10 minutes, correspondent des vitesses de pointe ou de "rafale" (à l'échelle de 2 à 3 secondes) sensiblement plus fortes :

$$\hat{V}_{ref} = 52 \text{ m/s}, 187 \text{ km/h} : \text{vent de pointe cinquantenal en conditions de référence rase campagne.}$$

L'Eurocode permet généralement d'interpoler le vent de référence à d'autres types d'environnement en tenant compte de la topographie, de la rugosité et de la hauteur. Par exemple, les vitesses de référence qui viennent d'être citées conduisent à des valeurs sensiblement plus sévères en faible rugosité de type "mer" auxquelles sont soumis les ouvrages de bord de mer :

$$\bar{V}_{10 \text{ m}, "mer"} = 40 \text{ m/s}, 144 \text{ km/h} : \text{vent moyen cinquantenal à 10 m de hauteur en rugosité mer;}$$

$$\hat{V}_{10 \text{ m}, "mer"} = 57 \text{ m/s}, 205 \text{ km/h} : \text{vent de pointe cinquantenal à 10 m de hauteur en rugosité mer.}$$

Compte tenu du relief et de la rugosité, peu de sites à La Réunion se trouvent dans ces conditions de référence et surtout pas les grands ouvrages de la Route des Tamarins qui enjambent des ravines profondes pour trois d'entre eux ou se trouvent à flanc de falaise face à la mer comme le viaduc de Saint-Paul ; ceci justifie des études particulières.

Les études qui ont été conduites pour ces ouvrages sont de nature numérique et expérimentale, elles ont été utilisées de manière complémentaire, l'une servant à asseoir l'autre, chacune fournissant des éléments que l'autre ne peut appréhender.

Les études numériques

Il s'agit ici d'utiliser des codes de mécanique des fluides (résolution des équations de Navier Stokes) adaptés à la couche limite atmosphérique. Le point fort de cette approche est de permettre de modéliser grâce à un maillage variable une zone suffisamment vaste tout en gardant une bonne précision dans la zone proche de l'ouvrage projeté. Ce type d'approche a été validé par ailleurs sur des reliefs à topographie marquée et peut donc être jugé re-

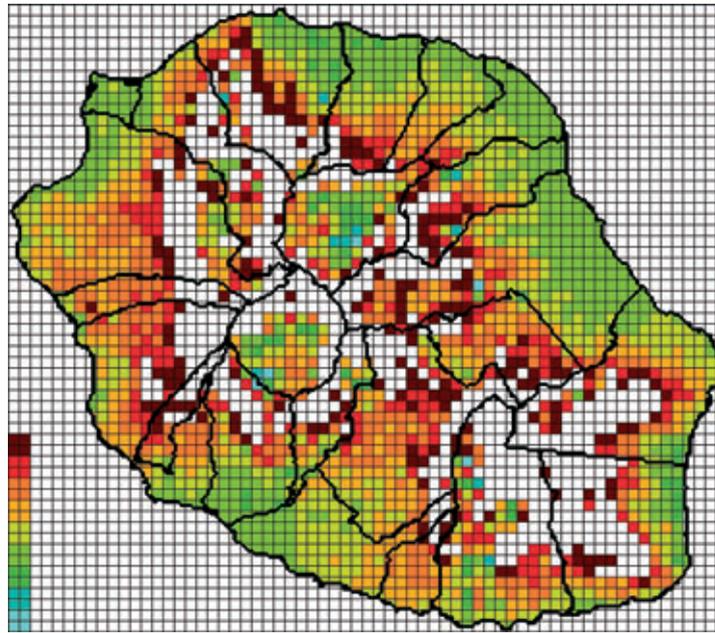


Figure 3
Vitesse de référence de méso-échelle à La Réunion d'après [2]

Mesoscale reference velocity on Reunion according to [2]

| Sites | Directions du vent considérées (degrés) | Direction perpendiculaire au tablier | Accélération de méso-échelle | Vents forts mesurés aux stations proches |
|---|---|--------------------------------------|------------------------------|--|
| Ravine de La Fontaine | 200 | non | 15% | oui |
| | 240 | oui | 10% | non |
| | 270 | oui | 10% | non |
| | 300 | non | 25% | non |
| | 330 | non | 30% | non |
| Grande Ravine et Ravine des Trois-Bassins | 200 | non | 20% | oui |
| | 240 | oui | 30% | oui |
| | 270 | oui | 20% | non |
| | 300 | non | +10% ou +30% | non |
| | 360 | non | 30% | oui |
| Viaduc de Saint-Paul | 60 | non | 20% | oui |
| | 360 | oui | -10% | non |

Tableau II
Table II

présentatif sur les sites de Grande Ravine, La Fontaine, Trois Bassins, moins sur Saint-Paul en raison de la présence de la falaise toute proche.

La vitesse du vent, son orientation, son inclinaison dans le plan vertical, le taux de turbulence longitudinal associé peuvent être ainsi déterminés à l'emplacement de l'ouvrage. En pratique c'est au niveau du tablier que se porte l'attention car c'est là que naît une bonne partie des forces aérodynamiques.

Une première analyse basée sur l'analyse des cyclones observés, l'accélération de "méso-échelle" (à l'échelle du km²) déduite d'une étude antérieure conduite sur l'ensemble de la Réunion [2], et sur l'orientation des ouvrages par rapport à ces zones accélérées a permis de définir les directions de vent à retenir pour les calculs en fonction des sites (figure 3 et tableau II).

Le code de calcul utilisé est le code Phoenix adapté par le CSTB à la couche limite atmosphérique. Les effets de relief et de rugosité sont estimés en

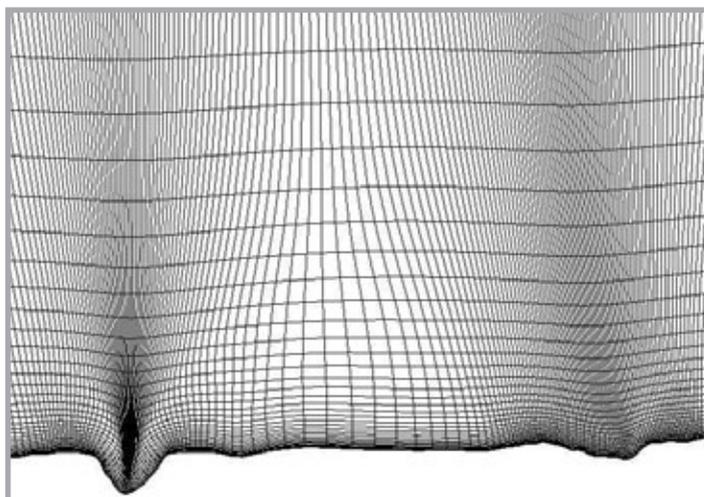


Figure 4
Maillage en coupe verticale pour les viaducs de Grande Ravine et Trois Bassins

Meshing on vertical section for the Grande Ravine and Trois Bassins viaducts

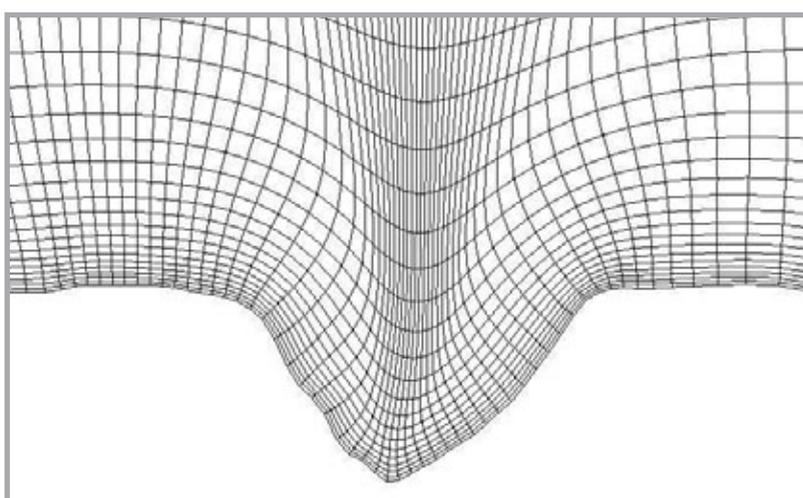


Figure 5
Détail du maillage en coupe verticale pour le viaduc de Grande Ravine

Detail of meshing on vertical section for the Grande Ravine viaduct

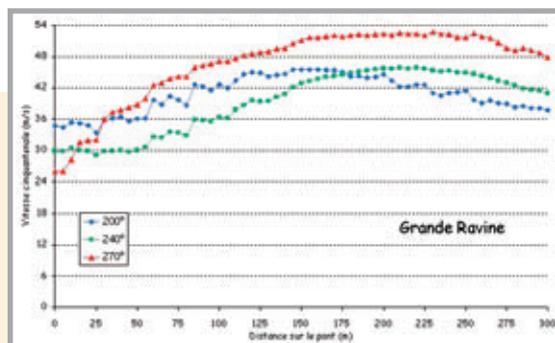
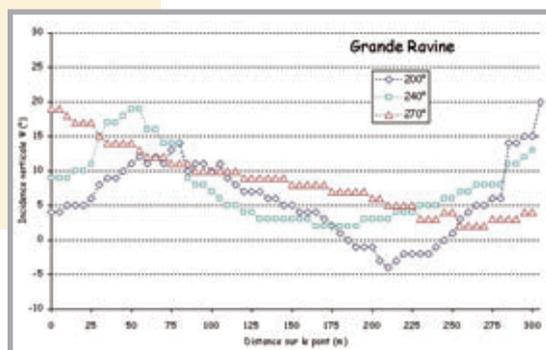


Figure 6
Vent moyen cinquantenal (V50) et incidence verticale associée pour le site de Grande Ravine

Mean fifty-year wind (V50) and associated vertical consequences for the Grande Ravine site



téorologique de la pointe des Trois Bassins. Etant donné la proximité des viaducs de Grande Ravine et des Trois Bassins, un domaine de calcul commun a été défini.

Un maillage surfacique a été défini pour chaque domaine de façon à obtenir à l'emplacement des viaducs une résolution de 5 m dans la direction perpendiculaire au pont et de 5 à 10 m suivant l'axe longitudinal. Les données topographiques nécessaires à la génération de ces maillages sont issues de la base de données Topo IGN (lignes de niveau tous les 10 m) complétée par des fichiers AUTOCAD fournis par la DDE Réunion relatifs à la proximité immédiate des ouvrages. Les figures 4 et 5 illustrent la précision du maillage pour les sites de Grande Ravine et Trois Bassins.

Les résultats obtenus montrent une grande variabilité de niveau et d'incidence verticale du vent en fonction des sites, de la position sur le tablier et de la direction du vent considérée. Les trois sites des ravines sont globalement très exposés, avec des niveaux de vent moyens de l'ordre ou supérieurs à 50 m/s, le site de Saint-Paul apparaît beaucoup plus protégé. On note aussi de fortes incidences verticales du vent pouvant atteindre 30 degrés à proximité des culées et 10 à 15 degrés dans la partie centrale des ouvrages. La figure 6 présente ces résultats pour le site de Grande Ravine.

Les études en soufflerie sur maquettes topographiques

L'approche expérimentale menée ici a consisté à mesurer les caractéristiques de la vitesse et de la turbulence le long des franchissements sur modèles topographiques en soufflerie à couche limite atmosphérique restituant le vent naturel incident. Par rapport à l'étude numérique, cette approche expérimentale fournit un modèle de vent beaucoup plus complet, intensités de turbulence longitudinale u , verticale w et latérale v , échelles de turbulence, densités spectrales, coefficients de cohérence. Ces données sont nécessaires pour conduire les calculs de réponse des ouvrages au vent turbulent. A l'inverse, compte tenu des dimensions toujours trop limitées des veines d'essais des souffleries, les zones représentées sur les maquettes sont beaucoup plus réduites que celles considérées numériquement ce qui dans ces configurations à relief marqué peut poser des problèmes d'ajustement des conditions limites. Les modèles topographiques de la ravine de la Fontaine, de la ravine des Trois Bassins et de Grande Ravine ont été réalisés à l'échelle du 1/800, le modèle du site de Saint-Paul au 1/600 pour bien représenter les détails de la falaise. Ces modèles sont composés d'une partie circulaire de 3,6 m de diamètres, soit 2,2 km au 1/600 et 2,9 km au 1/900, ils sont complétés, pour chaque direction de vent testée, par des modules représentant plus

résolvant les équations moyennes de conservation de masse et de quantité de mouvement, les flux turbulents sont pris en compte à l'aide d'un modèle de type k -epsilon. Trois domaines de calculs (de 35 km² pour le plus petit à 65 km² pour le plus grand) ont été considérés de façon à couvrir les quatre sites des viaducs, ainsi que la station mé-

grossièrement l'amont du site. L'état de surface ou rugosité est variable selon les zones en fonction de la rugosité observée sur site. La figure 7 représente les maquettes des sites des Trois Bassins et de La Fontaine au 1/800. On notera que le rivage est inclus sur chacun des modèles ce qui a permis de définir comme vent incident le vent de type "mer" conforme au modèle Eurocode.

La mesure du champ moyen de vitesse et des composantes turbulentes u , v , w est effectuée par anémométrie à fil chaud. Ces sondes anémométriques sont composées de trois fils, elles permettent la mesure instantanée des trois composantes de la vitesse par combinaison des signaux issus des trois fils. Une sonde permet de caractériser la turbulence en un point, deux sondes dont l'une est déplacée par rapport à l'autre fixe servant de référence permettent de définir les caractéristiques spatiales, échelles de turbulence et coefficients de cohérence. La figure 8 illustre l'utilisation de deux sondes sur la maquette de Saint-Paul.

Les résultats obtenus expérimentalement sont globalement conformes aux valeurs numériques, écart en niveau généralement inférieur à 10 %, hormis pour le site de Saint Paul où la présence de la falaise introduit des effets de gradients de vitesse particulièrement marqués que le modèle numérique ne semble pas à même de reproduire. Néanmoins, avec les deux méthodes le site de Saint Paul apparaît moins exposé que les trois autres pour les vents proches de la perpendiculaire à l'ouvrage. Bien que face à la mer, le viaduc se trouve à flanc de falaise dans une zone au vent où le flux est ralenti par le relief.

Synthèse et modèles de vent

Une compilation des résultats numériques et expérimentaux a été conduite pour fournir pour chaque site et chaque direction de vent un modèle de vent permettant aux équipes de conception de conduire des calculs de dimensionnement au vent turbulent. Le tableau III présente le modèle proposé au niveau du tablier pour le site de la ravine de la Fontaine.

On note sur les sites de Grande Ravine, de la Fontaine, et des trois Bassins des vitesses de vent extrêmement élevées, pouvant dépasser 70 m/s en pointe. Le niveau de vent est généralement comparable à ce qu'il est au-dessus de la mer à la même altitude, l'effet d'accélération du relief est donc compensé par l'effet modérateur de la rugosité. L'autre point important est la forte incidence du vent au niveau du tablier imposée par la pente du relief, cette inclinaison est néanmoins moins forte que la pente locale du terrain.

Une définition des vents de référence en période non cyclonique (avril à novembre) a été réalisée en analysant les données de trois stations météorologiques, Le Port (27 ans), Trois Bassins (15 ans),

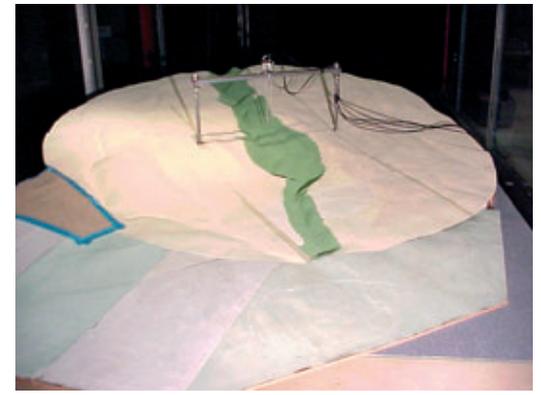
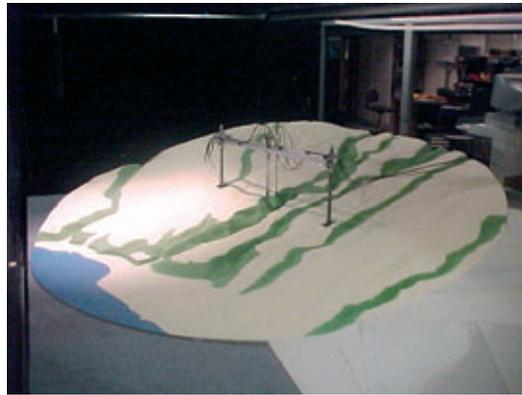


Figure 7
Maquettes topographiques des sites des Trois Bassins et de La Fontaine au 1/800°
Topographic models of the Trois Bassins and La Fontaine sites to scale 1 : 800

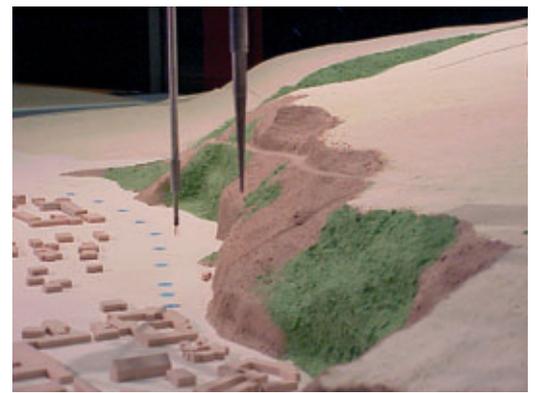
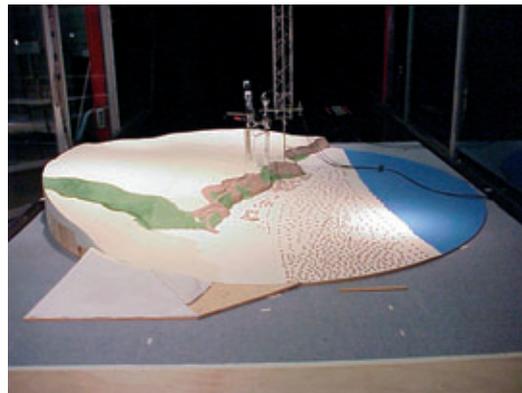


Figure 8
Instrumentation de la maquette de Saint-Paul
Instrumentation of the Saint-Paul mockup

| Direction (degrés) | 200 | | | 240 | | | 270 | | |
|----------------------------|-------|-----|-----|-------|-----|-----|-------|-----|-----|
| Incidence (degrés) | 5 | | | 10 | | | 10 | | |
| Vitesse moyenne (m/s) | 28.09 | | | 38.51 | | | 52.48 | | |
| Vitesse de pointe (m/s) | 63 | | | 62 | | | 70 | | |
| Ecart-type (m/s) | | | | | | | | | |
| u | 10.08 | | | 6.78 | | | 4.93 | | |
| v | 7.56 | | | 10.84 | | | 5.42 | | |
| w | 5.04 | | | 6.78 | | | 2.47 | | |
| Echelles de turbulence (m) | x | y | z | x | y | z | x | y | z |
| u | 150 | 30 | 10 | 40 | 30 | 10 | 100 | 45 | 15 |
| v | 30 | 45 | 15 | 45 | 45 | 15 | 45 | 50 | 15 |
| w | 30 | 20 | 10 | 35 | 20 | 10 | 25 | 20 | 10 |
| Coefficient de cohérence | x | y | z | x | y | z | x | y | z |
| u | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 12 | 12 | 12 |
| v | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 6 | 6 | 6 |
| w | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 |

Tableau III
Modèle de vent de la Ravine de la Fontaine
Wind model of La Fontaine Ravine

Mascarin (12 ans). Le niveau de référence ainsi défini (< 20 m/s pour le vent cinquantenal) permet d'envisager, pour des phases délicates de construction réalisées dans ces périodes, des contraintes climatiques bien moins sévères que celles imposées par les cyclones.

IMPACT SUR LE DIMENSIONNEMENT DES OUVRAGES

Pour estimer le comportement des ouvrages au vent, il faut aussi définir les propriétés aérodynamiques des ouvrages, dont le tablier responsable de l'essentiel des efforts de portance et pouvant être à l'origine d'instabilités.

Figure 9
Mesure des coefficients stationnaires d'un tablier de pont
Measuring the stationary factors of a bridge deck

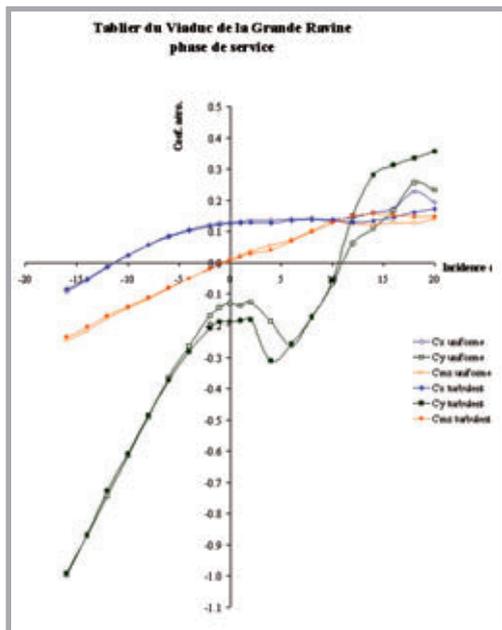


Figure 10
Coefficients stationnaires du tablier de Grande Ravine
Stationary factors of the Grande Ravine deck

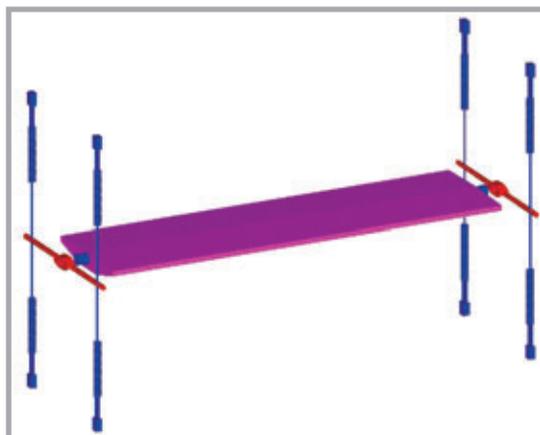


Figure 11
Principe du montage des oscillations libres, la maquette de section de tablier est suspendue à huit ressorts
Schematic of the free-oscillation test setup; the deck cross section model is suspended from eight springs

Etudes en soufflerie sur maquettes de section d'ouvrage

Les parties testées de l'ouvrage, dont les tabliers en phase de construction (sans les équipements) et en service, sont positionnées dans la veine de la soufflerie entre des joues d'extrémité restituant des conditions d'écoulement bidimensionnel. Deux balances dynamométriques insérées dans les joues permettent de mesurer les efforts de traînée, de portance et le moment de torsion. Les essais sont réalisés pour une large gamme d'incidences verticales de vent, suffisante pour couvrir la gamme déduite des études de vent. Ces mesures sont ensuite exprimées sous forme de coefficients aérodynamiques et de leurs dérivées par rapport à l'incidence, ce sont les paramètres utilisés dans les calculs au vent turbulent. La figure 9 illustre le montage expérimental dans la veine d'essais, la figure 10 présente les coefficients stationnaires du tablier de la Grande Ravine.

Ces mesures ont été conduites sur le viaduc de Saint-Paul, les deux projets en compétition sur les Trois Bassins, solution à précontrainte extradossée

et solution à deux arcs convergents, le projet à bracons de Grande Ravine et l'arc de La Fontaine. D'autres éléments des ouvrages, les bracons de Grande Ravine, les arcs de la Ravine Fontaine et de la Ravine Trois Bassins ont aussi fait l'objet de mesures spécifiques.

Etudes des phénomènes d'instabilité

Les coefficients aérodynamiques associés aux modèles de vent permettent d'estimer le comportement d'un ouvrage soumis au vent turbulent. Mais dans ces conditions de vents extrêmement sévères il faut aussi vérifier la stabilité des ouvrages, notamment pour les forts angles d'incidences constatés. Les ouvrages de Saint-Paul, de Trois bassins Paille en Queue, de La Fontaine n'ont pas à craindre ce type de problème, quelques considérations relatives à la forme des ouvrages, au niveau de vent et à la raideur et à la masse des ouvrages permettent de le montrer. Ce n'est pas le cas de Grande Ravine et de Trois Bassins extradossés, on peut remarquer que la pente du coefficient de portance de ces tabliers s'inverse pour certaines incidences de vent indiquant une possibilité de galop vertical. Des études de stabilité ont donc été conduites sur ces deux tabliers, en utilisant des maquettes de section d'ouvrage dynamiquement semblables (ajustement des masses et des raideurs) de façon à représenter schématiquement les premiers modes propres de flexion et de torsion selon la méthode dite des oscillations libres utilisée depuis le début des années 70 (figure 11).

L'observation du comportement du tablier de Trois Bassins extradossé en vent uniforme puis turbulent confirmée par la mesure des coefficients aéroélastiques a permis de constater du détachement tourbillonnaire aux environs de 15 m/s et une instabilité verticale à haute vitesse de vent. Une corniche latérale inclinée vers le bas permet de supprimer les deux phénomènes (figure 12).

Le tablier de Grande Ravine est modérément sensible au détachement tourbillonnaire pour des vitesses de vent de 15 à 20 m/s, ce qui est très rare en période non cyclonique puisque de l'ordre du vent décennal à cinquantennal. En cas de cyclone, ce phénomène n'est pas un problème car les vitesses de vent sont alors largement supérieures aux vitesses critiques du détachement tourbillonnaire.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Les études climatiques et aérodynamiques conduites pour les ouvrages exceptionnels de la route des Tamarins ont permis de définir les conditions de vent extrêmement sévères auxquelles seront soumis

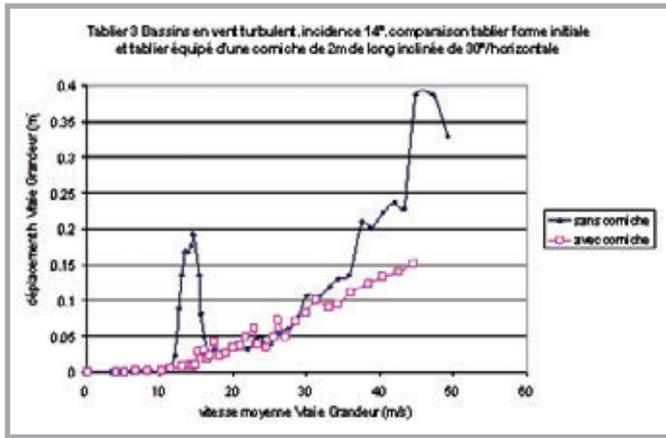


Figure 12
Déplacement vertical du tablier Trois Bassins soumis au vent turbulent d'incidence 14°, avec et sans corniche

Vertical displacement of the Trois Bassins deck subjected to turbulent wind at a 14° angle, with and without cornice

ces ouvrages lors de cyclones. Elles ont aussi fourni les paramètres nécessaires au calcul des sollicitations engendrées par le vent.

Pour faire suite à de telles études et pour les compléter, il sera important de vérifier sur ces ouvrages achevés que les marges de sécurité avec les hypothèses retenues sont bonnes. Un programme d'instrumentation est prévu pour l'ouvrage de la Grande Ravine. Ce sera le rôle du "monitoring" de relever les déplacements, les vibrations et les efforts au sein de l'ouvrage, en même temps que les conditions réelles de vent. Cet outil, outre la sécurité qu'il apporte aux utilisateurs, est aussi très utile pour la politique de maintenance de l'ouvrage, il apporte enfin beaucoup d'enseignements aux concepteurs pour les ouvrages futurs.

■ RÉFÉRENCES

[1] "Vents extrêmes dus aux cyclones tropicaux dans les DOM-TOM". D. Delaunay. Cahiers du Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, livraison 269, mai 1986, cahier 2078.

[2] "Cartographie des vents cycloniques dans les Départements d'Outre-Mer". D. Delaunay. Rapport CSTB EN-AEC 99.1 C.

ABSTRACT

Hurricane wind actions on the large bridges of the Tamarins highway

G. Grillaud, Ch. Barré, M. Kahan

The studies carried out to define the wind conditions on the sites of the large bridges to be built along the Tamarins road are related here. Taking into account the strong topography which models the wind flow and the intensity of the hurricanes in this tropical area, specific studies, numerical and experimental on topographical models in a boundary layer wind tunnel were achieved in order to characterise the wind conditions. The proposed resulting wind models define both the wind intensity and the turbulence properties (turbulence intensities and scales, homogeneity...) on the bridges sites.

Measurements of the aerodynamic properties of the decks of the projected bridges were also carried out in order to give to the design teams the elements to their wind buffeting computations. Meteorological data related to non cyclonic seasons, more favourable to the final constructions stages of the bridges were also analysed.

RESUMEN ESPAÑOL

Acciones de los vientos ciclónicos en las obras de fábrica de la Carretera de los Tamarindos

G. Grillaud, Ch. Barré y M. Kahan

Los estudios llevados a cabo para definir las condiciones de viento en las instalaciones de las grandes obras de la Carretera de los Tamarindos figuran presentados en este artículo. Habida cuenta del importante relieve que modela el viento en estos emplazamientos y de la severidad de los ciclones en estas regiones tropicales, se llevaron a cabo diversos estudios específicos, digitales y experimentales en maqueta topográfica en túnel aerodinámico para definir las condiciones de viento en forma de "modelos de vientos". Estos últimos permiten definir simultáneamente el nivel de los eventos ciclónicos de forma probabilista (viento "cincuentenario") y las características espaciotemporales de la turbulencia (grado, escalas, homogeneidad, etc.) en los emplazamientos de las obras.

También se efectuaron diversas medidas de las propiedades aerodinámicas (coeficientes estacionarios) de los tableros de las obras del proyecto para entregar a las oficinas de estudios los elementos necesarios al cálculo dimensional de las obras sometidas al viento. Los datos meteorológicos relativos a los períodos no ciclónicos más propicios a las fases finales de construcción de las obras fueron también analizados.