

**Comité d'experts pour la détermination de la position de la  
nouvelle route du Littoral, dans l'île de La Réunion,  
entre Saint-Denis et La Possession**

**Rapport**

**30 mars 2007**



# **Comité d'experts pour la détermination de la position de la nouvelle route du Littoral, dans l'île de La Réunion, entre Saint-Denis et La Possession**

## **Conclusions et recommandations**

Après une mission sur le site, neuf réunions de travail, des rencontres avec les organismes concernés du Réseau Technique de l'Équipement, Météo France et la Délégation aux Risques Majeurs, le comité d'experts est en mesure de proposer, conformément au mandat qui lui a été confié le 27 décembre 2006 par la direction générale des routes :

- un choix d'hypothèses d'éboulement de la falaise permettant de déterminer, pour la section sur digue du tracé B1 défini dans le protocole d'accord du 19 janvier 2007 entre l'Etat et la Région, une « surface polygonale limite du projet » au-delà de laquelle devrait se positionner la future infrastructure pour assurer la sécurité des usagers ;
- une évaluation des risques naturels maritimes à prendre en compte dans le projet ;
- des préconisations sur les caractéristiques des ouvrages (digues, viaducs et têtes de tunnels) visant à les mettre à l'abri des dommages pouvant résulter des effondrements de falaise ou des risques naturels marins ;
- une appréciation sur les critères de choix entre ces différents types d'ouvrage pour chacune des sous-sections de l'itinéraire, et des suggestions pour l'examen d'éventuelles alternatives à la « solution de base ».

### **Choix d'hypothèses d'effondrement de la falaise**

Pendant des milliers d'années, la falaise a reculé sous les attaques de l'océan, qui a érodé le pied de la paroi, créé des instabilités et déblayé les matériaux éboulés, effaçant ainsi les traces de ses actions anciennes et contraignant à ne considérer, pour l'évaluation de l'aléa, que les événements de la « période historique ».

Ce sont ces événements que le comité a pris en compte, non sans s'interroger sur la possibilité qu'aient pu se produire dans le passé, à l'échelle des temps géologiques, des phénomènes de nature différente et de beaucoup plus grande ampleur.

C'est ainsi que le comité s'est interrogé sur la possibilité d'un glissement sur des plans inclinés visibles dans une zone de la falaise, près de La Grande Chaloupe, ce qui l'a incité à demander une expertise particulière au CETE d'Aix.

Cette expertise s'est révélée négative. Même dans cette zone, le risque d'un grand éboulement est exclu, les mécanismes d'évolution y sont bien ceux qu'avait envisagés le comité, et qu'il a donc définitivement retenus.

Nous les rappelons ci-après, en précisant de quelle façon leurs conséquences peuvent être évaluées :

- La chute des blocs qui se détachent de la falaise.  
Le problème est de déterminer la distance de leur premier point d'impact et la hauteur de leurs rebonds, ce qui donne une première « polygonale ».
- Les éboulements de la falaise en « écailles » parallèles à la paroi, dont on a évalué l'importance, d'une part, à partir de deux éboulements « historiques » de la route du littoral, ceux de 1980 et de 2006, d'autre part, à partir de l'observation des conditions générales d'évolution des falaises de l'île. Ceci a permis d'établir une

autre polygonale, en fait une double polygonale puisque deux méthodes de calcul ont été utilisées parallèlement pour déterminer la distance minimale à laquelle devait être placée la digue pour la protéger contre ce type d'évènement.

Dans le souci que soit garanti un très haut niveau de sécurité, le comité a retenu comme « polygonale de projet » l'enveloppe de ces trois polygonales.

Les données disponibles pour la section sur digue de la « solution de base », entre la Grande Ravine et La Possession, étant suffisamment complètes, la polygonale de projet relative à cette section a pu être complètement définie par le comité.

Compte tenu de lacunes dans les données relatives à la section entre Saint-Denis et La Grande Ravine, l'étude d'une éventuelle variante en mer dans cette section suppose des investigations complémentaires pour lesquelles le comité fait des propositions précises.

## **Les risques maritimes**

### **Les risques liés aux marées et à la houle**

Sont incluses dans cette dénomination les marées, qui sont faibles, les surcotes marines et la houle. Contrairement aux éboulements de falaise, ces données peuvent faire l'objet d'un traitement statistique, et le maître d'ouvrage peut donc choisir une « période de retour ».

La houle constitue, dans cette région du monde, un phénomène majeur, lourdement dimensionnant pour les ouvrages construits lorsqu'il s'agit des houles cycloniques, et pour les ouvrages en construction lorsqu'il s'agit des houles d'alizés et des houles australes.

Des études statistiques approfondies ayant été réalisées en 1998 par la société Sogreah Ingénierie sur les houles cycloniques et le GIEC, Groupe International d'Etude du Climat, n'ayant pas mis en évidence d'influence des changements climatiques sur le régime des cyclones, le comité, en accord avec le CETMEF, Centre d'Etudes Maritimes et Fluviales, recommande de se baser sur les événements centennaux définis en 1998, à la fois pour la hauteur significative de la houle cyclonique (12,5 m), sa période (14,5 s), et la valeur additionnée de la marée de vives eaux et de la surcote (1,3 m).

Etablies dans la même étude de 1998, les données relatives aux houles d'alizés et australes ont été mises à jour en 2006 pour l'ensemble Maurice-Réunion, les transpositions locales restant à faire. C'est ce que recommande le comité pour la route du littoral afin de se prémunir des risques correspondants lors de la construction de l'ouvrage.

### **Les risques liés à l'élévation du niveau de la mer et aux tsunamis**

Avec ces catégories de risques, on s'aventure en terrain beaucoup plus incertain, et le comité a dû se baser sur un faisceau d'informations dont aucune ne peut être considérée comme fondant un art de l'ingénieur dans le domaine correspondant, et encore moins une amorce de réglementation.

Il propose, pour la surélévation du niveau de la mer, de retenir le chiffre de 0,50 m, déjà conseillé par le CETMEF pour le nouveau quai du port Est, et de prendre comme référence pour les tsunamis celui du 26 décembre 2004, qui a conduit à une surélévation des eaux de 0,60 m au niveau du marégraphe du port Ouest (en constatant qu'on est très loin des hauteurs de houle engendrées par les cyclones et que les tsunamis ne sont donc pas dimensionnants pour le projet).

## Recommandations relatives aux ouvrages de la solution de base

### Route sur digue

Les recommandations du comité sont les suivantes :

- Assurer un niveau très élevé de sécurité des personnes vis-à-vis des risques liés à la falaise grâce aux mesures suivantes : placer le pied de la digue (intersection de son talus intérieur et du fond du piège à cailloux) au-delà de la « polygonale de projet » et prescrire que sa hauteur au dessus du piège à cailloux ne soit nulle part inférieure à 9 m, de façon à ce que les blocs n'atteignent pas le talus, que leurs rebonds n'atteignent pas la chaussée et que les éboulis ne dépassent pas la mi-hauteur du talus, ce qui ménage, jusqu'à son sommet, une réserve de capacité du même ordre que l'éboulement initial; prévoir en crête de digue un dispositif qui arrête les éventuelles projections provoquées par l'éclatement d'un bloc tombant sur un autre bloc.
- N'admettre, du point de vue des risques maritimes, aucun franchissement pouvant atteindre la route y compris en houle centennale et ceci, soit par une digue infranchissable soit par une digue plus basse mais avec une zone de recueil des eaux de franchissement : cette zone de recueil (des eaux) pouvant accueillir une voie de service pour des interventions sur la digue sans gêner la circulation publique.
- Concevoir la carapace de façon à n'avoir aucun dégât pour la houle centennale (et non 5 % de dégâts comme on l'admet généralement pour les carapaces bicouches).

### Tunnel

Le creusement du tunnel en section courante ne devrait guère soulever de problème, sous réserve d'en baser le projet sur une étude géologique, hydrogéologique et géotechnique précise.

Malgré les glissements qui s'y sont produits lors de la construction de la voie U2, le versant qui domine Saint-Denis peut permettre l'implantation de la tête Est du tunnel.

Dans l'implantation retenue pour le tracé de base, l'entrée Ouest du tunnel et son accès depuis la route en mer sont préoccupants. Outre les risques d'exposition aux chutes de blocs et aux éboulements inhérents à tout ouvrage situé en deçà de la polygonale, la pénétration très oblique du tunnel risque en effet de provoquer des instabilités dans la falaise et le passage à faible profondeur sous La Grande Ravine peut être source de difficultés.

Le comité suggère donc que soit étudiée une autre solution pour cette entrée Ouest.

À défaut de lui trouver une alternative acceptable, au plan technique comme au plan financier, la solution actuelle ne devrait être retenue qu'au prix de mesures très convaincantes de sécurisation.

Le comité doit enfin préciser que le Centre d'études des tunnels a attiré son attention sur le risque de congestion de l'ouvrage à l'arrivée sur Saint-Denis si un dispositif efficace de diffusion du trafic n'est pas mis en place, ainsi que sur la difficulté de prise en compte des transports de matières dangereuses, des circulations douces, et des transports exceptionnels. La possibilité de résoudre ces problèmes conditionne en effet la crédibilité de la solution en tunnel.

## **Alternatives possibles à la solution de base**

Il a été demandé au comité de s'exprimer sur les « choix possibles entre digue, viaduc et tunnel pour chacune des sous-sections de l'itinéraire ».

Il est évident qu'une solution optimale ne peut être identifiée sur la seule base de considérations techniques, les questions de coût des ouvrages étant notamment tout à fait essentielles.

Sous cette réserve, les commentaires du comité sur les différentes sections sont les suivants en parcourant l'itinéraire depuis le Port :

### **Section La Possession - Grande Ravine**

Compte tenu de la faible pente des fonds marins, la solution la plus avantageuse est très certainement la route sur digue, de loin la moins chère, et qui présente de nombreux autres avantages (souplesse d'exploitation ; aptitude à accueillir sans contraintes les transports de matières dangereuses, transports exceptionnels et circulations douces ; tolérance vis-à-vis de chocs de bateaux en perdition ; tolérance vis-à-vis d'éventuels dépassements des seuils de dimensionnement etc..).

### **Section Grande Ravine – Saint-Denis**

Elle est prévue en tunnel dans la solution de base.

Compte tenu du coût du tunnel, des difficultés à prévoir au niveau de sa sortie Ouest, des problèmes qui se poseront en matière de gestion du trafic, de transport de matières dangereuses, de circulations douces, et de transports exceptionnels, le comité recommande que, parallèlement à la solution tunnel, soit étudiée et évaluée en première phase des études d'avant projet sommaire (APS) une alternative entièrement aérienne.

Deux solutions aériennes sont envisageables, dont l'implantation suppose de disposer d'études complémentaires de même nature que celles qui ont permis de déterminer la polygonale sur la section aérienne de la solution de base.

La première consisterait à prolonger la digue en mer jusqu'à Saint-Denis.

Aux avantages précédemment énumérés pour la route sur digue, il faut ajouter ceux qui sont liés à une solution « mono technique » : souplesse de programmation, réduction du coût unitaire au fur et à mesure que le chantier s'allonge, simplification de l'organisation du chantier et de son pilotage par le maître d'ouvrage.

Si ce point de vue était adopté, et s'il était décidé d'engager l'étude d'une alternative sur digue, des investigations complémentaires spécifiques seraient à prévoir : étendre à cette zone les levés bathymétriques et géotechniques ; prévoir une étude géologique très fine du Cap Bernard sur le modèle de celle qui a été réalisée près de La Grande Chaloupe ; demander à Rochet et Rochet Consultants la réalisation de plusieurs modélisations d'éboulements implantés sur la base de l'étude géologique ; prévoir éventuellement quelques trajectographies de blocs supplémentaires.

La deuxième serait celle d'un viaduc.

Un tel ouvrage présente l'avantage d'être peu dépendant de la profondeur des fonds marins, donc de la distance à la côte.

Le rapport du comité, établi sur ce point avec l'appui du Sétra (Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes), propose une implantation par rapport à la polygonale et fait pour

son dimensionnement un certain nombre de recommandations qui visent à prendre en compte l'évolution de la réglementation.

Un point mérite une attention tout à fait particulière, c'est le risque de graves endommagements ou même de rupture de l'ouvrage en cas de choc sur le tablier d'un navire en perdition.

Le comité recommande à ce sujet d'effectuer, dès le stade de l'APS une étude statistique des navires passant au large de l'ouvrage, donnée d'entrée d'une étude de risque qui seule permettra au maître d'ouvrage de fonder sa décision sur une base objective.

### **Remarque finale**

Conformément à son mandat, le comité s'est essentiellement appuyé dans son analyse sur les études précédemment réalisées.

Il est possible que les données complémentaires résultant des études d'APS incitent à nuancer ou adapter certaines des conclusions de ce rapport. Il appartiendra au maître d'ouvrage de solliciter alors l'avis du comité, sur la base de ces données nouvelles.

Il convient enfin de préciser que le comité pourra porter une appréciation, plus fondée sur le projet et la sécurité qu'il garantit, lorsque les principaux choix de conception des ouvrages auront été définis.

Composition du comité technique	
Jean Berthier	Consultant, Président du comité
Christian Binet	Conseil Général des Ponts et Chaussées
Christophe Bonnard	Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne
Jean-Louis Durville	Conseil Général des Ponts et Chaussées
Bernard Feuga	BRGM - Geoderis
Medhi Ghoreychi	INERIS
Jean-Pierre Magnan	LCPC
Marc Panet	Consultant
Marcel Rat	Consultant
Paul Scherrer	Port autonome du Havre



# **Comité d'experts pour la détermination de la position de la nouvelle route du Littoral, dans l'île de La Réunion, entre Saint-Denis et La Possession**

## **Rapport**

### **Plan du rapport**

1. Introduction
  2. Méthode de travail adoptée par le comité.
  3. Historique de la route et des principales études réalisées
  4. Risques passés et actuels liés à la falaise
  5. Projet de sécurisation en cours de réalisation
  6. La géologie du site
  7. Les mécanismes d'évolution de la falaise
  8. Le risque sismique
  9. Détermination de la polygonale
  10. Les risques maritimes
  11. Recommandations relatives à la route sur digue
  12. Recommandations relatives au tunnel
  13. Recommandations relatives à un viaduc en mer
  14. Alternatives possibles à la solution de base
  15. Remarques finales
- Annexe : polygonales.

## 1. Introduction

La section de la RN1 sur laquelle porte l'expertise se développe sur 13 km entre Saint-Denis et La Possession.

Mise en service en 1976 dans sa configuration actuelle à 2x2 voies, elle constitue la seule liaison rapide entre la capitale économique et l'aéroport d'une part, le port de La Pointe des Galets d'autre part. Elle supporte un trafic de plus 50.000 véhicules par jour, avec, les jours ouvrables, 4,5 % de poids lourds dont une part notable est dédiée au transport de carburant, carburéacteur et charbon (usine électrique de l'Est). C'est un axe vital pour l'économie locale.

Bordée d'un côté par la mer et de l'autre, sur une grande partie de son tracé, par des falaises pouvant dépasser 200 m de hauteur, elle est exposée à de fréquentes chutes de pierres, et parfois à des éboulements massifs et à des coulées de boue. Ceci a conduit à mettre en place, en période de forte pluie, soit en moyenne 60 jours par an, un dispositif permettant d'interrompre la circulation sur la chaussée côté montagne.

Des travaux de sécurisation avaient été réalisés dès 1986. Un nouveau programme a été engagé en 2005 pour limiter les chutes de pierres susceptibles d'atteindre la chaussée ; il consiste en la mise en place de filets métalliques, complétés localement par la réalisation de murs en gabions. Il est prévu d'achever ce programme en 2007.

A la suite du Débat Public de 2004 relatif à la nouvelle route du littoral et à un projet de tram-train, l'État a pris le 11 avril 2005 la décision « d'engager des études permettant d'améliorer la liaison entre Saint-Denis et l'Ouest de l'île en termes de sécurité et de niveau de service ».

L'éboulement en grande masse du 24 mars 2006 a conduit à accélérer la réalisation de ces études, ce qui a permis d'aboutir, le 24 août 2006, au choix pour la « nouvelle route du littoral » de la solution par « Les Bas », dite B1, qui, pour une longueur totale de 11,3 km, comporte 3,5 km de tunnel, 1,7 km de viaduc et 6,1 km de route sur digue, le tracé du tram-train étant totalement dissocié de celui de la route. C'est cette solution qui dénommée dans ce rapport « solution de base ».

La route doit être mise hors d'atteinte des aléas liés :

- aux effondrements en masse de secteurs de falaise ;
- aux chutes de blocs et de pierres ;
- aux coulées de boues ;
- aux vagues des houles cycloniques ;
- à la surélévation du niveau de la mer liée au réchauffement climatique.

Considérant que les études déjà réalisées permettent de disposer d'une bonne connaissance de la structure de la falaise et des mécanismes de chutes de blocs et d'éboulements qui l'affectent, mais que la complexité des phénomènes n'a toutefois pas permis à ce jour d'arrêter définitivement les hypothèses à prendre en compte pour l'élaboration de l'avant projet sommaire (APS), le Ministre des Transports, de l'Équipement, du Tourisme et de la Mer a décidé de mettre en place un comité d'experts chargé de proposer une décision sur ce sujet.

Sa composition est la suivante :

Jean Berthier, consultant, président du comité,  
Christian Binet, Conseil Général des Ponts et Chaussées,  
Christophe Bonnard, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne,  
Jean-Louis Durville, Conseil Général des Ponts et Chaussées,  
Bernard Feuga, BRGM – Geoderis,  
Mehdi Ghoreychi, INERIS,  
Jean-Pierre Magnan, LCPC,  
Marc Panet, consultant,  
Marcel Rat, consultant,  
Paul Scherrer, Port autonome du Havre.

Pierre Toulouse, chef du bureau des opérations routières 2, est chargé du suivi du projet à la direction générale des routes. Le secrétariat technique du comité est assuré par Olivier de Soras, au titre de la direction départementale de l'équipement de La Réunion, assisté par Jean-Claude Pauly pour le Centre d'études techniques de l'équipement d'Aix-en-Provence. J.C. Pauly a par ailleurs été associé comme expert aux travaux du comité.

La décision du 27 décembre 2006 précise que l'avis du comité doit pouvoir être rendu sur la base des études disponibles et qu'il doit « limiter ses investigations complémentaires à celles qui lui paraîtraient strictement indispensables ». Elle définit sa mission dans les termes suivants.

« L'objet de la mission du comité est de garantir que la nouvelle infrastructure sera à l'abri des aléas liés à la falaise et à la mer, et d'aider à l'optimisation technique du projet. Son rapport comprendra :

- un choix d'hypothèses d'effondrement de la falaise ainsi qu'une évaluation des risques naturels maritimes permettant de définir une « surface polygonale limite du projet » au-delà de laquelle devra s'inscrire le positionnement en plan et en altitude de la future infrastructure de façon à se prémunir contre les risques précités; le niveau de fiabilité correspondant sera évalué ;
- des préconisations sur les choix possibles entre digue, viaduc et tunnel pour chacune des sous-sections de l'itinéraire; ces préconisations pourront, ultérieurement, faire l'objet de demandes de précisions ;
- des préconisations sur les caractéristiques des ouvrages (digues, viaducs et têtes de tunnels) visant à mettre les usagers de l'infrastructure comme les ouvrages eux-mêmes à l'abri des dommages pouvant résulter des effondrements précités ou des risques naturels marins (houles cycloniques, raz de marée, hausse de la mer liée au réchauffement climatique) ».

La commande d'études passée à la même date du 27 décembre 2006 au directeur départemental de l'équipement, qui porte sur l'élaboration de l'APS et du dossier d'enquête d'utilité publique, précise que la polygonale définie par le comité devra, avant d'être prise en compte dans les études, être approuvée par la direction générale des routes, et que les études de tunnels, de viaducs et de digues pourront par la suite être soumises à l'appréciation du comité d'experts.

Le protocole d'accord adopté le 19 janvier 2007 par l'Etat et la Région précise que « l'Etat et la Région se sont accordés sur la solution B1 » que le comité d'experts a donc considérée dans ses travaux comme la « solution de base ».

Néanmoins, et conformément à sa lettre de mandat, le comité a émis des avis sur des variantes possibles par rapport à la solution de base.

## **2. Méthode de travail adoptée par le comité**

La décision relative à sa création excluant qu'il puisse engager des études complémentaires lourdes, susceptibles de retarder le calendrier général de l'opération, le comité d'experts a fondé son opinion sur les éléments d'appréciation suivants :

- l'analyse des études déjà réalisées ;
- les informations et opinions recueillies par le comité ou par ses membres, à titre individuel ;
- les observations qu'ont pu faire les experts du comité à l'occasion de leurs visites sur le site.

La première tâche, assurée par la direction générale des routes et le secrétariat technique, a été de recenser et de regrouper toutes les études déjà réalisées, de telle façon que les experts puissent en prendre commodément connaissance.

Il faut souligner que ces études sont très nombreuses<sup>1</sup>, très volumineuses, et que beaucoup sont consacrées à des solutions dans lesquelles une plate-forme unique héberge la route et le transport en commun en site propre, alors qu'il a finalement été décidé de disjoindre complètement ces deux projets.

Pour les études les plus essentielles du point de vue de l'établissement de la « polygonale », le comité a souhaité entendre leurs auteurs. Ceci lui a permis de valider en toute connaissance de cause les méthodologies utilisées et de prendre acte des résultats obtenus, sans bien entendu pouvoir en vérifier le détail.

Le comité a d'autre part travaillé en étroite collaboration avec les organismes spécialisés du réseau technique de l'équipement : Sétra, CETMEF, CETu, CETE de Lyon, CETE d'Aix (le LCPC étant quant à lui représenté au sein du comité)<sup>2</sup>.

Il a enfin eu des contacts approfondis avec la Délégation aux Risques Majeurs, Météo France et, pour la question des tsunamis, avec le Commissariat à l'Energie Atomique.

Les étapes essentielles des travaux du comité ont été dans ces conditions les suivantes :

- 1 - 14 décembre 2006, réunion plénière, ouverte par le directeur général des routes, en visio conférence avec la direction départementale de l'équipement (DDE).

---

<sup>1</sup> Le rapport Arcadis de juin 2006 en recense 93, non comprises les études spécifiques au tram-train.

<sup>2</sup> Ces sigles sont relatifs aux organismes suivants : Service d'études techniques des routes et autoroutes (Sétra), Centre d'Etudes Maritimes et Fluviales (CETMEF), Centre d'Etudes des Tunnels (CETu), Centre d'Etudes Techniques de l'Equipement (CETE), Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC).

- 2 – 10 au 12 janvier 2007, visite du site par les membres du comité, organisée par la DDE, avec le concours de Marc Cruchet, géologue, consultant.
- 3 – 25 janvier, réunion plénière, avec comme intervenants Pierre Pothérat (CETE de Lyon), Louis Rochet (R&R consultants), Jean-Claude Pauly (CETE d'Aix), tous auteurs d'un des rapports examinés en séance.
- 4 – 30 janvier, réunion restreinte au Centre Technique des Ouvrages d'Art du Sétra (J. Berthier, C. Binet et P. Scherrer pour le comité, Thierry Kretz, Emmanuel Bouchon, Luis-Angel Millan et Gilbert Haiun pour le Sétra).
- 5 – 6 février, réunion plénière en visio conférence avec la DDE et des représentants de Météo-France Réunion, avec comme invités Olivier Piet et Céline Trmal (CETMEF), Michel Ségard (Délégation aux Risques Majeurs), Jean-Pierre Mac Veigh (Météo France).
- 6 – 21 février, réunion plénière, en visio conférence avec la DDE, en présence de Marc Tassone, adjoint du DDE, avec comme invités Michel Deffayet et Alain Robert (CETu), Pascal Dubois (CGPC).
- 7 – 6 mars, réunion plénière.
- 8 – 21 mars, réunion restreinte au CETMEF (J. Berthier, C. Binet et P. Scherrer pour le comité, Geoffroy Claude et Olivier Piet pour le CETMEF).
- 9 – 27 mars, réunion plénière, en présence d'Olivier de Soras.

### 3. Historique de la route et des principales études réalisées

La première liaison « moderne » entre Saint-Denis et La Possession, dont la construction s'est déroulée de 1960 à 1963, était une route à deux voies. Les risques dus à la mer semblant les plus redoutables, la solution adoptée a consisté à abattre largement la falaise. La voie comportait deux tunnels revêtus, celui du Cap Bernard, à l'entrée de Saint-Denis, encore en service, et celui de la Pointe du Gouffre, très fissuré et abandonné lors de la mise à 2x2 voies. Trois autres tunnels avaient été prévus, mais l'effondrement de celui des PR 2+900 à 3+150 en cours de chantier a conduit à les abandonner.

Il n'est pas inutile de rappeler le contexte de cet éboulement, tel que nous l'a décrit la DDE. « Les travaux de réalisation de la première route du littoral comprenaient sur ce secteur le passage du souterrain routier dans l'ancien tunnel du CFR (chemin de fer de La Réunion), l'exécution de baies d'aération entre le souterrain routier et la falaise et une déviation du CFR parallèlement au souterrain routier laissant un piédroit de 5 m de largeur moyenne entre les deux souterrains.

Des signes de « fatigue » du terrain ont été observés dès le démarrage des travaux, au 2<sup>ème</sup> semestre 1960. Ils ont empiré jusqu'au 10 mars 1961, avec pour résultat l'écrasement de la partie Ouest du souterrain sur 270 m, l'éboulement de 200 000 m<sup>3</sup> de matériaux et, en arrière, l'effondrement de la déviation du CFR sur 40 à 50 m.

La partie restante paraissant fortement compromise, il fallut la détruire le 10 juillet 1961 en foudroyant le piédroit côté mer, ce qui entraîna la chute de 300 000 m<sup>3</sup> de matériaux. Il fallut aussi rétablir le passage des trains en creusant une nouvelle déviation de chemin de fer, longue de 600 m, et l'on fit passer la route sur les éboulis.

C. Bordet, géologue à EDF, qui s'est rendu sur les lieux en mai 1961 estime que « l'éboulement est dû à un déséquilibre mécanique de la masse de basalte et de scories formant la falaise au-dessus des ouvrages souterrains perforés ; un excès de charge s'est produit sur les piédroits, augmenté par le déséquilibre dû à la falaise (poussée au vide) entraînant l'écrasement de ceux-ci et l'effondrement de la falaise ».

Bien que cet effondrement soit à l'évidence lié à une intervention humaine, il montre la sensibilité du massif à toute action conduisant à des redistributions de forces au voisinage de la falaise et conduit notamment à être très attentif aux conditions du débouché, dans la falaise de La Grande Ravine, du tunnel prévu pour la nouvelle route.

L'accroissement du trafic conduit en 1972 à la décision de moderniser cette voie, en la doublant et en l'écartant de la falaise (malheureusement pas assez, comme on s'en apercevra par la suite) pour assurer sa sécurité en créant un piège à cailloux, le fond du piège étant ameubli, et le dispositif étant complété par des murs en gabions pour arrêter les blocs roulant ou rebondissant.

D'autres préoccupations sont prises en compte : n'opérer que le minimum de coupures de la voie existante, réduire l'emprise grâce à la construction côté mer d'un soutènement en sol renforcé de type « Terre Armée » protégé par des tétrapodes, s'interdire de forer de nouveaux tunnels etc...

Le grand éboulement du PR2, en 1980, qui a occasionné la mort de trois personnes et les chutes de blocs à répétition montrent que l'objectif de sécurisation n'a pas été atteint et conduisent les pouvoirs publics à engager des études pour trouver des solutions à ce très grave problème. Ainsi qu'il a été souligné précédemment, le nombre et la variété de ces études sont à la mesure de sa très grande difficulté.

Sans en donner le détail, on peut préciser qu'elles portent sur la géologie et l'hydrogéologie du site, la morphologie et la fissuration du massif, la modélisation des mécanismes de chutes de blocs et d'éboulement de la falaise, le régime de la houle, son action sur la digue et les ouvrages d'art, l'environnement terrestre et marin, les ressources en matériaux pour la construction de la digue.

Plusieurs de ces études ont un statut particulier :

- celles qui accompagnent les travaux de la première commission internationale d'experts tout d'abord. Mise en place en 1997 et présidée par Kurt Suter, ancien Directeur de l'Office Fédéral des Routes de Suisse, cette commission conclut, dans son rapport de mai 1999, à la nécessité et à la possibilité de réaliser une route nouvelle pour laquelle elle propose plusieurs variantes différant par leur coût, mais présentant toutes « un degré de sécurité très élevé » ;
- les études réalisées en 1998 par Sogreah Ingénierie, qui, après une analyse très complète des risques océanographiques, propose, chiffre et compare trois scénarios, l'un constitué d'une route sur digue, un autre par un viaduc, un troisième enfin qui alterne des sections sur digue et des sections en viaduc<sup>3</sup> ;
- les études et dossiers de synthèse préparatoires au débat public organisé en 2004 par la Commission Nationale du Débat Public, conclus par la décision du 11 avril 2005 citée en introduction ;
- enfin l'étude de synthèse réalisée au printemps 2006 par Arcadis<sup>4</sup>, qui analyse et synthétise l'ensemble des études déjà réalisées, définit les familles

---

<sup>3</sup> Etude préalable des risques océanographiques, étapes 1, 2 et 3, Sogreah Ingénierie, février 1998.

<sup>4</sup> Arcadis, évaluation des familles d'aménagement, phases 1 et 2, juin 2006 ; marché complémentaire, octobre 2006.

d'aménagements envisageables, approfondit deux familles particulières d'aménagements (solution littorale et solution par Les Hauts) ; c'est en grande partie sur cette étude que se sont fondées les décisions prises en août 2006, entérinées par le protocole du 19 janvier 2007.

À ces études s'ajoutent de nombreuses expertises, globales ou ponctuelles, conduites par le Conseil Général des Ponts et Chaussées et les services techniques centraux du ministère (CETu, Sétra, CETMEF).

Plutôt que de récapituler dans une bibliographie la longue liste de ces documents, le choix a été fait par le comité d'y faire référence dans les paragraphes relatifs aux sujets qu'ils traitent.

Il faut enfin souligner qu'aucune étude précise n'avait à ce jour été effectuée sur les problèmes liés aux tsunamis d'une part, et à l'élévation du niveau de la mer sous l'effet du réchauffement climatique d'autre part. L'obligation de les prendre en compte a conduit le comité à se rapprocher des organismes les mieux à même de lui apporter des informations à ce sujet (Délégation aux Risques Majeurs, Météo France et Commissariat à l'Energie Atomique) mais il faut dès maintenant souligner que, dans ce domaine, on est très loin de pouvoir disposer d'un véritable corps de doctrine concernant le choix de véritables « données de projet ».

## **4. Risques passés et actuels liés à la falaise**

### **4.1. Chutes de pierre**

La masse des pierres tombant de la falaise peut être estimée à 10 000 tonnes par an, mais seule une faible proportion de ces chutes atteint la route actuelle.

Le tonnage des matériaux tombés effectivement sur la route a été de 150 t par an environ au cours des années 1992 à 2000. Il a été plus faible les années suivantes (20 t) en raison de conditions météorologiques plus favorables et par l'effet des mesures de protection déjà entreprises (filets, gabions).

La répartition des chutes entre les deux sens de circulation est d'environ 80 % pour la chaussée la plus exposée et de 20 % pour l'autre chaussée.

Les statistiques ont démontré que le risque de chutes est plus important en cas de pluie, ce qui a conduit, à partir de 1996, à mettre en oeuvre une exploitation en mode dit basculé (fermeture de la chaussée la plus exposée) dès que la pluviométrie cumulée sur 24 heures dépasse 15 mm, avec une prolongation de 48 ou 72 heures selon l'intensité observée. Cette procédure, mise en oeuvre en moyenne 60 jours par an, a démontré son efficacité ; on observe, en dehors de ces périodes, environ une chute tous les 6 jours, et ce de manière aléatoire.

L'analyse de la répartition spatiale des chutes a permis d'identifier les secteurs les plus exposés, à savoir :

- de Saint-Denis au PR 3+500 (secteur en grande partie déjà protégé par des filets),
- du PR 3+500 à 5+600,

- du PR 5+900 à 6+100 (Pointe du Gouffre),
- du PR 7+800 à 8+200,
- du PR 9+000 à 10+100,
- du PR 10+500 à 11+300 (pointe de la Ravine à Malheur),
- du PR 12+300 à 12+900.

En certains points, la fréquence des chutes peut atteindre, sur la chaussée la plus exposée, 20 à 45 fois la valeur moyenne, notamment à proximité des caps. Cette disparité a permis de définir des priorités pour la pose des protections par filets entreprise en 2006 (voir plus loin).

#### 4.2. Eboulements en grande masse et chutes de blocs importants

Le tableau suivant répertorie les principaux événements constatés depuis la construction de la route.

Date	PR	Volume	Circonstances	Nombre de victimes
Mars 1961	2+900 3+150	à 200 000 m <sup>3</sup>	Ecaille de grande extension, éboulée suite à des travaux d'élargissement du tunnel du CFR	
21/10/1965	7+800	800 m <sup>3</sup>	Pan de falaise en partie haute	
21/11/1972	2+100	250 m <sup>3</sup>		
15/12/1979	10+600 à 900	200 + 300 m <sup>3</sup>		
03/02/1980	5+100	5 000 m <sup>3</sup>	Coulée boueuse (cyclone Hyacinthe)	
22/06/1980	2+000	34 500 m <sup>3</sup> (évaluation L Rochet)	Ecaille (suite probable de Hyacinthe)	3 morts
13/02/1987	3+800	5 000 m <sup>3</sup>	Coulée boueuse due à la tempête tropicale Clotilda	
16/04/1988	3+000	500 m <sup>3</sup> (?)	Ecaille sub-parallèle à la paroi	
31/05/1993	2+800	2 000 m <sup>3</sup>	Pan de falaise en partie haute	
20/12/1993	5+300	20 m <sup>3</sup>	Tempête Cecilia	
16/01/1995		1 bloc	Conséquence d'une trombe d'eau	1 mort
01/01/1996	8+200	Blocs (dont un > 20 t)	Déchaussement d'une coulée en partie haute	
03/02/1996	4+500	75 m <sup>3</sup>	Blocs de l'unité supérieure	
22/02/1996	11+000	2 blocs		
Mai 1996	10+000	300 m <sup>3</sup>	Purge provoquée après mouvements constatés	
Juin 1996	9+850		Ecaille en partie basse	
17/02/1997	4+100	Plusieurs blocs de 1 t	Blocs en surplomb	1 mort
Janvier 2002	7+850 5+50	60 t Eboulement	Cyclone Dina	

Date	PR	Volume	Circonstances	Nombre de victimes
	PR 8 et plus	Nombreux blocs > 1 t		
10/04/2003	2+000	700 m <sup>3</sup>	Eboulement contenu par les filets pendus	
20/02/2006	10+900	Blocs env. 180 kg	Episode très pluvieux, chute intervenue à la remise en circulation	1 mort
20/02/2006	10+900	blocs	Episode très pluvieux	1 mort
24/03/2006	11+900	30 000 m <sup>3</sup>	Ecaille sub-parallèle à la falaise	2 morts
15/10/2006	3+700	Bloc env. 40 kg		1 mort

Il n'a donc jamais été relevé d'éboulements de plus de 50 000 m<sup>3</sup> dus à des causes purement naturelles, l'événement de 1961 ayant des causes anthropiques. On ne peut d'autre part déceler en mer aucune trace d'éboulements de très grande ampleur ; si de tels éboulements se sont produits, cela n'a pu être que dans un passé suffisamment ancien pour que la mer en ait effacé toute trace.

#### 4.3. Accidents corporels engendrés par les chutes de pierres et éboulements

L'analyse faite en 1996 par Louis Moissonier<sup>5</sup> montre que, sur la période 1976-1995, les chutes de pierre et éboulements de falaise n'ont été en moyenne responsables que de 10 % des accidents survenus sur la RN1 entre Saint-Denis et La Possession, mais 13 tués et 16 blessés graves ont été recensés sur cette période comme résultant de chutes par impact direct ou par percussion de véhicules sur des blocs tombés sur la chaussée. Depuis cette date, les accidents mortels répertoriés sont les suivants :

- 16/01/1995 PR 12+400 : 1 tué
- 04/01/1996 PR 5+150 : 1 tué et un blessé grave
- 17/02/1997 PR 4+ 00 : 1 tué
- 26/04/1997 PR 7+900 : 1 tué
- 02/10/2004 PR 5+150 : 1 tué et un blessé grave
- 20/02/2006 PR 10+900 : 1 tué et un blessé grave
- 12/03/2006 PR 7+900 : 2 blessés graves
- 24 /03/2006 PR 11+900 : 2 tués et un blessé grave
- 15/10/2006 PR3+700 : 1 tué

On peut remarquer que parmi toutes ces victimes, celles qui ne figurent pas sur le tableau de la page 14, sont celles qui ont été tuées par des chutes de blocs de petite taille (le tableau ne concerne en effet que les éboulements et les chutes de blocs importants).

Ces données font comprendre qu'en dehors de l'année 2004 où s'est produit un accident mortel, les années 1998 à 2005 n'ont pas donné lieu à des événements dramatiques, alors qu'il y a eu en 2006 une recrudescence des accidents qui a fait renaître un fort sentiment d'insécurité et rendu inacceptable, pour la population, la situation actuelle.

<sup>5</sup> Mission d'expertise sur la route du littoral à La Réunion, L. Moissonier, J-L. Durville, J. Péjoan, P. Masure, septembre 1996, affaire 96-045 du CGPC.

## 5. Projet de sécurisation en cours de réalisation

Pour réduire les risques afférents à la chute de blocs rocheux, plusieurs mesures ont été mises en oeuvre depuis la mise en service de la route. Outre l'exploitation en mode basculé côté mer utilisé en mode 1+1, puis 2+1 (avec un séparateur mobile), introduite en 1999, des protections par filets ont été mises en place dès 1986 au voisinage de la pointe du Gouffre (PR 5+900 à 6+100), puis, de 1992 à 2002, entre les PR 1 et 3+500. Ces protections ont été complétées par l'installation de gabions sur certaines parties de l'itinéraire.

Ces dispositifs ont été très efficaces puisque, par la suite, il n'y a pas eu de chutes constatées avec impact sur la circulation dans les zones ainsi protégées.

Afin de réduire encore les risques ainsi que les inconvénients de l'exploitation en mode basculé, la DDE a présenté, en 2004, un projet de sécurisation complémentaire élaboré par le CETE Méditerranée. Ce projet comprend la pose de filets et de déflecteurs dans certains secteurs non protégés de la falaise, un rehaussement des gabions à 4 mètres de hauteur, et leur généralisation sur une grande partie de l'itinéraire.

Ce projet a été approuvé par une décision ministérielle en date du 30 avril 2004, après la production par le CGPC d'un rapport d'évaluation du projet du point de vue de la sécurité apportée, des risques résiduels, et du rapport coût-avantage<sup>6</sup>.

Le projet de pose de filets comprend la sécurisation des secteurs suivants :

- Zone 1 : PR 3+500 à 5+200 et PR 5+500 à 5+600
- Zone 2 : PR 7+800 à 8+200 et PR 9+000 à 10+100
- Zone 3 : PR 10+500 à 11+300 et PR 12+300 à 12+900, ainsi que la zone de la pointe de la Ravine à Malheur comprise entre les PR 11+600 et 11+700

Les ouvrages de protection sont des filets plaqués ou pendus, et des écrans déflecteurs.

Le renforcement des murs en gabions est prévu, avec une hauteur courante de 4 m sur l'ensemble de l'itinéraire, à l'exception de la section comprise entre les PR 12+470 et 12+780 où une hauteur de 3 m a été considérée comme suffisante ; il a été admis que cette hauteur pouvait être optimisée en phase « projet ».

Le projet a été conçu pour contenir des masses de rocher de 50 tonnes fractionnables en éléments indépendants constitués d'un bloc de 5 tonnes et d'éléments complémentaires dont la granulométrie suit une distribution type <sup>7</sup>.

Par le fait même que le projet ne traite que certains secteurs, et qu'il a été dimensionné pour le scénario de référence rappelé ci-dessus, il n'apporte qu'une sécurisation partielle, même si les avantages à en retirer ont été jugés suffisants pour justifier un investissement coûteux à caractère transitoire (dans l'attente d'une nouvelle route entièrement sécurisée).

---

<sup>6</sup> Dispositions transitoires pour la sécurisation de la route du littoral, C. Binet et M. Rat, mars 2004, affaire 2003-0166-01 du CGPC.

<sup>7</sup> Définition de l'éboulement de référence pour les mesures provisoires, CETE d'Aix, décembre 2003, dossier 18359.02.

Ainsi, même si des filets pendus ont pu canaliser un volume de 700 m<sup>3</sup> tombé le 10 avril 2003 au PR 2, c'est probablement l'extrême limite de leurs possibilités car les filets ont été détériorés par allongement plastique et ont dû être remplacés.

La pose des filets est en cours et devrait être terminée à la fin de l'année 2007. Quant aux travaux de renforcement des gabions, leur échéance est prévue pour mai 2008.

Même si le projet a été mis en oeuvre conformément à la décision initiale, il est possible que certaines modifications aient été décidées en cours de chantier pour tenir compte des constatations plus précises faites sur le terrain pendant les travaux. Certains ajustements pourront aussi se révéler nécessaires après une phase suffisante d'observation de l'efficacité du dispositif.

L'opportunité de prendre ou non en compte ces protections dans la détermination de la polygonale sera examinée au paragraphe 9 : soulignons ici qu'elles seront en tout cas utiles pour la phase de travaux de la nouvelle route.

## 6. La géologie du site

La falaise littorale, haute de 100 à 200 m, recoupe le flanc nord-ouest du massif volcanique du Piton des Neiges. Façonnée par le déferlement des vagues, elle est interrompue par deux grandes ravines (Grande Chaloupe et Ravine à Jacques) et par plusieurs plus petites ravines qui sont restées suspendues.

Bien qu'elle n'ait pas fait l'objet d'une étude lithologique, structurale et hydrogéologique très détaillée, la falaise est quand même bien connue par les études géologiques du BRGM<sup>8</sup> et par l'étude de photo-interprétation du CETE de Lyon<sup>9</sup>.

La falaise est constituée d'un empilement de coulées basaltiques et de niveaux moins résistants, résultant de l'histoire volcanique de l'édifice, qui peut être résumée comme suit :

- première phase éruptive : unité inférieure (âge d'environ 2 millions d'années) constituée de coulées basaltiques et de lits de scories ;
- phase intermédiaire, avec une forte érosion et altération des reliefs (donnant naissance notamment à des paléoreliefs et paléosols), des dépôts de versants et d'alluvions, et quelques coulées;
- seconde phase éruptive : unité supérieure (âge d'environ 1 Ma), formée de coulées basaltiques souvent massives et de scories recouvrant les formations précédentes.

Le basalte est une roche compacte et résistante mais fracturée lors du retrait lié au refroidissement de la lave. Les scories sont des agglomérats cimentés, poreux mais avec une assez bonne cohésion. Les paléosols sont des matériaux plus fins, très érodables.

Conformément au sens d'écoulement des laves, les coulées sont de façon générale légèrement inclinées vers la mer, comme en témoigne la pente superficielle de la planèze, mais localement des pendages plus forts peuvent se rencontrer, en liaison avec la morphologie

---

<sup>8</sup> Synthèse géologique, bilan des connaissances, BRGM, 1998

<sup>9</sup> Etude morphologique, structurale et hydrogéologique, P. Potherat et M. Chahine, CETE de Lyon, 2005.

issue de la phase intermédiaire. L'épaisseur des coulées peut être très variable d'un endroit à l'autre, en fonction notamment de la pente du relief sur lequel s'épanche la lave.

Du point de vue structural, les dykes (filons basaltiques sub-verticaux mis en place postérieurement aux coulées) constituent un élément majeur, recoupant verticalement la falaise; dirigés en grande majorité radialement à partir des centres émissifs, ils sont le plus souvent quasi-perpendiculaires au front de falaise. Leur influence mécanique et hydrogéologique est certaine, mais complexe. Des fractures de décompression, parfois ouvertes, sont visibles au voisinage du rebord de la falaise.

Au cours du quaternaire récent, le niveau marin a largement varié : plus bas d'une bonne centaine de mètres il y a 20 000 ans (Würm), le niveau a subi une remontée rapide et, après quelques fluctuations, s'est sensiblement stabilisé au niveau actuel il y a 4 000 ou 5 000 ans.

Sur le plan hydrogéologique, la nappe de base, au voisinage de la côte, est supposée voisine du niveau de la mer. Une nappe peut exister à la base de l'unité intermédiaire (suintements visibles) et des nappes perchées se former à différents niveaux lors des fortes précipitations, qui donnent lieu à des venues d'eau temporaires très puissantes. Vers l'intérieur du massif, la nappe de base s'élève progressivement, mais ses niveaux, variables en fonction des saisons, ne sont pas connus.

## **7. Les mécanismes d'évolution de la falaise**

Depuis des milliers d'années, la falaise a reculé sous les attaques de l'océan, qui érode le pied de la paroi et favorise ainsi les instabilités, en maintenant une paroi quasi-verticale; la mer déblaie ensuite les matériaux éboulés.

Une estimation très grossière, à partir de la fréquence et du volume des éboulements observés ces dernières années, donne un recul moyen de 10 à 20 mètres en 1 000 ans. Compte tenu des aménagements routiers, depuis une cinquantaine d'années, la falaise n'est plus soumise à l'érosion marine, mais elle avait à l'époque fait l'objet d'abattages importants.

Le recul s'effectue selon trois principaux mécanismes décrits ci-après.

### **7.1. Les chutes de blocs**

Les chutes de blocs, totalisant quelques dizaines ou centaines de mètres cubes, sont très fréquentes : l'alternance de coulées basaltiques fracturées et de lits plus érodables et plus déformables constitue une configuration particulièrement propice à ces chutes. Si les chutes surviennent en grand nombre lors des fortes pluies, les études statistiques<sup>10</sup> montrent que des chutes sporadiques se produisent aussi en toute saison.

La trajectoire des blocs, en fonction de l'altitude du point de départ et de l'existence de vires formant tremplin, peut les mener directement sur la route actuelle, voire en mer.

---

<sup>10</sup> Dispositions transitoires pour la sécurisation de la route du littoral, Ch. Binet et M. Rat, 2004.

Les études statistiques montrent aussi une relation inverse entre fréquence et volume, mais il faut se garder de l'extrapoler au-delà des volumes mentionnés plus haut car le mécanisme des éboulements en masse est très différent.

## **7.2. Les chutes d'écaïlles**

C'est le type de rupture en masse le plus fréquemment observé dans les parois volcaniques de l'île : coalescence de fractures sub-verticales dans les coulées basaltiques, ouvertes par décompression, et de ruptures dans les scories et couches meubles, pour former une surface de décollement quasi-verticale, parallèle à la paroi, avec rupture de pied.

Les volumes concernés vont de quelques centaines de mètres cubes à plusieurs dizaines de milliers de mètres cubes. On observe typiquement, comme cela sera précisé au chapitre 9, une épaisseur de l'écaïlle voisine du dixième de sa hauteur<sup>11</sup>. On note toutefois que l'éboulement de 1980, méticuleusement étudié par Rochet et Rochet Consultants<sup>12</sup>, a mobilisé une écaïlle d'une centaine de mètres de haut et de 5,5 m d'épaisseur moyenne. La largeur des écaïlles mobilisées apparaît, sur les cas bien documentés, comme inférieure à sa hauteur.

## **7.3. Les éboulements de grande ampleur**

La question de la possibilité d'instabilités d'ampleur significativement plus grande, plusieurs centaines de milliers de mètres cubes par exemple, a été posée dès les années 1990.

Les phénomènes de cette ampleur connus dans l'île sont très rares. Le document du BRGM<sup>13</sup> consacré à cette question signale en particulier un éboulement de plus de dix millions de mètres cubes en 1965, ayant affecté une autre falaise à La Réunion constituée de coulées à pendage défavorable, de 1000 m de hauteur, donc bien plus haute que celle de la RN1. La largeur de la gigantesque « écaïlle » éboulée était de 700 m et son épaisseur au sommet devait être d'une cinquantaine de mètres (soit moins que H/10).

Sur la RN1, on ne connaît pas d'événement dépassant la quarantaine de milliers de mètres cubes, hormis l'éboulement de 1961 dont l'origine est en partie anthropique ; la question d'une déstabilisation analogue au voisinage immédiat de ce secteur, favorisée par la proximité du tunnel CFR, a été soulevée<sup>14</sup>, d'autant que des indices de forte contrainte apparaissent localement dans la galerie et les fenêtres ; il ne semble pas toutefois que cette situation soit évolutive.

Le rapport du BRGM conclut à une probabilité très faible d'occurrence d'éboulements de grande ampleur sur la falaise littorale.

La déstabilisation de volumes très importants ne peut intervenir que s'il existe des plans de discontinuités de grande extension et à fort pendage vers la mer (glissement plan, glissement de dièdre). Cette configuration n'apparaît que très ponctuellement et les volumes ainsi délimités ne semblent pas dépasser sensiblement ceux liés aux ruptures d'écaïlles.

---

<sup>11</sup> Analyse des aléas d'éboulements en masse de la falaise de la RN1, données disponibles, zonage et évaluation des tracés, J.P. Magnan et P. Pothérat, 2006.

<sup>12</sup> Etude de la limite des éboulements en masse, rapport de synthèse, Rochet et Rochet consultants, 2004.

<sup>13</sup> Evaluation de la possibilité de phénomènes d'instabilité de grande ampleur, B. Feuga, BRGM, 1999.

<sup>14</sup> Rapport BRGM cité à la note précédente et Rapport de la commission Suter.

A l'ouest de La Grande Chaloupe, vers le PR 9, l'attention du comité a été attirée sur la possibilité de présence de plans inclinés défavorables, à la suite des observations de Feuga (1999) et de Pothérat et Chahine (2005). Le comité a demandé aux géologues du CETE-Méditerranée une expertise spécifique (examen des photos, observations en falaise, levé structural); il en résulte que les pendages des coulées ne sont pas spécifiquement défavorables et que les volumes mobilisables lors d'un éboulement sont analogues à ceux des secteurs avoisinants<sup>15 16</sup>.

#### **7.4. Les coulées de boue et de débris**

Au moment des pluies cycloniques, les ravines ont un débit très fort, avec composante solide importante. Une véritable coulée de boue, de plusieurs milliers de mètres cubes, est descendue sur la RN1 lors du cyclone Clotilda en 1987.

Ce type de phénomène, peu fréquent puisqu'un seul cas a été observé depuis la construction de la route, peut se reproduire dans une quelconque des ravines ayant un bassin d'alimentation important.

#### **7.5. En résumé**

Les phénomènes d'instabilité que le comité a considérés pour la position de la polygonale sont les chutes de blocs et les chutes d'écaillés, principaux modes d'évolution des parois rocheuses de l'île. La commission a exclu les éboulements de grande ampleur, aucun événement de ce type n'étant en effet relaté historiquement, et en l'absence de structures géologiques identifiées qui pourraient les favoriser.

Les coulées de débris sont d'autre part considérées comme non dimensionnantes.

### **8. Le risque sismique**

L'île de La Réunion subit des secousses sismiques modérées qui sont liées à l'activité volcanique.

D'après l'arrêté du 15 septembre 1995 relatif à la classification et aux règles de construction parasismique applicables aux ponts à risque normal, un viaduc sur la RN1 serait à ranger dans la classe C, voire D si l'on estime que l'ouvrage est essentiel pour les besoins de la sécurité civile ou de la défense nationale. Dans le zonage sismique en vigueur (datant de 1991), l'ensemble de l'île de La Réunion est classé en zone de sismicité 0, ce qui signifie que l'on n'est pas tenu à une vérification parasismique.

On peut penser qu'une digue serait à classer de la même façon et donc n'aurait pas à être formellement justifiée vis-à-vis d'une sollicitation sismique.

---

<sup>15</sup> Power point du CETE d'Aix sur la zone des plans inclinés.

<sup>16</sup> Conclusions de l'étude détaillée de la falaise à l'ouest de la ravine de La Grande Chaloupe, contribution de J.P. Magnan, 21 février 2007.

Un nouveau zonage national, préparé sous la responsabilité du GEPP<sup>17</sup>, a été publié par le Ministère de l'écologie et du développement durable en 2006, mais n'est pas officialisé. Il fait suite à des travaux menés depuis une quinzaine d'années, comprenant notamment des investigations sur la sismicité historique et instrumentale, et a été élaboré selon une approche probabiliste.

Selon ce projet de zonage, l'île de La Réunion serait en zone Z1b, dite de sismicité faible (et non en zone Z1a, de sismicité très faible). Le fichier national SIRENE de sismicité historique (établi par BRGM, CEA, EDF) mentionne sur l'île neuf séismes historiques d'intensité<sup>18</sup> épiscopale supérieure ou égale à V sur l'échelle MSK; le plus fort, survenu en 1751, assez mal connu, aurait atteint l'intensité VI-VII.

Dans ces conditions, le comité recommande que les ouvrages d'art et les digues du projet soient vérifiés au séisme, en utilisant les eurocodes (EC 8) et l'accélération de pic au rocher donnée pour la zone Z1b de sismicité faible, soit  $0,7 \text{ m/s}^2$ , à laquelle on appliquera un coefficient d'importance selon la classe d'ouvrage choisie. Ce coefficient d'importance doit être fixé par la puissance publique.

Une secousse sismique d'intensité VI au niveau de la falaise littorale sera probablement le déclencheur de nombreuses chutes de blocs, voire de chutes d'écaillles qui, en tout état de cause, sont proches de la rupture. Les mécanismes et les volumes correspondants ne seraient guère différents de ceux évoqués au chapitre précédent.

## 9. Détermination de la polygonale

Compte tenu des mécanismes d'évolution de la falaise identifiés au paragraphe 7, la polygonale sera définie en fonction de deux types de risques :

- les chutes de blocs ;
- les éboulements en écaillles de la falaise.

Il était nécessaire, pour la déterminer, de considérer un profil type de la digue. Le profil suivant a été adopté :

- Surface de la chaussée à 9 m au moins au dessus du fond de la fosse à cailloux. Comme on le verra, cette différence de hauteur est un minimum pour protéger la chaussée contre le rebond des blocs. Les études en canal à houle permettront de fixer définitivement l'altimétrie de la digue ainsi que la géométrie de sa face maritime, ainsi qu'il sera précisé au chapitre 10.
- Cote du fond de la fosse fixée, dans un souci d'économie de matériaux, à la valeur minimale nécessaire pour éviter toute accumulation d'eau dans la fosse, avec un modèle assurant les écoulements nécessaires.

---

<sup>17</sup> Groupe d'étude et de propositions pour la prévention du risque sismique, présidé à l'époque par M. Quatre, IGPC, et maintenant par J-L. Durville.

<sup>18</sup> L'intensité sismique est une échelle empirique graduant le potentiel destructeur en un lieu donné. Elle décroît plus ou moins régulièrement à partir de l'épicentre. L'échelle MSK, qui comporte 12 degrés, de I à XII est utilisée couramment. Par exemple, le degré VI peut être sommairement défini comme suit : frayeur générale, fissuration de murs et de cheminées, chute de tuiles.

- Parement du talus côté falaise incliné à 70 degrés sur l'horizontale, valeur prise en compte dans les études trajectographiques pour éviter des rebonds de blocs vers la chaussée.  
Compte tenu des contraintes de réalisation résultant d'un tel choix, cette pente pourra être diminuée dans les zones où la position de la digue n'est pas conditionnée par les chutes de blocs.
- Terrassements en pied de la falaise limités, pour ne pas contribuer involontairement à la déstabiliser.

Les dispositions suivantes ont d'autre part été prises en compte en ce qui concerne la définition de la polygonale :

- compte tenu de la nécessité de maintenir la route actuelle en service pendant la construction de la route nouvelle, la polygonale n'a de sens, et ne sera donc définie, que si elle se situe au delà du mur en Terre Armée ;
- il a été convenu de la définir comme la position, côté falaise, du pied du talus de la digue (intersection du talus de la digue avec le fond de la fosse).

Ainsi qu'on le verra, trois polygonales particulières ont été définies, une pour les chutes de blocs et deux pour les éboulements. La « polygonale de projet », au sens de la lettre de commande, sera l'enveloppe de ces trois polygonales particulières.

### **9.1. Polygonale correspondant aux chutes de blocs**

Un préalable important était de décider s'il fallait prendre en compte, dans la détermination de la polygonale relative aux chutes de blocs, la présence de filets de protection sur une partie de la falaise.

Le comité a décidé de ne pas en tenir compte, ceci pour les raisons suivantes :

- certaines zones ne sont pas équipées ;
- pour celles qui le sont, la protection disparaît en cas d'éboulement en masse entraînant le filet ;
- l'efficacité des filets s'estompera sur le long terme du fait de la corrosion et des impacts de blocs (sauf à assurer un entretien régulier).

#### *La méthode utilisée*

La propagation des blocs a été étudiée par le CETE d'Aix en utilisant le logiciel 2D PROPAG mis au point dans les années 1980 par le CETE de Lyon et couramment utilisé par le réseau technique de l'Équipement.

Pour calculer les distances de propagation, il faut introduire un certain nombre de données et notamment les suivantes : un relevé topographique très précis car les petits reliefs (vires en particulier) jouent un rôle essentiel; les points de départ des blocs; leur élanement; les caractéristiques du terrain (rocher sain, altéré, éboulis compact, meuble, terrain naturel, liquide).

Le logiciel donne la position des points d'impact des blocs ainsi que la hauteur des rebonds.

On note une très bonne concordance entre les résultats de la simulation et la position des impacts réels relevés par la DDE, ce qui montre la pertinence de la méthode.

### *Les études réalisées*

1997 – 1998 : 322 profils étudiés avec 3 ou 4 zones de départ et, pour chaque bloc, des élançements de 1,2 – 1,3 et 1,5. Ces profils concernent l'ensemble de la falaise (de St-Denis à La Possession).

2004 : 217 nouveaux profils ont été étudiés dans le cadre de la sécurisation de la route actuelle, de La Grande Ravine à La Possession.

### *Résultats*

Outre la position de la polygonale, figurée en annexe, les calculs donnent la hauteur du premier rebond dans la fosse, qui ne dépasse pas 9 m. Comme on l'a vu, c'est cette valeur qui a été retenue comme hauteur minimale de la digue au dessus du fond de la fosse.

Le comité constate enfin que le logiciel ne prend pas en compte l'éventualité de l'éclatement d'un bloc tombant sur un autre bloc, qui donne naissance à des fragments plus petits pouvant être projetés à grande distance. Il recommande donc la mise en place d'une protection supplémentaire au sommet de la digue, dont le choix doit tenir compte par ailleurs des impératifs de sécurité routière et d'insertion dans l'environnement et dont la hauteur pourrait raisonnablement être de l'ordre de 2 m (GBA rehaussée, gabions etc..).

## **9.2. Polygonales liée aux éboulements**

Ainsi qu'il a été indiqué précédemment, le comité n'a retenu comme événements possibles que le cas des éboulements « en écaille ».

Deux approches ont été examinées : celle du bureau Rochet & Rochet Consultants (R&R) qui prend en compte la dynamique de l'éboulement et celle de Jean-Pierre Magnan, suggérée par Marc Cruchet, basée sur la géométrie des éboulements observés sur l'île.

Pour définir les polygonales relatives à l'une et l'autre approche, le comité a retenu les règles suivantes :

- L'éboulis ne doit pas dépasser la mi-hauteur de la « digue de référence » de 9 m, soit 4,5 m au dessus du fond de la fosse ; cette disposition permet de conserver une protection contre les chutes de blocs survenant après l'éboulement et ménage une réserve de « capacité d'accueil » du même ordre de grandeur que le volume de l'éboulement initial.

Il faut remarquer que cette réserve de capacité est accrue si, pour une cote du sommet de la digue déterminée, on abaisse celle de la fosse à cailloux ou si, pour une cote de cette fosse déterminée, les essais en canal à houle conduisent à augmenter celle du sommet de la digue. Ceci peut permettre dans les deux cas, tout en maintenant la réserve de 4,5 m jusqu'au sommet de la digue, de rapprocher le pied de celle-ci du mur en Terre Armée.

- La polygonale est calée, comme il est indiqué au début de ce chapitre, sur le pied du talus, intersection du talus avec le fond du piège à cailloux (elle est donc plus proche de la falaise que le point extrême atteint par l'éboulis).

### **9.2.1. Approche R&R**

R&R a utilisé pour son étude le logiciel EBMAS qu'il a mis au point.

Ce logiciel prend en compte l'interaction entre les éléments en mouvement au sein de l'éboulement. Il s'agit d'un modèle incrémental, chaque incrément de volume conduisant à l'étalement d'une nouvelle strate de matériau sur les précédentes. Il y a donc actualisation continue de la topographie au cours du processus de calcul.

Le modèle EBMAS est tridimensionnel mais compte tenu du grand nombre de profils à étudier, seule une étude 2D était envisageable. Il a donc été nécessaire, en se basant sur l'éboulement de juin 1980, de mettre au point une méthode de transposition 3D/2D permettant de tenir compte, dans les simulations 2D, de l'effet d'étalement latéral des matériaux éboulés.

Les autres données de calage ont également été déduites de l'éboulement de juin 1980, qui se caractérise par un volume éboulé de 34 500 m<sup>3</sup>, une hauteur de 114 m, un coefficient de foisonnement de 1,26 et une épaisseur moyenne de l'écaille de 5,5 m. Cette épaisseur a été utilisée pour définir les volumes à prendre en compte dans la modélisation.

Ce sont 210 profils qui ont été modélisés par R&R entre les PR 4,8 et 12,8, avec différentes hypothèses de répliques et de position de la digue.

### **9.2.2. Approche Magnan**

Il s'agit d'une méthode géométrique qui consiste à dimensionner la fosse pour que le volume foisonné de l'éboulement ne la remplisse que jusqu'à mi-hauteur du talus de la digue.

Les observations faites par M. Cruchet sur les éboulements sur l'île de La Réunion montrent que, de façon générale, l'épaisseur des panneaux éboulés est de l'ordre du 1/10 de la hauteur des falaises. L'application de cette règle aux différentes sections de la falaise permet de déterminer, pour chacune d'elles, les volumes susceptibles de s'ébouler.

Les deux autres données nécessaires pour caler la polygonale ont été déterminées à partir de l'observation de l'éboulement de mars 2006 : le coefficient de foisonnement, choisi égal à 1,3 (compte tenu de la présence de gros blocs en surface et des données topographiques utilisées, il faut considérer cette valeur comme une estimation, probablement un peu forte, à comparer avec la valeur de 1,26 calculée par R&R) ; la pente d'équilibre de l'éboulis, fixée à 26 degrés.

## **9.3. Tracé de la polygonale de la solution de base**

La section sur digue de la solution de base, seule concernée par la polygonale, va de La Grande Ravine à l'extrémité Ouest du projet.

Dans le souci que soit garanti un très haut niveau de sécurité, le comité a décidé de retenir comme « polygonale de projet », au sens de la commande qui lui a été faite, l'enveloppe extérieure (c'est à dire côté mer) des trois polygonales particulières : chutes de blocs, approches R&R et Magnan.

La polygonale de projet et les polygonales particulières sont représentées sur les plans en annexe, les distances qui figurent en ordonnées sur ces plans étant prises par rapport au parement du mur en Terre Armée (représenté par la ligne horizontale d'ordonnée zéro).

Les distances entre la polygonale de projet et le parement du mur en Terre Armée sont d'autre part récapitulées dans le tableau qui suit.

PR (km)	D (m)	P
5	0	
5,1	17	R
5,2	21	R
5,3	26	R
5,4	6	B
5,5	23	R
5,6	12	R
5,7	0	
5,8	0	
5,9	6	M
6	14	R
6,1	0	
6,2	0	
6,3	10	R
6,4	0	
6,5	7	R
6,6	0	
6,7	14	R
6,8	0	
6,9	15	R
7	26	B
7,1	8	B/R
7,2	20	R
7,3	11	R
7,4	0	
7,5	0	

PR (km)	D (m)	P
7,6	0	
7,7	0	
7,8	20	B
7,9	4	B
8	3	B
8,1	5	B
8,20	0	
8,3	0	
8,4	0	
8,5	0	
8,6	0	
8,7	0	
8,8	0	
8,9	0	
9	13	B/R
9,1	12	R
9,2	31	B
9,3	22	R
9,4	35	R
9,5	19	M/R
9,6	3	R
9,7	5	B
9,8	9	B/R
9,9	3	B
10	11	B
10,1	5	B

PR (km)	D (m)	P
10,2	2	B
10,3	19	B
10,4	0	
10,5	14	R
10,6	32	B
10,7	21	B
10,8	39	B
10,9	18	R
11	11	B/R
11,1	0	
11,2	2	R
11,3	0	
11,4	0	
11,5	0	
11,6	6	B
11,7	0	
11,8	0	
11,9	10	B
12	12	R
12,1	5	5
12,2	0	
12,3	8	B/R
12,4	16	R
12,5	3	B/R
12,6	0	
12,7	0	

*Distance de la polygonale de projet au parement du mur en Terre Armée*

*Avec :*

*D pour la distance de la « polygonale de projet » au parement du mur en Terre Armée.*

*P pour la polygonale dimensionnante ; B (chute de blocs) ; M (approche Magan) ; R (approche R&R).*

On peut faire au sujet des positions respectives des différentes polygonales les commentaires suivants :

- La polygonale de projet s'éloigne au maximum de 39 m du parement du mur en Terre Armée, au niveau du PR 10,8.
- Entre La Grande Ravine et La Grande Chaloupe, elle est déterminée par la modélisation R&R, sauf au niveau des PR 7 et 7,8 où les chutes de blocs sont plus pénalisantes. A La Pointe du Gouffre, elle se situe à 14 m du mur en Terre Armée.

- Entre La Grande Chaloupe et La Possession, les chutes de blocs déterminent la position de la polygonale de projet, sauf aux PR 9,4 et 12,4, où la modélisation R&R est la plus pénalisante.
- Il est enfin utile de préciser que, d'après les levés actuels, la cote -10 du fond de la mer est située à plus de 150 m du mur, sauf en deux points où elle est à 75 m: La Pointe du Gouffre et la pointe de La Ravine à Malheur. On constate donc que les profondeurs au niveau de la polygonale de projet ont toutes chances d'être relativement faibles.

On peut également faire le commentaire plus général suivant.

Les préconisations du comité prennent en compte les connaissances actuelles. Les études complémentaires de l'APS pourront suggérer des aménagements ponctuels de ces préconisations, tels que par exemple :

- reprofilage ou aménagement local de la falaise, abaissement du fond de la fosse ou exhaussement du sommet de la digue, toutes méthodes permettant, comme on l'a vu, de rapprocher la digue ;
- adoucissement de la pente du talus interne de la digue, aux endroits où celle-ci se situe largement au-delà de la polygonale, du côté de la mer (pour des raisons de tracé en plan).

Le comité est à la disposition du maître d'ouvrage pour lui donner, s'il le souhaite, son avis sur de tels aménagements.

#### **9.4. Section Saint-Denis – Grande Ravine**

La solution de base comporte un tunnel dans cette section, et la question de la polygonale ne s'y pose donc pas, si c'est bien cette solution qui est finalement retenue.

Elle s'y poserait par contre si, comme le suggère le comité, une alternative aérienne était étudiée dans le cadre de l'APS, parallèlement à la solution en tunnel.

En préalable à la détermination des polygonales par les méthodes précédemment définies, le comité recommande dans ce cas que soit réalisée une analyse géologique détaillée de la zone du Cap Bernard, sur le modèle de celle qui a été réalisée à l'ouest de La Grande Chaloupe dans la zone des « plans inclinés ».

On dispose dans cette section d'une part des trajectographies de blocs réalisées tous les 50 m par le CETE d'Aix, d'autre part des études d'éboulement réalisées suivant l'approche Magnan.

Les impacts résultant des trajectographies de blocs se situent à l'intérieur du tracé du parement du mur en Terre Armée, sauf en trois points (aux PR 3,8 – 4,5 - 4,8, la distance atteinte étant maximale en ce dernier point, où l'impact se situe à 29 m de ce parement).

Compte tenu de la hauteur de la falaise dans la zone du Cap Bernard, la règle du H/10 de l'approche Magnan, plutôt pessimiste dans ce cas, pourra éventuellement être adaptée, en fonction des conclusions de l'étude géologique évoquée.

Un certain nombre de profils R&R devraient d'autre part être réalisés, en tenant compte là aussi, pour la position des profils et la détermination des volumes à prendre en compte, des conclusions de l'étude géologique évoquée ci-dessus.

## **10. Les risques maritimes**

Avertissement : toutes les cotes données dans ce rapport sont en NGR (Nivellement Général de La Réunion), étant précisé que le 0 m NGR est situé +0,525 m au dessus du zéro hydro.

### **10.1. Niveaux des marées**

L'annuaire des marées donne au Port de La Pointe des Galets les niveaux de marées suivants :

- Pleine mer de Vive Eau (Coefficient 95).....+ 0,30 m NGR.
- Basse mer de Vive Eau (Coefficient 95).....- 0,32 m NGR.

En marées exceptionnelles ces cotes peuvent être dépassées. Nous considérerons, comme Sogreah dans son rapport de 1998, qu'en pleine mer de Vive Eau Exceptionnelle, le niveau peut atteindre +0,45 m NGR.

À ces niveaux liés à la marée se rajoutent des surcotes liées aux conditions météorologiques. Comme il sera précisé dans les chapitres suivants, ces surcotes peuvent être très importantes lors du passage de cyclones.

### **10.2. Conditions de houle**

Une étude complète des conditions de houle a été réalisée en 1998 par Sogreah Ingénierie (ref2). C'est la source principale de données en la matière et la référence par rapport à laquelle les propositions qui suivent se positionnent.

Elle porte sur trois types de situations :

- les houles cycloniques, qui peuvent venir d'un secteur Ouest à Est, et qui atteignent le site sans atténuation ;
- les houles australes, de très longue période, générées très au sud, qui arrivent sur le site en ayant déjà subi les effets de la réfraction, suivant une direction SW à W ;
- les houles d'alizés, de période plus courte, générées par des vents E à SE, qui arrivent réfractées sur le site, après contournement de l'île par l'Est pour le secteur ESE à SE, mais sont peu réfractées sur la partie Est de la route du littoral entre Saint-Denis et la Pointe du Gouffre lorsqu'elles sont de secteur Est.

Pour caractériser ces houles et les niveaux de mer associés, en fonction de différentes périodes de retour, les documents suivants ont été consultés par Sogreah :

- les enregistrements du niveau de la mer réalisés par le SPBA sur la période 1993-1997 au port de la Pointe des Galets ;
- les enregistrements de la houle au port Est de La Possession par -32 m NGR (SPBA),  
les instructions nautiques ;
- les revues sur les saisons cycloniques à La Réunion (Météo France) ;
- le livre « Global Waves Statistics » publié par British Maritime Technology ;

- les études réalisées pour le Barachois, le port de la Pointe des Galets, l'aéroport de Gillot.

L'analyse de ces documents a conduit à retenir les valeurs caractéristiques du tableau ci après.

<b>Temps de retour (années)</b>		<b>1</b>	<b>2</b>	<b>5</b>	<b>10</b>	<b>30</b>	<b>100</b>
Cyclones (vers -60 NGR)	Hs (m)				9	11	12,5
	Tp (s)				12	13,5	14,5
	Niveau (mNGR)				0,8	1,15	1,3
Houles australes (vers -60 NGR)	Hs (m)	3,7	4	4,7	5,2	6	6,7
	Tp (s)	15	15	15	18	20	20
	Niveau (mNGR)	0,3	0,3	0,3	0,3	0,45	0,45
Alizés (vers -32 NGR)	Hs(m)	2,3	2,5	3	3,3	3,7	
	Tp(s)	8	8	9	9	10	
	Niveau (mNGR)	0,3	0,3	0,3	0,3	0,45	

- Hs, houle significative, en mètres, est la hauteur moyenne du tiers supérieur en hauteur des vagues (la hauteur d'une houle est mesurée de crête à creux) <sup>19</sup>.
- Tp en secondes est la période de la houle;
- le niveau, en mètre, est le niveau moyen de la mer qui résulte, d'une part de la marée, d'autre part des surcotes liées aux fortes dépressions tropicales. La marée prise en compte est la pleine mer de vive eau (soit +0,30 m NGR) pour les houles de fréquences de retour de 1 à 10 ans, la pleine mer de vive eau exceptionnelle (+0,45 m NGR) pour les fréquences de retour 30 et 100 ans. La surcote décennale a été estimée à 0,50 m, celle trentennale à 0,70 m et celle centennale à 0,85 m.

A partir des caractéristiques de la houle indiquées ci-dessus pour des fonds de – 60 m NGR ou –32 m NGR, Sogreah a calculé, grâce au logiciel REPLA, les conditions de sa propagation jusqu'à la côte en tenant compte de l'effet des fonds, du déferlement et de la surélévation du niveau moyen.

### 10.2.1. Houles cycloniques

Ce sont bien entendu celles qui sont les plus agressives pour les ouvrages en mer, route sur digue aussi bien que viaduc.

Compte tenu du faible écart, de l'ordre de 10%, entre houle trentennale et centennale, Sogreah propose de retenir pour le dimensionnement des ouvrages la houle cyclonique centennale, soit une valeur de houle significative (Hs) de 12,50 m (vers –60 m NGR), pour une période de 14,5 s, et avec un niveau de la mer à +1,30 m NGR.

Il convient de souligner que la houle la plus forte liée à un cyclone peut se produire alors que ce dernier est encore très éloigné de la côte car alors le fetch (distance d'action du vent sur la mer) est bien plus important que lorsque le cyclone est proche. La croissance maximale des

<sup>19</sup> les lois de la statistiques font que la hauteur de houle maximale correspond, selon les spectres de houles, à 1,6 à 1,7 fois la hauteur significative.

houles cycloniques est réalisée là où la vitesse du vent est double de la vitesse de déplacement du cyclone. Le fetch permet ainsi à la houle de se propager tout en se développant.

Lors du passage du cyclone Gamède de 2007, une houle avec  $H_s=7,0$  m et  $H_{max}=11,7$  m a été mesurée à la Pointe du Gouffre alors que le phénomène ne s'est pas approché à moins de 200 km de l'île. Elle aurait pu être supérieure si le cyclone s'était approché à une centaine de kilomètres des côtes.

En ce qui concerne les relations entre l'intensité des cyclones et les changements climatiques, Météo France précise que, sur 30 ans, aucune évolution significative n'a été constatée dans l'Océan Indien et à La Réunion.

Il y a d'autre part un consensus des experts internationaux du GIEC (Groupe d'Experts Intergouvernementaux sur l'Evolution du Climat) sur le fait qu'une augmentation des fréquences de cyclones dans l'Océan Indien n'a pas été mise en évidence.

**En conclusion, les chiffres proposés par Sogreah pour les différentes périodes de retour paraissent appropriés et le comité propose donc de les retenir comme valeurs de projet.**

Il appartiendra aux bureaux d'études, à partir de ces éléments du large, de calculer par modélisations mathématiques les conditions de houles à la côte et devant la digue de la RN1. Ce sont ces valeurs qui pourront alimenter les modélisations physiques permettant le dimensionnement des ouvrages.

Pour améliorer la connaissance des cyclones à l'île de La Réunion, il pourra être demandé à Météo France de réaliser le même type de simulations que celles déjà effectuées pour les Antilles, à savoir, à partir d'un modèle de fabrication des vents dans un cyclone, d'alimenter un modèle de champ de vagues et obtenir ainsi les houles cycloniques au large. Une telle étude serait profitable pour tous les projets sur le littoral de La Réunion. Si ses résultats peuvent être fournis suffisamment rapidement, ils pourraient alimenter le projet de la RN1 dans sa phase ultérieure. Le délai demandé par Météo France pour une telle étude est de 6 à 12 mois.

### **10.2.2. Conditions de houles d'alizés et houles australes**

Depuis les études SOGREAH de 1998, les conditions d'agitation quotidiennes (houles d'alizés et houles australes) sur le littoral de La Réunion ont été entièrement remises à jour dans le cadre notamment des études relatives aux stations d'épuration de Sainte-Rose et de Saint-André menées en 2005/2006 pour la DAF<sup>20</sup>, grâce à une reconstitution d'états de mer effectuée par un modèle numérique sur 12 années entre 1992 et 2003 dont l'emprise est l'ensemble de la zone Maurice-Réunion.

Ce travail a permis de fournir des résultats beaucoup plus précis que l'étude de 1998 grâce à l'utilisation du logiciel Wavewatch3 développé et distribué par le NOAA (E.U.) et de mesures satellitaires pour valider la modélisation. Une attention particulière a été portée à la séparation des différents systèmes de vagues dans les états de mer à savoir les houles australes et les mers de vent d'alizés. Le transfert entre le large et la côte est ensuite effectué à l'aide d'un

---

<sup>20</sup> DAF de La Réunion, étude de l'émissaire en mer pour le rejet de la station d'épuration des eaux usées de la commune de Saint-André.

modèle numérique. Des modèles locaux peuvent ainsi en être extraits pour des zones particulières du littoral de La Réunion.

Si les houles dimensionnantes du futur ouvrage de la RN1 sont sans conteste les houles cycloniques, la connaissance au plus près de la réalité des houles australes et d'alizés sera cependant très importante pour la réalisation des ouvrages, en particulier pour les phases de chantiers de la digue, telles que notamment la mise en œuvre du noyau de digue et des sous-couches avant pose de la carapace.

**Le comité recommande en conséquence l'actualisation des données de houles australes et d'alizés dans la zone de la future RN1 dans le cadre de la suite des études de projet.**

### **10.3. Surélévation du niveau des mers**

Les experts du GIEC (Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat) ou IPCC (International Panel on Climate Change), dans leur rapport officiel de 2001, avaient estimé globalement la surélévation future du niveau des mers entre 9 et 88 cm sur un siècle.

Leur tout nouveau rapport de février 2007 précise ces projections puisque, selon les modèles et les scénarios, la fourchette de surélévation est désormais estimée, au niveau mondial, entre 18 et 59 cm sur un siècle (hors effet de rétroaction entre le cycle du carbone et le climat).

Il convient cependant de noter que les valeurs indiquées ci-dessus correspondent à des surélévations moyennes sur l'ensemble du globe et que le rapport ne fournit pas d'information sur la situation particulière de l'Océan Indien. Ceci a conduit le comité à rechercher des données sur cette zone qui ne sont, malheureusement, que rétrospectives et non pas prévisionnelles.

Pierre Gaufres, le spécialiste en la matière au CETMEF a procédé à une analyse bibliographique des publications disponibles. Il conclut que la meilleure estimation régionale est issue d'une étude de synthèse de Church et al. de 2006<sup>21</sup>. Cette étude évalue l'élévation moyenne à  $1,5 \pm 0,5$  mm/an pendant la deuxième moitié du 20<sup>ème</sup> siècle.

A l'échelle de plusieurs décennies, l'étude par le laboratoire Legos du niveau moyen de la mer met en évidence des surélévations annuelles dans la zone de La Réunion entre 0 et 2,5 mm/an.

Rappelons enfin que pour le nouveau quai du Port Est, le CETMEF avait recommandé à la DDE de relever de 50 cm la cote d'arase du quai pour tenir compte de la surélévation du niveau des mers.

**Compte tenu de ces éléments, c'est cette dernière valeur de 0,50 m, cohérente avec les données actuellement disponibles, que le comité recommande de retenir pour le projet.**

### **10.4. Prise en compte des tsunamis**

Selon le CEA, il existe dans l'Océan Indien deux zones sources de tsunamis majeurs : le long de la zone de subduction de la Sonde, qui va des îles d'Andaman au Sud de Timor, d'une part, et le long de la zone de collision de Makran, au Sud du Pakistan d'autre part.

---

<sup>21</sup> Church et al., estimates of the regional distribution of sea level rise over the 1950 to 2000 period, journal of climate 17, 2609-2625

C'est de la première qu'est parti le grand tsunami du 26 décembre 2004, au cours duquel trente cinq bateaux de pêche ont été endommagés dans les ports de Sainte-Marie, Saint-Gilles et Saint-Pierre, et qui a provoqué la rupture d'amarrage d'un cargo stationnant dans le port de commerce de la Pointe des Galets.

Le séisme qui l'a déclenché avait une magnitude de 9,3.

Deux autres tsunamis, les 28 mars 2005 et 17 juillet 2007, issus de la même zone et engendrés respectivement par des séismes de magnitude 8,5 et 7,7, n'ont par contre provoqué aucun dégât.

Les délais d'alerte à prendre en compte sont, toujours d'après le CEA, de l'ordre de 7 h à 8 h30 pour la zone de la Sonde (en fonction de la position précise de l'épicentre) et de 7 h pour la zone de Makran. Ces délais doivent permettre, lorsque les dispositifs d'alerte en cours de mise en place dans l'Océan Indien seront opérationnels, de déclencher en temps utile les mesures de sécurité civile spécifiques à la route du littoral.

Un tsunami se caractérise par une phase de retrait des eaux et par l'arrivée de vagues successives. Selon la polarité du tsunami, le retrait précède ou suit l'arrivée des vagues.

Les vagues les plus dangereuses sont au nombre de 3 à 6 et il convient de souligner que la plus importante n'est pas nécessairement la 1ère mais peut être n'importe laquelle des vagues du train d'ondes.

Le tsunami de décembre 2004 est arrivé sur l'île de La Réunion environ 7 h après le tremblement de terre. L'amplitude maximale de la vague mesurée grâce au marégraphe du Port Ouest a été estimée à 0,60 m.

Même en se basant sur le tsunami de décembre 2004, qui paraît pourtant un événement extrême, il semble donc, en l'état actuel, que la vague provoquée par un tsunami lointain (donc hors cas de l'effondrement du volcan de La Fournaise) ne soit pas dimensionnante en ce qui concerne la houle qui viendra battre la digue.

### **10.5. Bathymétrie**

La carte marine du SHOM confirme le document DDE remis aux experts quant à la pente sous-marine relativement faible et globalement uniforme entre La Possession et l'entrée de Saint-Denis avec, en particulier, la ligne de -20 m cote marine entre 500 m et 900 m au large de la route actuelle.

Une pente aussi faible des fonds doit permettre d'éloigner la future route de la falaise tout en restant dans les domaines de faisabilité de digues, soit à talus, soit mixtes (verticale au sommet d'une digue à talus). Bien évidemment, plus la nouvelle digue sera proche du rivage actuel, plus les conditions de sa réalisation seront économiques.

Le SPBA a confirmé qu'un nouveau lever des fonds était en cours sur l'ensemble de la zone. Météo France a d'autre part confirmé que le lever en cours jusqu'à 2 km au large (fonds de -80 m NGR) et les données actuelles du SHOM seront suffisantes pour d'éventuelles nouvelles modélisations des houles cycloniques.

Le SPBA a signalé qu'il ne sera pas facile de faire des comparaisons avec les leviers précédents en raison notamment d'un changement de logiciels. Sans sous-estimer les problèmes posés par les changements de logiciels voire les changements de systèmes de référencement (ellipsoïde, systèmes de projection...) le comité estime que l'enjeu du diagnostic de la stabilité ou de la variabilité des fonds est très important, et **demande instamment que soit effectuée une comparaison des leviers successifs, par toute méthode appropriée, y compris manuelle.**

### 10.6. Géotechnique

Le comité insiste sur l'urgence de la réalisation, dans le cadre des études d'APS, de la campagne de reconnaissances géotechniques dans toute la zone potentielle d'implantation de la digue en mer.

Il a été prévu de l'engager sur toute la longueur du tracé, au titre de la solution de base entre La Grande Ravine et La Possession, et au titre des variantes à explorer entre La Grande Ravine et Saint-Denis.

Elle permettra en particulier de définir les conditions de fondations de la digue et, tout particulièrement, les conditions de la butée du pied de digue, fondamentales pour sa stabilité sous fortes houles.

Les campagnes géotechniques doivent être conçues pour permettre aussi de tirer le meilleur parti de la campagne 2002 de reconnaissances par méthodes géophysiques en établissant en particulier des corrélations entre vitesses sismiques et formations géologiques. Elle devra en conséquence bien prendre en compte les conclusions du rapport FUGRO de 2002<sup>22</sup>.

### 10.7. Eléments d'environnement relatifs au projet de digue

Bien qu'ils ne fassent pas spécifiquement partie de sa mission, il paraît au comité important de souligner que les éléments essentiels suivants seront à prendre en compte (parmi de nombreux autres) :

- d'une façon générale, les inventaires faune-flore datant de 1994-1996 seront à réactualiser dans le cadre de l'étude d'impact en cours, ce qui risque de prendre un certain temps compte tenu du caractère très saisonnier de ces inventaires;
- une étude sédimentologique d'ensemble sera à mener, portant, en particulier, sur l'évaluation du transit littoral entre Saint-Denis et la Pointe des Galets ainsi que sur l'impact des ouvrages sur ce transit (avec, en particulier, les modifications de courant liées à l'ouvrage et les conditions du maintien de l'alimentation de ce transit par les apports des ravines);
- tous les impacts liés à l'ouverture de carrières avec notamment les mesures prévues de réhabilitation en fin d'exploitation des carrières;
- les impacts de la phase chantier devront être appréciés en amont dans le processus des études avec tout particulièrement l'impact sur la turbidité des eaux de l'océan et ses conséquences.

---

<sup>22</sup> Reconnaissance par méthode géophysique, Fugro, avril 2002.

## **11 – Recommandations relatives à la route sur digue**

Le Comité recommande que le CETMEF soit associé au déroulement des études et que, comme pour tout ouvrage maritime conséquent, il soit amené à donner un avis technique écrit avant la décision finale de lancement des travaux.

### **11.1. Nécessité d’essais en modèles physiques**

La présentation du CETMEF a confirmé la nécessité de modélisations physiques, qui sont effectivement prévues dans le DCE pour l’élaboration de l’APS.

Le comité rappelle l’importance des études en canal à houle (2 dimensions, houle perpendiculaire à l’ouvrage) pour vérifier notamment les profils de digues et en particulier la protection de la route face aux houles (critère de non-franchissement ou éventuellement de franchissement limité sur une route de service sans atteindre la voie publique), la stabilité de la carapace, la butée de pied de la digue. Cette étude permettra d’optimiser les profils types de la digue selon les différents secteurs et selon les types de carapaces, et, si besoin, de tester l’intérêt éventuel d’une digue mixte qui pourrait permettre de diminuer les besoins en matériaux pour le corps de digue.

Par la suite, une étude en cuve à houle (3 dimensions) sera indispensable pour apprécier le comportement de la digue (butée en particulier) sous l’attaque de houles obliques et déferlantes.

Ceci permettra aussi, comme cela est prévu dans le cahier des charges, de tester en 3D des points singuliers tels que le passage d’un cap et les ouvrages de rétablissements de ravines (avec sans doute plusieurs tronçons distincts à tester pour bénéficier d’échelles suffisantes dans les cuves à houle).

Les modèles physiques devront, bien entendu, aussi prendre en compte les débits liquides et solides en provenance des ravines qui, selon des estimations citées dans le rapport du CETMEF d’avril 2000, peuvent atteindre pour les principales entre 50 et 300 m<sup>3</sup>/seconde pour les événements centennaux. Il s’agit là d’une particularité importante de l’ouvrage à réaliser par rapport aux digues classiques.

Le lancement de ces études en modèle physique est d’autant plus urgent que les délais de construction, puis de calage de ces modèles sont relativement longs, sans parler des éventuelles non disponibilités de canal ou cuve à houle occupés par d’autres modèles en cours.

### **11.2. Éléments constitutifs de la digue**

#### **11.2.1. Carapace en blocs béton**

Il apparaît, en conclusion des premiers résultats des recherches de matériaux, qu’il sera probablement difficile de trouver en quantité suffisante, et surtout en blocométrie adéquate, les enrochements nécessaires pour la carapace de la digue. Ceci conduira donc très certainement à envisager l’utilisation de blocs en béton. Il importera, au stade APS de recenser les solutions envisageables (types de blocs en particulier) et d’en évaluer les avantages et les inconvénients.

On peut rappeler à cet égard que les études SOGREAH de 1998 préconisaient, selon les secteurs, des cubes rainurés de 1 à 15 m<sup>3</sup> (posés sur un talus à 7/5, 7 horizontal pour 5 vertical) ou des Accropode® de 2 à 14 m<sup>3</sup> (posés sur un talus à 4/3), mais d'autres solutions sont probablement envisageables.

Les observations faites sur les tétrapodes qui protègent actuellement le mur en Terre Armée conduisent le comité à recommander un suivi particulièrement attentif de la formulation puis de la fabrication des bétons et de leur mise en œuvre pour éviter toute dégradation des blocs, et ce d'autant plus que dans certains secteurs les blocs de carapace seront soumis à l'abrasion et au choc des galets entraînés par la houle.

### 11.2.2. Corps de digue et couches filtres

Les études SOGREAH préconisent des couches filtres en enrochements de 3 à 5 t et de 0,5 à 1 t tout en soulignant l'attention particulière qui sera à apporter à l'angularité des enrochements pour garantir un bon accrochage des couches filtres. En cas de défaut de disponibilité de blocs naturels en taille et quantité suffisantes, elles suggèrent de réaliser les couches filtre soit en blocs de béton, soit en béton éclaté.

Il faut aussi préciser que dans son rapport de 1998, SOGREAH a souligné que l'intensité des houles annuelles australes (Hs = 3,70 m pour la fréquence annuelle) et d'alizés (Hs = 2,30 m) ne permettrait certainement pas à la seule couche filtre d'assurer la protection de courte durée en phase chantier. Ce point sera à examiner tout particulièrement lors de l'APS.

Pour le corps de digue SOGREAH avait envisagé la mise en œuvre de tout venant de 1 à 500 kg.

La DDE confirme que la zone de carrière en cours de reconnaissance pourra fournir sans difficultés 8 à 10 millions de m<sup>3</sup>. Il conviendrait de lancer très vite les études de caractérisation de la carrière potentielle afin de déterminer quelle sera la part de fines à éliminer et, surtout quelles seront les capacités de blocométries extrayables de la carrière.

### 11.2.3. Hypothèses de dimensionnement

L'étude SOGREAH de 1998 a procédé à un pré-dimensionnement de la digue.

Compte tenu du faible écart entre houle cyclonique trentennale (Hs = 11 m) et centennale (Hs = 12,50 m) et du fait que sur une bonne partie de son linéaire, la digue sera dans la zone de déferlement qui écrête la houle, il était suggéré de dimensionner la digue pour la houle centennale, **ce que nous recommandons également.**

Dans tous les cas, il sera nécessaire **qu'aucun franchissement ne puisse atteindre la route, y compris en houle centennale** (ce point sera bien évidemment à vérifier en houle maximale, pouvant atteindre la digue, en prenant notamment en compte le déferlement qui dépendra de la profondeur locale devant la digue). Ceci pourra s'obtenir soit avec une digue infranchissable soit avec une digue plus basse et donc franchissable mais avec zone de recueil des eaux de franchissement, évitant qu'elles n'atteignent la voie publique. Cette zone de recueil des eaux pourra très bien servir à accueillir une voie de service pour interventions sur la digue sans gêner la circulation publique.

Restera à bien étudier, lors de l'APS, le problème des embruns rabattus par le vent qui peuvent s'avérer très importants, conduisant à des volumes d'eaux notables sur la route, même en l'absence de tout franchissement.

Ces hypothèses sont confortées par le caractère stratégique de la route qui doit rester ouverte, éventuellement selon un mode de gestion dégradé, pendant les périodes de fortes houles précédant l'arrivée des vents extrêmes du cyclone pour faciliter la mise à l'abri des populations.

Par ailleurs, Météo France a attiré l'attention du comité sur le caractère répétitif des cyclones, pouvant conduire à plusieurs épisodes cycloniques très rapprochés sur la même zone empêchant donc la réparation d'éventuels dégâts.

**Le comité suggère dans ces conditions un dimensionnement plus sécurisant que pour des digues classiques, à savoir 0 % de dégâts, quels que soient les types de blocs de carapace, pour la houle de projet, et non pas 5 % comme classiquement pour les blocs posés en bicouche.** Il convient de souligner que pour des blocs posés en mono couche tel par exemple l'Accropode®, le dimensionnement est toujours effectué avec cette hypothèse de 0 % de dégâts en houle de projet.

## 12 – Préconisations relatives au tunnel

Le tracé de la solution de base comporte un tunnel de 3,5 km environ, dont les débouchés se font à l'Est dans les coteaux qui dominant Saint-Denis et à l'Ouest dans la falaise de La Grande Ravine.

Conformément à son mandat et à ses compétences, le comité s'est attaché aux questions de modalités de creusement de ce tunnel, de sécurité des deux têtes et de reconnaissances à effectuer dans le cadre du projet.

Il s'est appuyé dans ses réflexions sur le rapport d'expertise du CETu du 1<sup>er</sup> décembre 1998<sup>23</sup> mis à jour à l'occasion du Débat Public de 2004<sup>24</sup> et a reçu, à l'occasion d'une de ses réunions plénières, l'auteur de ces rapports et le directeur du CETu.

En préalable à l'examen des questions qui suivent, ce dernier a attiré l'attention du comité sur les conséquences de la congestion à l'arrivée sur Saint-Denis si un dispositif efficace de diffusion du trafic n'est pas mis en place, ainsi que sur les difficultés de prise en compte des transports de matières dangereuses, des circulations douces, et des transports exceptionnels. La possibilité de résoudre ces problèmes conditionne en effet la crédibilité de la solution en tunnel.

### 12.1. Méthodes de creusement

Le creusement de la section courante du tunnel ne devrait pas, aux yeux du comité, poser de problèmes particuliers.

---

<sup>23</sup> Etudes d'aménagement à long terme de la RN1 entre Saint-Denis et La Possession, A. Robert, CETu, 1<sup>er</sup> septembre 1998.

<sup>24</sup> CETu, dossier de préparation du débat public, dossier relatif aux tunnels, août 2004.

## **12.2. Reconnaissance préalable**

Malgré l'abondance apparente des études déjà réalisées, le comité constate que la connaissance géologique de détail du massif de la Montagne, dans lequel sera creusé le tunnel, est encore réduite, de même que celle de son hydrogéologie.

Il lui paraît essentiel que, dès le stade des études d'APS, soit établie une coupe géologique aussi précise que possible de la zone du tracé, même si l'exercice n'est pas très facile dans un terrain constitué de coulées de lave fracturées et de couches de scories, pour lesquels les repères habituellement utilisés en terrains sédimentaires manquent.

Une observation très fine de la coupe géologique naturelle que constitue la falaise peut donner une vision assez précise de la nature des roches et de la structure du massif rocheux. Elle peut mettre en particulier en évidence les paléo-reliefs qui sont une composante importante de cette structure. Des sondages carottés judicieusement implantés dans la zone du tracé pourront ensuite permettre de compléter l'extrapolation des données de surface.

Il y aura bien entendu parallèlement à caractériser du point de vue géotechnique les différents terrains susceptibles d'être rencontrés, de façon que les projeteurs aussi bien que les entrepreneurs puissent se faire une opinion aussi précise que possible des conditions d'exécution des travaux.

Il faudrait de même recueillir le maximum d'informations sur l'hydrogéologie du massif, le risque de venues d'eau imprévues constituant toujours un des très gros problèmes en matière de creusement de tunnels. L'observation des venues d'eau dans la galerie du chemin de fer en période très pluvieuse est une des sources possibles d'information, mais il faut observer qu'elle n'est jamais éloignée de la paroi de la falaise et se situe dans une zone où celle-ci est sans doute décomprimée et où les fractures qui la recoupent sont ouvertes. Rien ne dit en conséquence que les conditions hydrogéologiques au niveau de cette galerie soient représentatives de celles qui prévalent à l'intérieur du massif. L'absence de venues d'eau dans la galerie du chemin de fer ne garantit pas qu'on ne sera pas confronté, au moins à certaines périodes, à des montées de nappe à l'emplacement du tunnel.

Il est donc indispensable, aux yeux du comité, d'équiper de piézomètres les sondages de reconnaissance qui seront réalisés au droit du tracé et d'en suivre régulièrement le niveau pendant toute la période de projet.

## **12.3. Sécurité de la tête Est**

Le versant qui domine Saint-Denis est en pente modérée et semblerait a priori ne pas devoir poser de problème pour la réalisation de la tête de tunnel.

Ce versant a pourtant donné lieu, lors de la réalisation de la voie U2, à des glissements du manteau d'éboulis sur les terrains mieux consolidés sous-jacents, dont on observe encore les traces.

Après examen des différentes données disponibles, visite du site et discussion en réunion plénière, le comité estime que, quelle que soit la position de la tête de tunnel dans cette zone, il sera possible, dans le cadre de la mise au point du projet, de définir les méthodes et dispositions nécessaires pour en assurer sa stabilité et sa sécurité.

## 12.4. Sécurité de la tête Ouest

Dans la solution de base, les deux tubes débouchent dans la falaise à l'Est de La Grande Ravine, à la cote +14 (le fond de la Grande Ravine étant à la cote +25), et sont reliés à la digue par un ouvrage d'art de 1700 m de long.

La sécurité de cet ensemble est jugée préoccupante par les membres du comité, et ceci à plusieurs points de vue :

- sécurité de l'ouvrage de jonction, dont la chaussée se situera en deçà de la polygonale relative aux chutes de blocs et dont, si c'est un viaduc, les piles seront exposées aux grands éboulements ;
- sécurité de la structure extérieure des têtes de tunnel, menacées à la fois par les chutes de blocs et par les risques de grands éboulements ;
- risque de déstabilisation de la falaise par les redistributions de contraintes provoquées par l'entrée presque tangentielle des deux tubes ; l'exemple du grand effondrement de 1961 incite à une grande vigilance à cet égard ;
- risques liés aux interférences avec le tunnel du CFR ;
- faible couverture au passage de la ravine, même si on peut observer que l'intensité du flot en période de pluie a dû évacuer les terrains les plus meubles ;
- risques de venue d'eau au franchissement par en dessous de la ravine.

Le comité estime que ces risques sont sérieux et suggère que soit recherchée une autre solution pour le débouché du tunnel. A défaut de lui trouver une alternative appropriée, la solution actuelle ne devrait être acceptée qu'au prix de mesures très convaincantes de sécurisation.

## 13 – Recommandations relatives à un viaduc en mer

La solution de base ne comporte qu'un seul ouvrage d'art, celui qui, partant de la digue en mer, rejoint l'entrée Ouest du tunnel. Des commentaires ont été faits au chapitre précédent au sujet de cet ouvrage, situé en partie à l'intérieur de la polygonale, en même temps que des réserves plus globales vis-à-vis de la solution adoptée pour le débouché Ouest du tunnel, qui devrait être réexaminée. Il n'est pas possible d'en dire plus, à ce stade, au sujet de l'ouvrage.

La solution d'un viaduc en mer comme variante de certaines sections de la route sur digue ou du tunnel d'extrémité apparaît par ailleurs dans plusieurs des études réalisées, et en particulier dans celle de Sogreah en 1998 (ref 2). Les commentaires qui suivent sont relatifs à ce type d'ouvrage.

Les principales caractéristiques des ouvrages envisagés par Sogreah sont les suivantes :

- ouvrage à caissons précontraints de hauteur variable de 120 m de portée, ouvrage à caissons précontraints de hauteur fixe de 70 m de portée, ouvrage à poutres précontraintes par post-tension de 45 m de portée ;
- fondations multi-pieux, par pieux verticaux et inclinés, chemisés, de 2 m de diamètre, supportant directement le chevêtre de soutien du tablier, et pouvant être mis en place par plateforme auto-élévatrice.

Les propositions de Sogreah ont fait l'objet d'un avis du Sétra du 15 septembre 1998 s'appuyant, pour l'action de la houle sur les fondations, sur un avis du CETMEF du 6 août

1998. Le Sétra ne se prononce pas sur le type de structure à privilégier, les conditions de réalisation auront un rôle essentiel dans l'optimisation du projet. Il estime que la conception des fondations proposées par Sogreah, qui s'inspire de celle des fondations du pont de l'île de Ré, est bien adaptée aux conditions du site. Ce point de vue a été confirmé à l'occasion de la réunion restreinte du 30 janvier 2007.

Le Sétra attire cependant l'attention sur les risques d'usure rapide de la base des fondations par le va et vient des galets sous l'effet de la houle, et insiste sur la nécessité d'une bonne prise en compte de ce risque.

S'agissant de la conception du tablier, son environnement maritime doit amener à retenir une conception réduisant les risques de corrosion, et à prévoir des spécifications techniques répondant à cet objectif (formulation et qualité du béton, enrobage des armatures, limitation de la pénétration de la carbonatation et des chlorures, dispositions facilitant un renforcement ultérieur qui pourrait s'avérer nécessaire, etc..).

Sont examinées ci-après les différentes agressions auxquelles un tel ouvrage sera soumis, et définies les hypothèses de projet à prendre en compte pour chacune d'entre elles.

### **13.1. Protection de l'ouvrage contre les chutes de blocs et les éboulements**

Le premier objectif est d'empêcher toute chute de blocs sur la chaussée. Outre le danger qu'une telle chute ferait courir aux automobilistes, elle est susceptible de gravement endommager le tablier de l'ouvrage.

Les fondations de l'ouvrage devront d'autre part se situer à une distance suffisante de la falaise pour ne pas être atteintes par les éboulements.

Pour tenir compte de cette double exigence, le comité préconise les deux conditions suivantes :

- implantation des fondations à 10 m au moins de la polygonale enveloppe ;
- bord intérieur du tablier à 20 m au moins au-delà de la polygonale relative aux chutes de blocs.

### **13.2. Effets du vent**

Compte tenu des types d'ouvrage envisagés, l'influence du vent ne devrait pas être déterminante, sauf pour les phases de construction.

Selon les eurocodes 1-1-4 (vent) et 1-1-6 (actions en cours d'exécution), les vitesses de vent à considérer (valeurs caractéristiques) correspondent à une période moyenne de retour de 50 ans pour l'ouvrage en service et de 10 ans pour les phases de construction.

A défaut de données de sites plus précises issues de constatations météorologiques, le comité propose de retenir les valeurs déjà utilisées pour la conception et la construction des grands ouvrages de la route des Tamarins, à savoir prise en compte d'une pression statique homogène et horizontale de 4 000 Pa, en tant qu'action non accidentelle, en service ou en construction; en cas de construction par fléaux, prise en compte d'une pression statique verticale de +/-200 Pa sur un seul demi-fléau dans les seules combinaisons de type fondamental.

### **13.3. Effets des séismes**

L'île de La Réunion est actuellement classée en zone de sismicité 0, ce qui signifie que l'on n'est pas tenu à une vérification parasismique.

Ainsi qu'il a été dit précédemment (chapitre 8), un nouveau zonage national a été publié par le Ministère de l'écologie et du développement durable en 2006, mais n'est pas officialisé. Selon ce projet de zonage, l'île de La Réunion serait classée en zone Z1b, dite de sismicité faible.

Cette modification de la classification étant très probable, le comité en préconise l'application pour le projet.

Estimant indispensable que le viaduc reste utilisable après un séisme, pour la gestion de crise et le maintien de l'activité économique, le comité recommande qu'il soit classés dans la classe de protection la plus élevée, à savoir la classe D définie par l'arrêté du 15 septembre 1995 ou son équivalent dans le nouvel arrêté qui doit le remplacer.

### **13.4. Effets de la houle et des tsunamis sur les fondations**

Le comité ayant validé au chapitre 11 les valeurs de houle de référence proposées par Sogreah, il a validé du même coup les hypothèses de houle à prendre en compte pour le calcul des efforts sur les fondations des viaducs.

Sogreah avait utilisé pour ce calcul la formule de Morison, ce qui n'avait pas été critiqué par le CETMEF (bonne concordance avec les résultats obtenus par le Shore Protection Manual américain).

Depuis cette date a été élaborée par l'ISO le projet de norme ISO/DIS 21650<sup>25</sup> qui devrait, à terme, devenir la norme européenne de référence (par accord entre le CEN et l'ISO, car ce type d'actions n'est en effet pas abordé dans l'eurocode 1 relatif aux actions sur les structures). C'est cette norme ISO dont le comité préconise l'utilisation pour le projet.

Le choix, proposé au chapitre 10, du grand tsunami de décembre 2004 comme tsunami de référence, et le constat que ses effets sont beaucoup plus faibles que ceux des cyclones, conduit à considérer ce type de phénomène comme non dimensionnant pour l'ouvrage d'art.

### **13.5. Calage du tablier en hauteur**

L'objectif retenu par Sogreah dans son étude de 1998 était de mettre la chaussée hors d'atteinte de la houle, même centennale. Pour le garantir, une garde de 1 m était ajoutée à la plus grande hauteur atteinte par la houle cyclonique centennale.

Afin de mettre hors d'atteinte de la houle le tablier, et pas seulement la chaussée, un calage de la base des appareils d'appui à cette cote peut être retenu.

---

<sup>25</sup> ISO/DIS 21650, actions from waves and currents on coastal structures.

### 13.6. Chocs de bateaux

Ils ne sont pas pris en compte dans l'étude Sogreah. L'avis du Sétra du 15 septembre 1998 fait mention de cette absence et considère que, « compte tenu de la proximité du port de La Possession, il est indispensable de procéder à une étude des chocs de bateaux que pourraient subir les appuis des ouvrages ».

Les quelques échouements passés ne peuvent servir de référence, car il s'agit de petits bateaux de pêche de 11m de long. Les navires fréquentant les environs de l'île sont de taille beaucoup plus importantes, et bien que les ouvrages ne soient pas dans une zone de circulation maritime, on ne peut a priori exclure l'éventualité de navires en perdition venant s'échouer sur le littoral et donc heurter les ouvrages ; il faut d'ailleurs faire le constat que s'est déjà produit l'échouage d'un cargo de 7 500 tonneaux de jauge devant le Barachois.

L'objectif de protéger les ouvrages contre n'importe quel choc de bateau n'est pas réaliste. Il faut donc, si l'étude de la solution viaduc devait être poursuivie, que soit faite une analyse des risques permettant au maître d'ouvrage d'en évaluer l'importance, de définir un événement de référence pour lequel les ouvrages seront dimensionnés, et de prendre au delà des mesures préventives destinées à réduire la probabilité d'occurrence ou à réduire l'importance des dégâts.

Il conviendra ainsi d'effectuer dès le stade de l'APS une étude statistique des navires passant au large de l'ouvrage, ainsi que des modélisations mathématiques de la dérive de ces navires prenant bien entendu en compte leur tirant d'eau afin de se limiter aux seuls navires susceptibles d'arriver sur l'ouvrage sans s'être échoués auparavant. Il conviendra ensuite, au vu des résultats de ces premières études, soit d'opter pour un niveau de choc forfaitaire soit de mener une approche plus fine. Celle-ci pourra consister en une approche probabiliste des causes possibles d'incidents en cours de navigation et de leurs enchaînements, le tout croisé avec les occurrences de conditions météo défavorables et les analyses de trajectoires des navires. A partir de ces éléments, pourront être définis les niveaux de risque contre lesquels le maître d'ouvrage voudra se prémunir et les dispositions constructives adéquates (dimensionnement des piles pour résister jusqu'à un certain niveau de choc, hauteur du tablier du pont, travées fusibles en cas de chocs très exceptionnels non pris en compte dans le dimensionnement général, dispositifs d'arrêt côté du large etc..). Cette analyse devra aussi permettre de définir les moyens de prévenir les événements critiques par des limitations réglementaires de la navigation, par des mesures de surveillance de la circulation maritime, et par des moyens de remorquage permettant de secourir à temps des navires en perdition.

Parmi les solutions qui permettraient de réduire les conséquences d'un choc de bateau et d'accroître la sécurité de la liaison, devrait être examinée celle de deux ouvrages parallèles et indépendants. La solution des « travées fusibles », retenue par exemple pour le pont de l'île de Ré n'est en effet pas acceptable ici, tant la liaison est vitale pour le fonctionnement de l'île.

## **14. Alternatives possibles à la solution de base**

Il a été demandé au comité de s'exprimer sur les « choix possibles entre digue, viaduc et tunnel pour chacune des sous-sections de l'itinéraire ».

Il est évident qu'une solution optimale ne peut être identifiée sur la seule base de considérations techniques, les questions de coût des ouvrages étant notamment tout à fait essentielles.

Sous cette réserve, les commentaires du comité sur les différentes sections sont les suivantes, en parcourant l'itinéraire depuis le Port.

### **Section La Possession - Grande Ravine**

Compte tenu de la faible pente des fonds marins, la solution la plus avantageuse est très certainement la route sur digue, de loin la moins chère, et qui présente de nombreux autres avantages (souplesse d'exploitation ; aptitude à accueillir sans contraintes les transports de matières dangereuses, transports exceptionnels et circulations douces ; tolérance vis-à-vis de chocs de bateaux en perdition ; tolérance vis-à-vis d'éventuels dépassements des seuils de dimensionnement etc..).

### **Section Grande Ravine – Saint-Denis**

Elle est prévue en tunnel dans la solution de base.

Compte tenu du coût du tunnel, des difficultés à prévoir au niveau de sa sortie Ouest, des problèmes qui se poseront en matière de gestion du trafic, de transport de matières dangereuses, de circulations douces, et de transports exceptionnels, le comité recommande que, parallèlement à la solution tunnel, soit étudiée et évaluée en première phase des études d' une alternative entièrement aérienne.

Deux solutions aériennes sont envisageables, dont l'implantation suppose de disposer d'études complémentaires de même nature que celles qui ont permis de déterminer la polygonale sur la section aérienne de la solution de base.

La première consisterait à prolonger la digue en mer jusqu'à Saint-Denis.

Aux avantages précédemment énumérés pour la route sur digue, il faut ajouter ceux qui sont liés à une solution « monoteknique » : souplesse de programmation, réduction du coût unitaire au fur et à mesure que le chantier s'allonge, simplification de l'organisation du chantier et de son pilotage par le maître d'ouvrage.

Si ce point de vue était adopté, et s'il était décidé d'engager l'étude d'une alternative sur digue, des investigations complémentaires spécifiques seraient à prévoir : étendre à cette zone les levés bathymétriques et géotechniques ; prévoir une étude géologique très fine du Cap Bernard, sur le modèle de celle qui a été réalisée près de La Grande Chaloupe ; demander à Rochet et Rochet Consultants la réalisation de plusieurs modélisations d'éboulements implantés sur la base de l'étude géologique ; prévoir éventuellement quelques trajectographies de blocs supplémentaires.

La deuxième serait celle d'un viaduc.

Un tel ouvrage présente l'avantage d'être peu dépendant de la profondeur des fonds marins, donc de la distance à la côte.

Le rapport du comité, établi sur ce point avec l'appui du Sétra, propose une implantation par rapport à la polygonale et fait pour son dimensionnement un certain nombre de recommandations qui visent à prendre en compte l'évolution de la réglementation.

Un point mérite une attention tout à fait particulière : c'est le risque de grave endommagement ou même de rupture de l'ouvrage en cas de choc sur le tablier d'un navire en perdition.

Le comité recommande à ce sujet d'effectuer, dès le stade de l'APS une étude statistique des navires passant au large de l'ouvrage, donnée d'entrée d'une étude de risque qui seule permettra au maître d'ouvrage de fonder sa décision sur une base objective.

## **15. Remarques finales**

Conformément à son mandat, le comité s'est essentiellement appuyé dans son analyse sur les études précédemment réalisées.

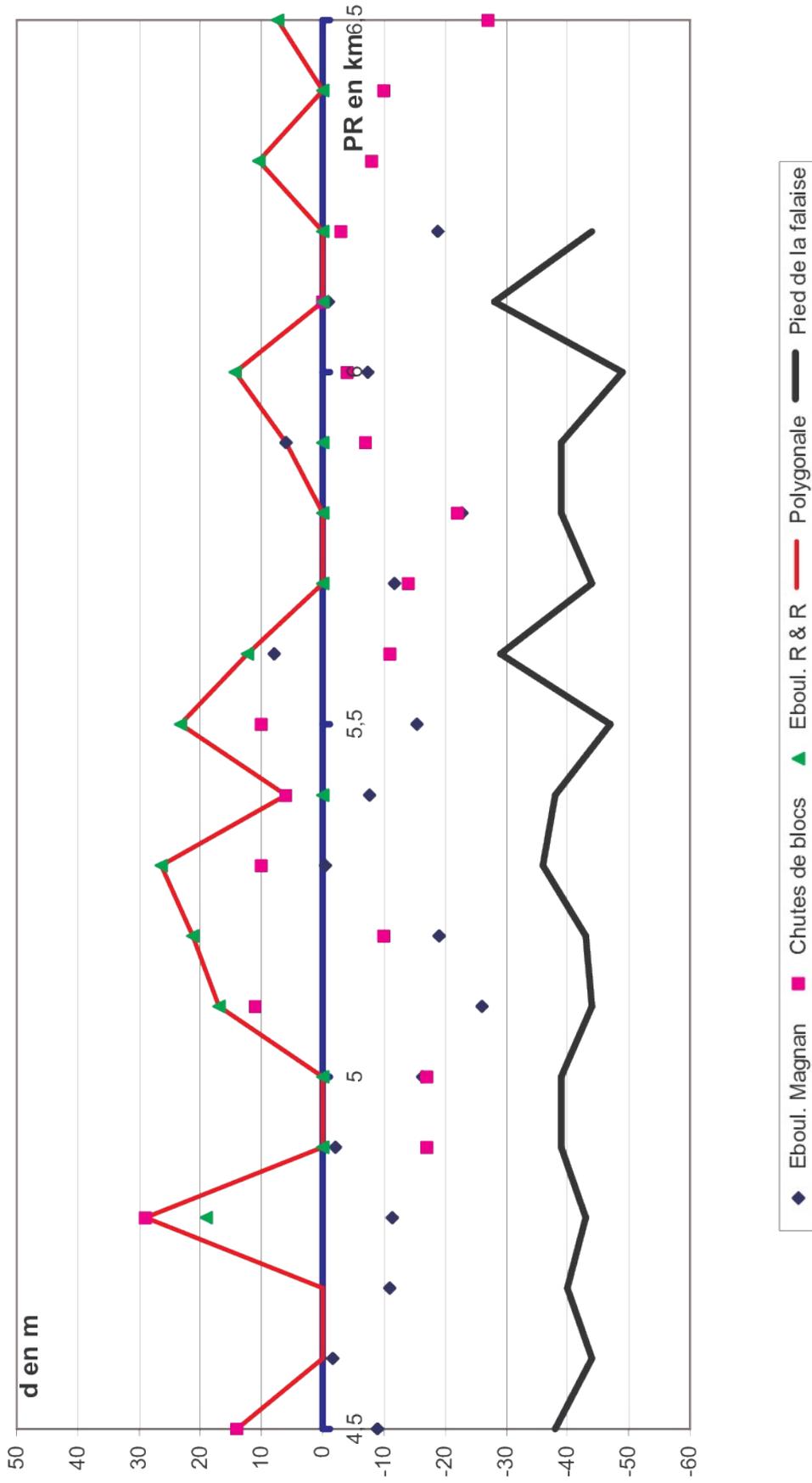
Il est possible que les données complémentaires résultant des études d'APS incitent à nuancer ou adapter certaines des conclusions de ce rapport. Il appartiendra au maître d'ouvrage de solliciter alors l'avis du comité, sur la base des ces données nouvelles.

Il convient enfin de préciser que le comité pourra porter une appréciation, plus fondée sur le projet et la sécurité qu'il garantit, lorsque les principaux choix de conception des ouvrages auront été définis.

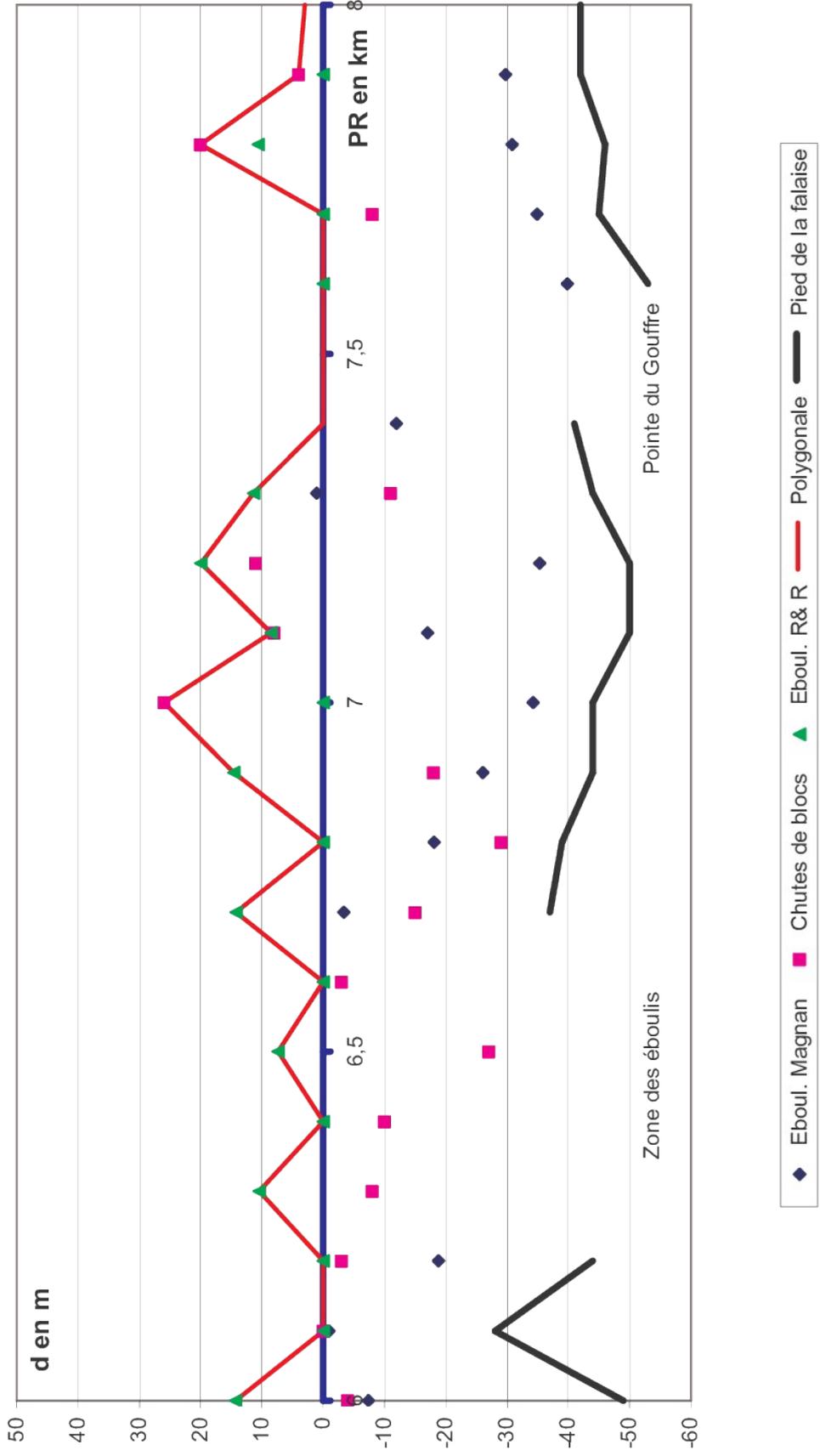
## **Annexe**

### **Tracé des polygonales**

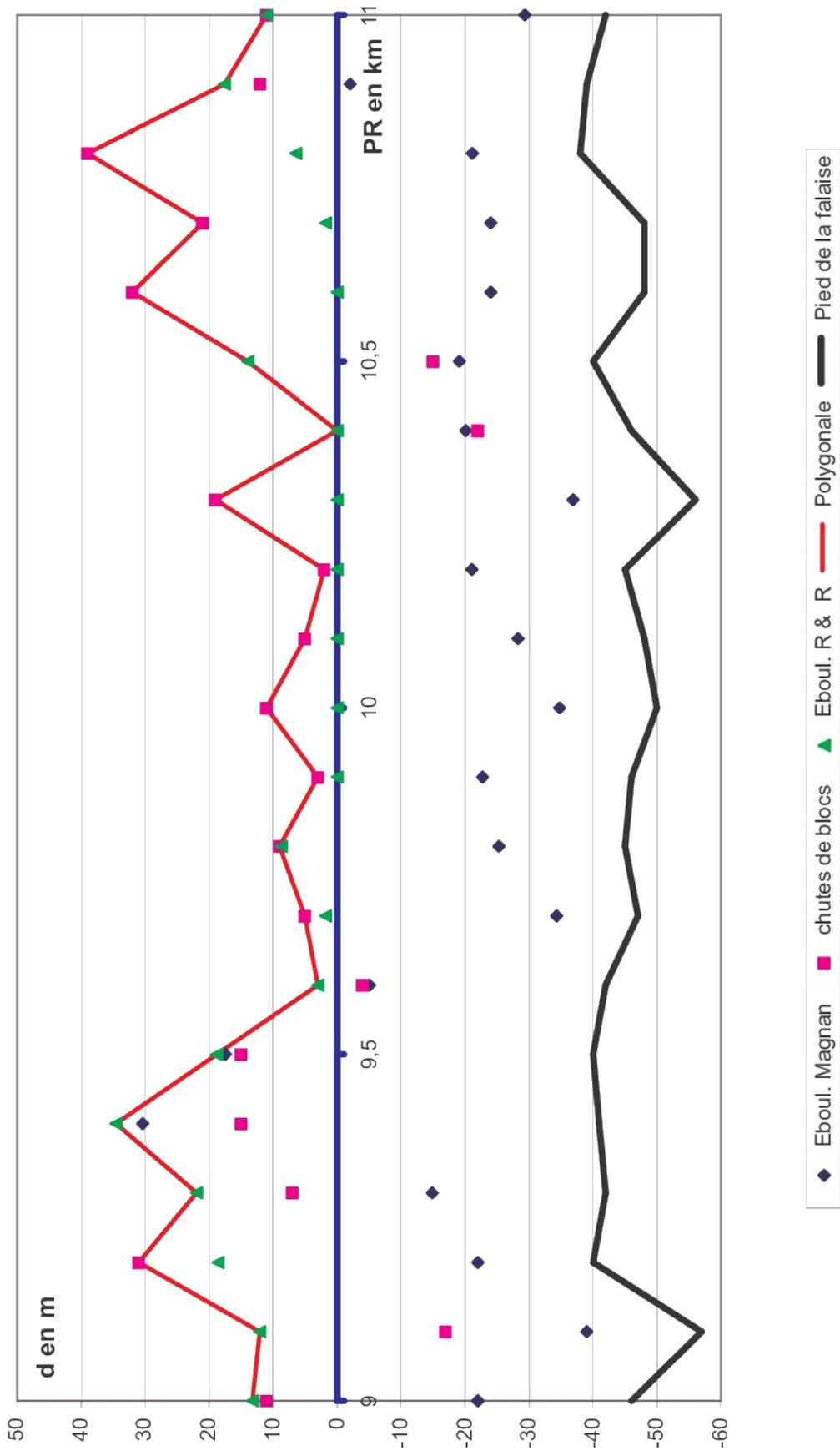
# PR 4,5 - 6,5 Grande Ravine - Pointe du Gouffre



# PR 6 - 8 Pointe du Gouffre - Grande Chaloupe



# PR 9 - 11



# PR 11-13

