

# Reconnaitances à l'avancement dans la galerie hydraulique Salazie-Amont (Île de la Réunion)

**ROUSSEAU** : MO Conseil général  
**LE PETIT** : CO. DAF  
**Jean Louis GIAFFERI** : SCP (ancien EDF)  
**Denis DEFARGUES** : Bouygues TP

**Médéric PIEDEVACHE** : Solexperts France  
**Pierre CACHAU** : COFOR / COREIS  
**Yanick LETTRY** : Solexperts AG

**Résumé :**

Lors du creusement de la galerie hydraulique de Salazie-Amont à la Réunion, les conditions hydrogéologiques particulières ont nécessité des reconnaissances à l'avancement par forages longs. L'article décrit les techniques de forage et les essais hydrogéologiques in-situ mis en œuvre.

**Abstract**

In-progress soil investigation in the upstream-Salazie hydraulic gallery (La Réunion)

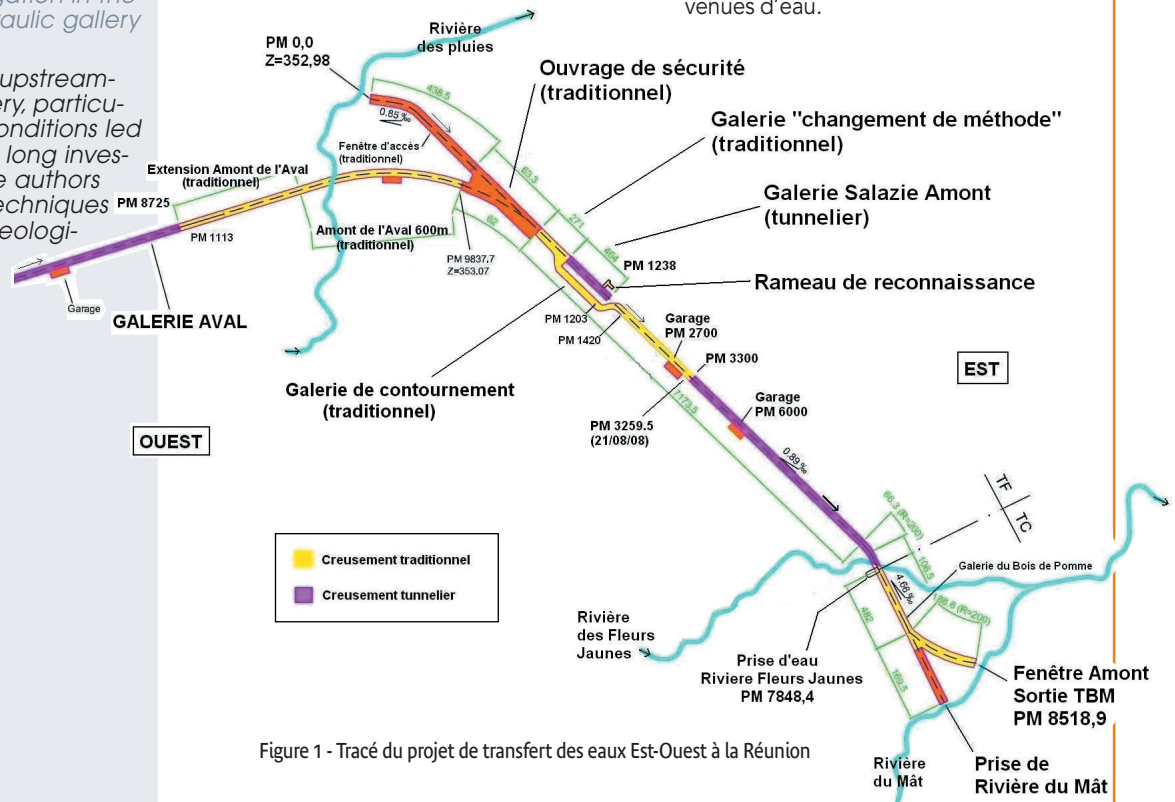
While excavating the upstream-Salazie hydraulic gallery, particular hydrogeological conditions led to perform in-progress long investigation boreholes. The authors describe the drilling techniques and the in situ hydrogeological tests performed.

## 1 - SITUATION DU PROJET

### 1.1 - Cadre général

Pour permettre un approvisionnement en eau nécessaire au développement du littoral Ouest de l'île de la Réunion, le Conseil Général a engagé un projet de basculement des eaux d'Est en Ouest, à partir des cirques de Mafate et de Salazie en creusant 30 km de galeries. Une première tranche de galeries (Mafate et

Sainte Suzanne) a été réalisée et mise en service à la fin des années 1990. Une troisième galerie, celle de Salazie-Aval a été terminée en 2006. La dernière galerie, celle de Salazie-Amont est encore en cours de travaux du fait de la rencontre de conditions géologiques difficiles (PM 3259.5 atteint le 21/08/2008)<sup>(1)</sup>. Cet article porte sur la galerie Salazie-Amont et en particulier sur la mise en œuvre d'une technique spécifique de reconnaissance à l'avancement pour reconnaître, prévenir et caractériser les zones de très fortes venues d'eau.



(1) Les travaux des galeries de Salazie ont été décrits par Th. BORCA et N. MARGOLOFF dans un article publié dans le n° 182 de TOS (mars 2004).

### 1.2 - Historique de la galerie Salazie-Amont

Du fait d'une géologie difficile et des conditions climatiques à la Réunion (saisons cycloniques : cyclone Dina, ...) le creusement s'est déroulé en plusieurs phases depuis l'année 2000 :

- Une première section (de la tête Nord-Ouest de tunnel au PM 773) s'est faite à l'explosif, avec rencontre de plusieurs venues d'eau, retardant la mise en œuvre du tunnelier ;
- Du PM 773 au PM 1238, creusement au tunnelier. Après avoir rencontré quelques venues d'eau rapidement tariées, le tunnelier était bloqué au PM 1238 en octobre 2001 par une venue d'eau importante (>400 l/s avec 18 bars) dont le débit ne baissait pas ;

- Du PM 773 au PM 1280, réalisation d'une galerie de contournement du tunnelier ;
- A partir du PM 1280 poursuite du creusement de la galerie à l'explosif. Le creusement a atteint le PM 3259.5 le 21 Août 2008. Le débit total stabilisé en tête Nord-Ouest de la galerie est de 1150 l/s.

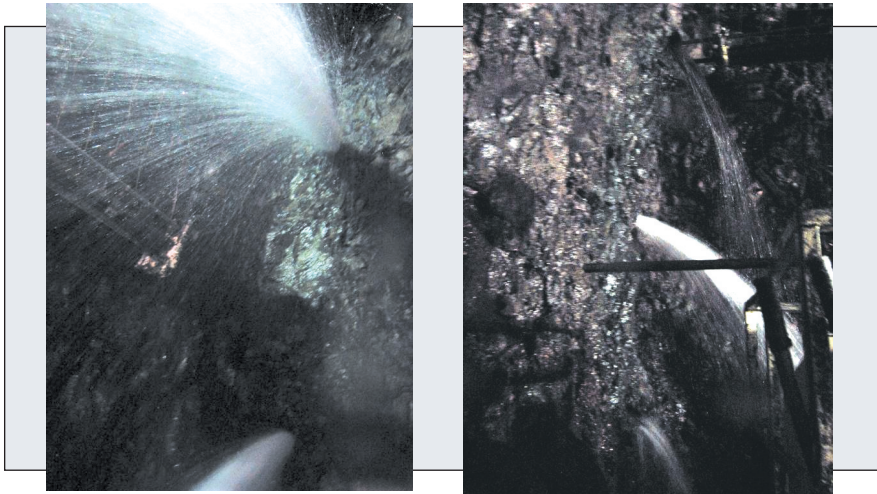
## 2 - CONDITIONS GÉOLOGIQUES ET HYDROGÉOLOGIQUES

La Réunion est un volcan bouclier composée de deux édifices volcaniques principaux juxtaposés : le Piton de La Fournaise toujours en activité et le Piton des Neiges,

plus ancien, émergé il y a trois millions d'années environ. Le projet du transfert d'eau d'Est en Ouest, pour sa partie Galerie Amont, se situe sous la Plaine des Fougères appartenant à la partie Nord-Ouest du Piton des Neiges. Il est situé dans des formations anciennes âgées de plusieurs centaines de milliers d'années. Compte tenu de l'âge des formations et des circulations d'eau, les roches rencontrées sont fréquemment marquées par des processus d'altération (zéolotisation) et de minéralisation secondaire.

Les terrains rencontrés sont des formations volcaniques, principalement des alternances de coulées basaltiques compactes à vacuolaires et des ensembles de brèches de coulées et scories. Ces formations ont un pendage globalement faible, inférieur à 10° (typique du volcan bouclier) et sont parfois recoupées par des intrusions (dykes et sills) qui compartimentent le massif du point de vue hydrogéologique en constituant des barrières étanches de part leur mode de mise en place et de refroidissement.

Du point de vue hydrogéologique, le projet traverse plusieurs zones aquifères qui présentent des débits et des pressions importantes (plusieurs centaines de l/s et des pressions pouvant atteindre 20 à 30 bars). La forte perméabilité des formations est majoritairement liée à l'importance de la fracturation des basaltes (perméabilité de fissures prépondérantes) et à la présence de scories (perméabilité de vacuole secondaire). L'aquifère est complexe et discontinu du fait de son cloisonnement par les dykes.



Photos 1 - Venues d'eau en galerie au PM3105

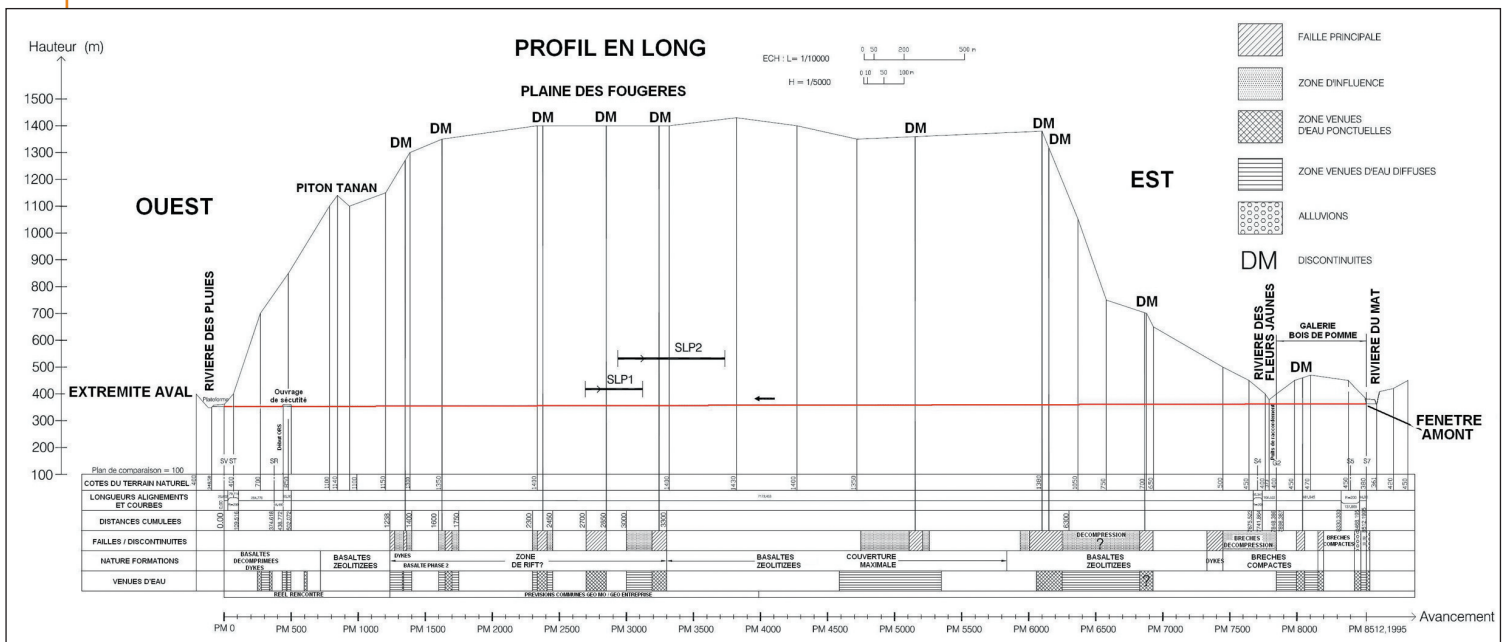


Figure 2 - Coupe géologique du projet.

## 3 - RECONNAISSANCES A L'AVANCEMENT

### 3.1 - Procédure générale

A partir du PM 1420, afin d'évaluer et d'anticiper la présence d'une zone d'eau sous pression en avant du front, des forages destructifs au marteau auto-percutif de 50 à 80m de longueur avec enregistrement des paramètres ont été effectués toutes les 2 semaines en fonction de l'avancement à l'explosif.



Photo 2 - Utilisation du jumbo pour les sondages d'exploration

### 3.2 - Forages horizontaux longs

Au delà de la galerie de contournement, l'avancement s'est fait en traditionnel à l'explosif sans rencontrer de venue d'eau, cependant les études laissaient supposer des risques potentiels de venues d'eau sur la suite du tracé et en particulier à partir du PM 3000. Pour caractériser ce risque il a été décidé d'effectuer un forage horizontal long de reconnaissance depuis le front de taille et dans l'axe du tunnel, avant de reprendre le creusement au tunnelier.

Ce premier forage SLP1 de 428 m, situé au PM 2692, a mis en évidence une venue d'eau importante avec des pressions supérieures à 3MPa à partir du PM 2915 m. Cette venue d'eau avait une extension d'au moins 205 m, sans toutefois pouvoir délimiter sa longueur totale suivant l'axe de la galerie.

Sur la base de cette information, il a été décidé de poursuivre le creusement à l'explosif, et de réaliser un deuxième forage SLP2 à partir du PM 2935 depuis une niche latérale afin de permettre de poursuivre simultanément le creusement de la galerie. La hauteur de couverture à cet endroit est proche de 1000m.

### 3.3 - Forage SLP2 de 800 m

#### 3.3.1 - Implantation - Matériel

Le forage a été implanté dans une niche de 8 m de large sur 20 m de long, parallèle à la galerie à une distance d'environ 10 m.

L'appareil de forage est de type DIAMEC B20 (ATLAS COPCO) monté sur skid et équipé d'une pompe d'injection triplex et treuil wire-line pour le carottage.

Les commandes de la machine sont regroupées sur un pupitre muni d'un ordinateur et d'un écran tactile.

Cet appareil est spécialement conçu pour les sondages carottés de grande longueur.

#### 3.3.2 - Avant-trou - Tête de forage

Un avant-trou a été réalisé jusqu'à 21,30 m par carottage, puis alésage avant mise en place d'un tubage acier centré.

Ce tubage a été entièrement cimenté à l'extrados afin de supporter le dispositif de sécurité en tête et de reprendre les charges aquifères attendues.

Après montage du dispositif de sécurité en tête et reforage du sabot de tubage, un test de pression est effectué pour vérifier la qualité de la cimentation.

Le dispositif en tête est composé:

- d'une vanne de fermeture totale ;
- d'une fermeture annulaire (fermeture sur tige) ;
- d'un B.O.P. (Blow Out Preventer) rotatif

Cet ensemble permet de mettre en sécurité le forage lors d'une éruption mais aussi de pouvoir continuer à forer en contrôlant les venues d'eau.

Ainsi, les opérations de carottage et de forage ont pu se dérouler correctement et en sécurité avec un sondage débitant 60 l/s sous 3,30 Mpa de pression en tête.

#### 3.3.3 - Carottage de la zone aquifère

Le carottage a été effectué avec la technique de carottage au câble au calibre H.

Diamètre du forage : 98,5 mm  
Diamètre de la carotte : 63,5 mm

Les essais d'eau avec le système PDPS (utilisable uniquement avec le carottier au câble) ont été réalisés régulièrement à l'avancement pour mettre en évidence la fin de la zone aquifère située vers 400 m de profondeur (PM 3336).

La trajectoire (pendage) du sondage en carottage chute régulièrement du fait de la déviation naturelle engendrée par l'effet de plongement de la garniture de forage.

Pour anticiper cette chute, une trajectoire légèrement montante a été donnée au démarrage du sondage.

Dès la confirmation de la sortie de la zone de venues d'eau, il a été décidé de procéder à une correction de trajectoire pour ne pas trop s'éloigner de l'axe théorique du sondage.

#### 3.3.4 - Correction de trajectoire

Cette correction de trajectoire a été effectuée entre 444,70 m et 616,30 m (du PM 3380 au PM 3552) avec un moteur de fond entraînant un outil tricône.

Cette phase, en mode destructif, a été forée au même diamètre que le carottage calibre H.



Photo 3 - Foreuse COFOR (COREIS) sur forage SLP2

Un appareil de mesure "Steering Tool System" situé au niveau du moteur de fond permet de connaître la position du forage par une information remontée en continu à la surface.

L'ingénieur de guidage doit modifier la trajectoire du forage tout en veillant de respecter des grands rayons de courbure pour permettre ensuite le passage des tiges de carottage pour poursuivre le forage.

D'un angle d'inclinaison négatif de 8° à 444 m, la correction a permis de remonter la trajectoire à 616 m à un angle positif de 6° par rapport à l'horizontale.

### 3.3.5 - Carottage de la dernière partie

De 616,30 m à la cote finale de 800,20 m, le sondage a été entièrement carotté au câble en calibre H.

Des tests de caractérisations hydrogéologiques ont été effectués à l'avancement avec le système PDPS pour valider l'absence de nouvelles venues d'eau.

### 3.3.6 - Conclusion

Ce sondage de grande longueur a été entièrement réalisé en monodiamètre en combinant des techniques de carottage minier et de forage dirigé. Il a duré 12 semaines.

Tout le déroulement du forage s'est effectué avec une forte venue d'eau en tête nécessitant un personnel très qualifié et expérimenté à l'usage de ces techniques et matériels.

La récupération globale des carottes est de 97,3% malgré la traversée de zones de formations altérées, fracturées, vacuolaires et parfois en débris dans les secteurs fortement aquifères.

En fin des travaux, pour permettre un meilleur drainage, le forage a été alésé en diamètre 126 mm dans la zone aquifère et équipé en tête d'une vanne DN 125.

Le creusement en traditionnel de la galerie avait alors atteint le PM 3125.

## 3.4 - Caractérisation hydrogéologique

### 3.4.1 - Procédure

L'objectif de ces forages est de reconnaître la géologie mais aussi de localiser les venues d'eau, de mesurer la pression hydrostatique et la perméabilité des terrains.

Les conditions de tests étant extrêmement difficiles avec des pressions de plus de 3MPa et des débits en tête de forage de plus de 60 l/s, il a été décidé de réaliser des tests en cours de foration avec le système d'obturateur pompé PDPS.

Le système se compose de trois éléments :

- Instrumentation de forage (PDPS système) : Système à double obturateur pour isoler l'intervalle de test en fond de forage. Mise en œuvre sans tiges, uniquement par pompage dans les tiges de forage ;
- Unité de contrôle avec mesure du débit et de la pression : placée en surface permet de conduire le test ;
- Acquisition de données par ordinateur, permet de suivre et interpréter on-line les tests.

Le système PDPS en forage comprend une chambre de test avec filtre, deux obturateurs et un système de pompage/fermeture identique au carottier.

Le principe de mise en œuvre est le suivant :

- Foration en carottage HQ.
- Retrait du train de tige de la longueur de chambre de test souhaitée (environ 10 - 20 m).
- Pompage du système d'obturateur à l'intérieur du train de tige de forage, de manière similaire au carottier.

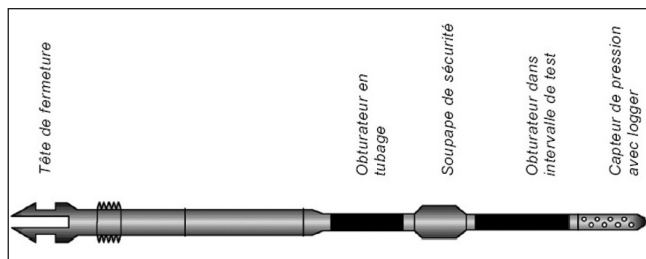
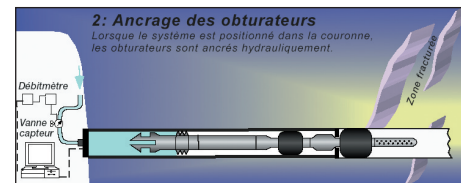
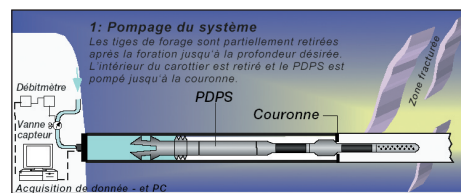


Figure 4 Système PDPS en forage

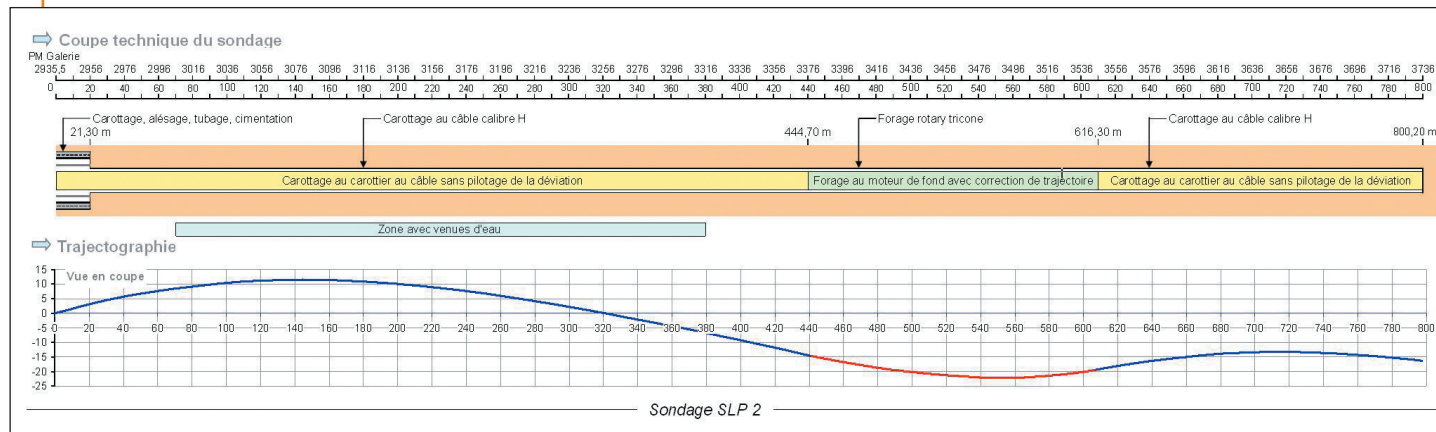


Figure 3 - Coupe technique du forage

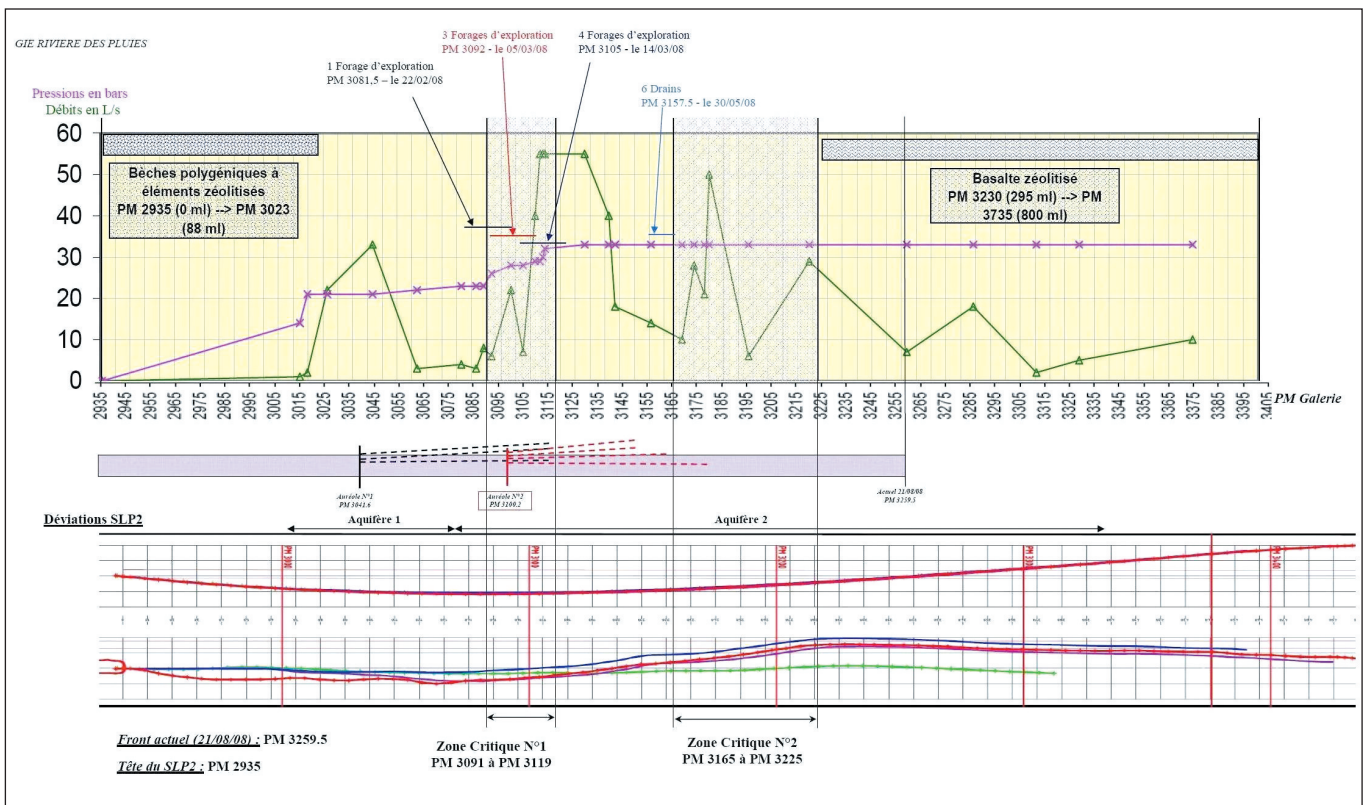


Figure 5 : Résultats des tests

- Par un jeu de goupilles les deux obturateurs sont ancrés. La chambre de test délimitée entre le fond du forage et l'obturateur 1 peut ainsi être testée. Le train de tige sert alors de conduite hydraulique. Deux capteurs de pression situés dans le système PDPS mesurent les variations de pression directement dans la chambre de test sans pertes de charge et en continu. Un test d'une durée de 2 heures est alors conduit comportant une première phase de stabilisation de la pression (obtention de la pression de formation) puis une production à débit constant et enfin un retour en pression. L'interprétation de ces deux phases actives de tests, permet de déterminer à l'aide de logiciels sophistiqués la perméabilité de la formation.
- En fin de test, les packer sont désancrés

et retiré du forage avec l'overshot de carottier. La foration peut alors reprendre aussitôt. Le système est remis en état pour le test suivant.

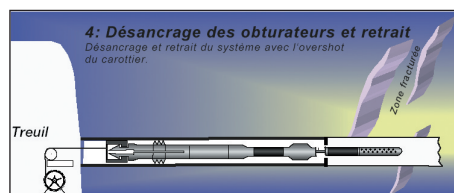
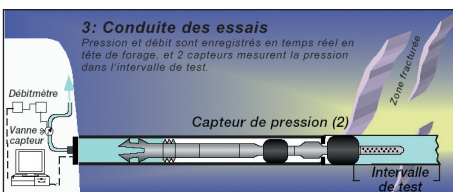


Photo 4 - Forage SLP2, test avec le PDPS



### 3.4.2 - Résultats des tests

Treize tests ont été effectués pendant la foration, avec une durée moyenne des opérations de 6 heures. Les tests sont interprétés juste après l'opération et les résultats transmis au responsable chantier.

Les résultats principaux obtenus sont les suivants :

- Etablissement du profil de pression. Deux aquifères sont ainsi caractérisés. Le premier situé entre le PM 3008 et 3074 m (ce qui équivaut à des profondeurs de 73m et 139m de foration) avec une pression hydrostatique de 1,9 MPa, le deuxième entre les PM 3074 m et 3336 m (ce qui équivaut à des profondeurs de 139m et 401m de foration) avec une pression hydrostatique de 3,1 MPa.
- Détermination immédiate et avec exactitude de la fin de l'aquifère, et le début de la zone étanche.
- Validation de l'extension de la zone étanche du PM 3336 m au PM 3734 m (fin du forage).
- Caractérisation des perméabilités des aquifères.

Le schéma ci-dessus résume les résultats des tests.



#### 4 - CONCLUSION

Le creusement de la galerie de Salazie-Amont à la Réunion fait face à des difficultés importantes du fait de très grosses venues d'eau. Les reconnaissances préalables rendues très difficiles voire impossibles du fait de la topographie des lieux (couverture supérieure à 1000 m et versants très raides) et de leur situation en zones protégées, laissent une grande incertitude au regard de la géologie et de l'hydrogéologie du site. Suite aux premières difficultés rencontrées en 2001, et afin d'assurer la sécurité du creusement et de rechercher des solutions techniques pour le creusement de la galerie en sécurité, une procédure de reconnaissance à l'avancement par forage long a donc été mise en

place avec succès à partir de 2004 dans les zones potentiellement à risque. Ces forages longs sont complétés par des tests hydrogéologiques avec système pompé de type PDPS, dans le cas où des venues d'eau sont localisées. Ces tests permettent de caractériser les différents aquifères et leur extension.

Les forages SLP1 et SLP2 réalisés en 2007 ont ainsi permis de caractériser deux zones aquifères de forte extension, plus de 330 m de longueur au total dans l'axe de la galerie, et avec des pressions de plus de 3MPa et des transmissivités atteignant  $10^{-4}$  à  $10^{-3}$  m<sup>2</sup>/s. Leur détection bien en avant du front a permis d'établir les données d'entrées pour modifier et adapter la méthode d'excavation et préparer le type de drainage à mettre en œuvre :

- Réalisation d'auréoles de drainage et instrumentation de leur débit, afin de mesurer l'impact du tunnel sur le débit de ces auréoles.
- Instrumentation des pressions et suivi des pressions à l'avancement du creusement pour définir la fréquence de répétition de ces auréoles.

Ces mesures ont permis de ne réaliser que 2 auréoles sur les 7 prévues initialement, et de réduire la pression de l'aquifère de 33 bars à 3 bars.

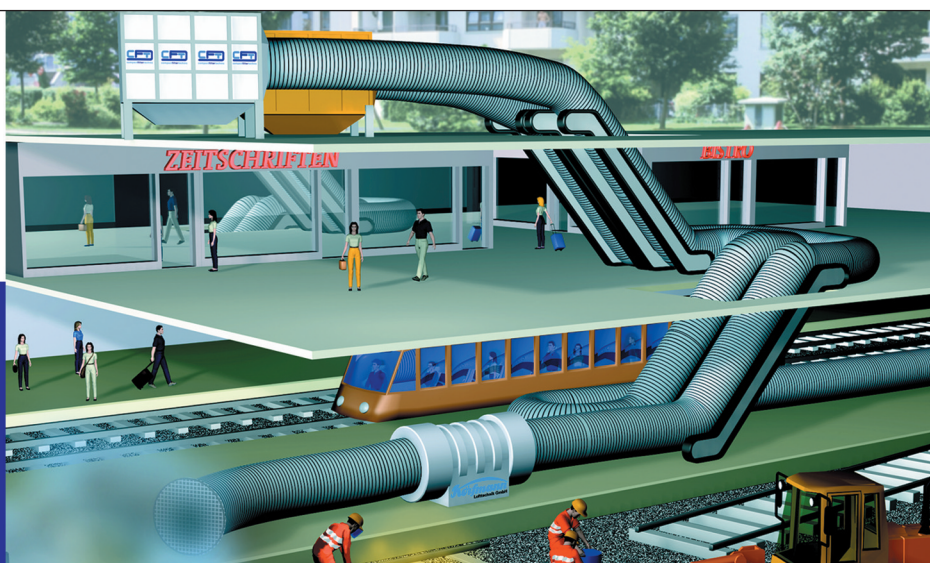
Le creusement en est au PM3260 au 21/08/2008, avec des venues d'eau en arrière du front de taille. Au total sur les 270 premiers mètres de l'aquifère, la galerie draine plus de 900l/s.

#### PRINCIPAUX INTERVENANTS

<b>Maître d'Ouvrage</b>	: Département de la Réunion
<b>Conducteur d'Opération</b>	: Direction de l'agriculture et de la forêt
<b>Maître d'œuvre</b>	: Groupement BRL/SCP/SECMO
<b>Groupement d'entreprises</b>	: Bouygues TP (mandataire), DTP terrassement, Spie batignolles TPCI, Sotrabas, Razel Frères, Pico II et Bilfinger & Berger.
<b>Etudes d'exécution</b>	: Structurel – ouvrages génie civil finis : Maître d'œuvre. Méthodes de creusement – ouvrages provisoires : Groupement d'entreprises.
<b>Têtes de galerie</b>	: incluses dans le marché.
<b>Prises d'eau</b>	: exclues du marché.

**CFT**  
compactfiltertechnik

**DEPOUSSIERER  
SANS ARRÊTER  
L'EXPLOITATION ET LE TRAFIC**



3 allée de la Bichonnerie - Les Carrières - 78610 AUFFARGIS - Tél. +33 134 84 96 57 - [www.cft-gmbh.de](http://www.cft-gmbh.de)