Prévision hydrogéologique pour une galerie d'amenée en charge en roches carbonatées (Pueblo Viejo, Guatemala)

Autor(en): **Tripet, Jean-Pierre**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria**

Band (Jahr): **77 (1985)**

Heft 5-6

PDF erstellt am: **25.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-940926

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Prévision hydrogéologique pour une galerie d'amenée en charge en roches carbonatées (Pueblo Viejo, Guatemala)

Jean-Pierre Tripet

Résumé

Une prévision hydrogéologique basée sur des études de terrain approfondies a été réalisée pour le percement d'une galerie d'amenée en charge de 26 km de longueur dans le cadre d'un projet hydro-électrique au Guatemala. Cette galerie traverse une série de roches sédimentaires consistant en grande partie en des calcaires et dolomies fissurés et karstifiés. Pour contribuer à l'interprétation des données et à l'établissement de la prévision hydrogéologique, un modèle mathématique par éléments finis a été utilisé.

Les études ont permis une estimation quantitative de l'hétérogénéité de la perméabilité. Le rapport entre la perméabilité des blocs à conductivité hydraulique faible et celle des réseaux de drainage majeurs atteint 1:10000. Pour la prévision hydrogéologique, les débits liés aux blocs (débits faibles, probabilité élevée) et aux discontinuités majeures (débits possibles très élevés, probabilité faible) ont été traités séparément.

Les analogies et les écarts entre la prévision et la situation réelle sont discutés. L'incertitude liée aux variations latérales de la lithologie et aux modifications du programme de revêtement de l'ouvrage pendant les travaux est soulignée. Les conséquences de la prévision hydrogéologique sur la conduite du projet sont également mentionnées.

Abstract: Hydrogeological forecast for a power tunnel through limestones and dolomites (Pueblo Viejo, Guatemala)

Hydrogeological forecasting based on detailed field investigation was carried out for the design and excavation of a 26 km long power tunnel in the framework of an energy development project in Guatemala. This tunnel had to be excavated in a sedimentary series consisting in large parts of fractured and karstified limestones and dolomites. For the field data interpretation and the hydrogeological forecasting a finite element mathematical model has been used.

It was possible to interpret quantitatively the heterogeneity of the permeability considering blocks of little permeability bounded by permeable major joint systems. The ratio of the permeability of the blocks to the one of the major joints amounts to 1:10000. For the hydrogeological forecast, the discharge from the blocks (low discharge, high probability of occurrence) respectively of the major joints (very high possible discharge, low probability) have been considered separately.

Coincidence and discrepancies between forecast and actual situation are discussed. The incertainty related to lateral variations of the lithology and to the modifications of the tunnel lining program during the execution phase is pointed out. The consequences of the hydrogeological forecast on the tunnel design are mentioned.

Zusammenfassung: Eine hydrogeologische Prognose für einen Druckstollen durch verkarstete Kalke und Dolomite (Pueblo Viejo, Guatemala)

Eine hydrogeologische Prognose wurde zur Projektierung und Ausführung eines 26 km langen Druckstollens im Rahmen eines Wasserkraftprojektes in Guatemala durchgeführt. Zu diesem Zweck waren detaillierte Felduntersuchungen notwendig. Der Stollen führt durch eine Abfolge Sedimentsgesteine, welche vorwiegend aus geklüfteten und verkarsteten Kalken und Dolomiten besteht. Für die Datenauswertung und die hydrogeologische Prognose wurde ein mathematisches Finite-Element-Modell verwendet.

Die Untersuchungen haben eine quantitative Abschätzung der Heterogenität der Durchlässigkeit ermöglicht. Wenig durchlässige Blöcke und durchlässige Haupttrennflächensysteme konnten zu diesem Zweck unterschieden werden. Das Verhältnis der Durchlässigkeit der Blöcke zu derjenigen der Haupttrennflächen beträgt 1:10000. Für die hydrogeologische Prognose wurde die Austrittsmenge aus den Blöcken (beschränkte Wasserführung, grosse Wahrscheinlichkeit) bzw. diejenige aus den Haupttrennflächen (sehr grosse potentielle Ergiebigkeit, jedoch niedrige Wahrscheinlichkeit) separat berücksichtigt.

Die Übereinstimmung bzw. die Abweichungen zwischen Prognose und Wirklichkeit werden diskutiert. Die Bedeutung von lateralen lithologischen Änderungen sowie von Änderungen des Stollenverkleidungsprogrammes während der Bauphase ist hervorgehoben. Die Bedeutung der hydrogeologischen Prognose für die Stollenprojektierung ist ebenfalls ausgeführt.

1. Introduction

L'aménagement hydroélectrique Pueblo Viejo-Quixal est situé dans la région centre-nord de la République de Guatemala, dans le bassin moyen du Rio Chixoy. Le projet en question, qui se trouvait au début 1984 dans sa phase finale d'exécution, est le plus important projet de développement énergétique réalisé à ce jour au Guatemala (puissance installée 300 MW).

Le barrage de Pueblo Viejo est un ouvrage en enrochement d'une hauteur de 133 m. Une galerie d'amenée en charge longue de 26 km relie la prise d'eau à la centrale de Quixal (figure 1). Cette galerie, d'un diamètre de 5,6 m (diamètre de l'excavation), comporte deux sections, de 8 et 18 km respectivement. Son excavation a nécessité la réalisation préalable d'une étude hydrogéologique détaillée, dans le but d'établir des prévisions relatives aux venues d'eau possibles durant le percement de l'ouvrage. Le projet a été décrit notamment par *Gysel* (1982).

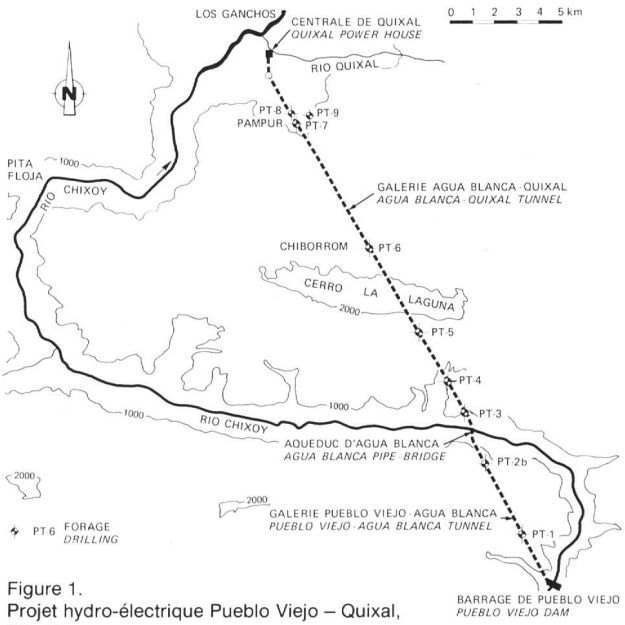


Figure 1.
Projet hydro-électrique Pueblo Viejo – Quixal, Situation.

Le but de la présente note est de présenter les moyens utilisés pour établir la prévision hydrogéologique et d'en discuter les résultats en les comparant avec les observations réalisées lors des travaux d'excavation. Il sera fait mention principalement du tronçon aval de l'ouvrage au nord du Cerro La Laguna (figures 1 et 2), situé dans une série de roches carbonatées montrant en surface une morphologie karstique très accentuée.

2. Etude des conditions hydrogéologiques

2.1 Conditions géologiques générales

Dans la zone du projet, des séries sédimentaires d'âge primaire et secondaire, plissées et faillées, constituent des massifs montagneux et de hauts plateaux entaillés par de profondes vallées et canyons; l'altitude du terrain varie de 300 à 2300m. Les formations géologiques dominantes le long de l'axe de la galerie consistent en une série de roches carbonatées crétacées plissées, fracturées et en partie karstifiées et aquifères, d'une épaisseur d'environ 2300m (figure 2).

2.2 Méthodes d'étude

Les reconnaissances géologiques et hydrogéologiques réalisées dans la zone de la galerie lors de la phase d'étude sont mentionnées ci-dessous. Lors de l'élaboration du programme, une attention toute particulière a été réservée à l'étude des paramètres hydrauliques des formations carbonatées. Ce programme comprenait les éléments suivants:

- cartographie géologique
- campagnes géophysiques (sismique réfraction et réflexion, résistivités électriques, mesures audiomagnéto-telluriques)
- exécution de 9 forages d'une profondeur de 150 à 990m (profondeur totale 3715m)
- essais et mesures dans les forages (diagraphie géophysique, essais de perméabilité, mesures du niveau piézométrique et de ses fluctuations)
- essais de traçage
- cadastre de sources et observation périodique de ces sources
- cadastre spéléologique
- étude des paramètres de l'hydrologie de surface (météorologie et hydrométrie).

Les opérations mentionnées ci-dessus ont été complétées par un programme d'observation continu destiné à se poursuivre jusqu'à l'achèvement de la phase de construction du projet et comprenant la mesure des fluctuations du niveau piézométrique dans les forages, l'observation des sources, des observations hydrométéorologiques ainsi que le relevé des venues d'eau dans la galerie.

L'étendue des essais destinés à l'étude quantitative de la perméabilité des formations carbonatées a été la suivante:

- essais d'injection d'eau sous pression (type *Lugeon)* dans les forages; les essais réalisés dans les forages du site du barrage ont également été pris en considération et ont permis des comparaisons par extrapolation. Somme des intervalles testés: zone du tunnel, 357m; zone du site du barrage, 840m. Profondeur maximale des essais, 330m. Méthode de forage: forages carottés à l'eau, diamètre ≤ 76mm.
- essais entre obturateurs doubles («essais de formation», de type *Halliburton*) dans les forages de la zone du tunnel. 3essais ont donné des résultats significatifs, profondeur entre 204 et 932m. Méthode de forage: forages rotary à la boue, diamètre 6⅛''.
- essais de traçage. Zone du tunnel: 6 essais, injection de fluorescéine dans des pertes (entonnoirs) karstiques. Zone du barrage: 5 essais, injection du traceur dans des forages (fluorescéine, rhodamine B et FB et chlorure de sodium utilisés séparément).

Les résultats obtenus au sujet des paramètres hydrauliques des formations carbonatées ont été décrits dans des notes antérieures (*Tripet,* 1976a, 1976b, 1982). L'interprétation du champ des perméabilités est présentée dans le paragraphe suivant.

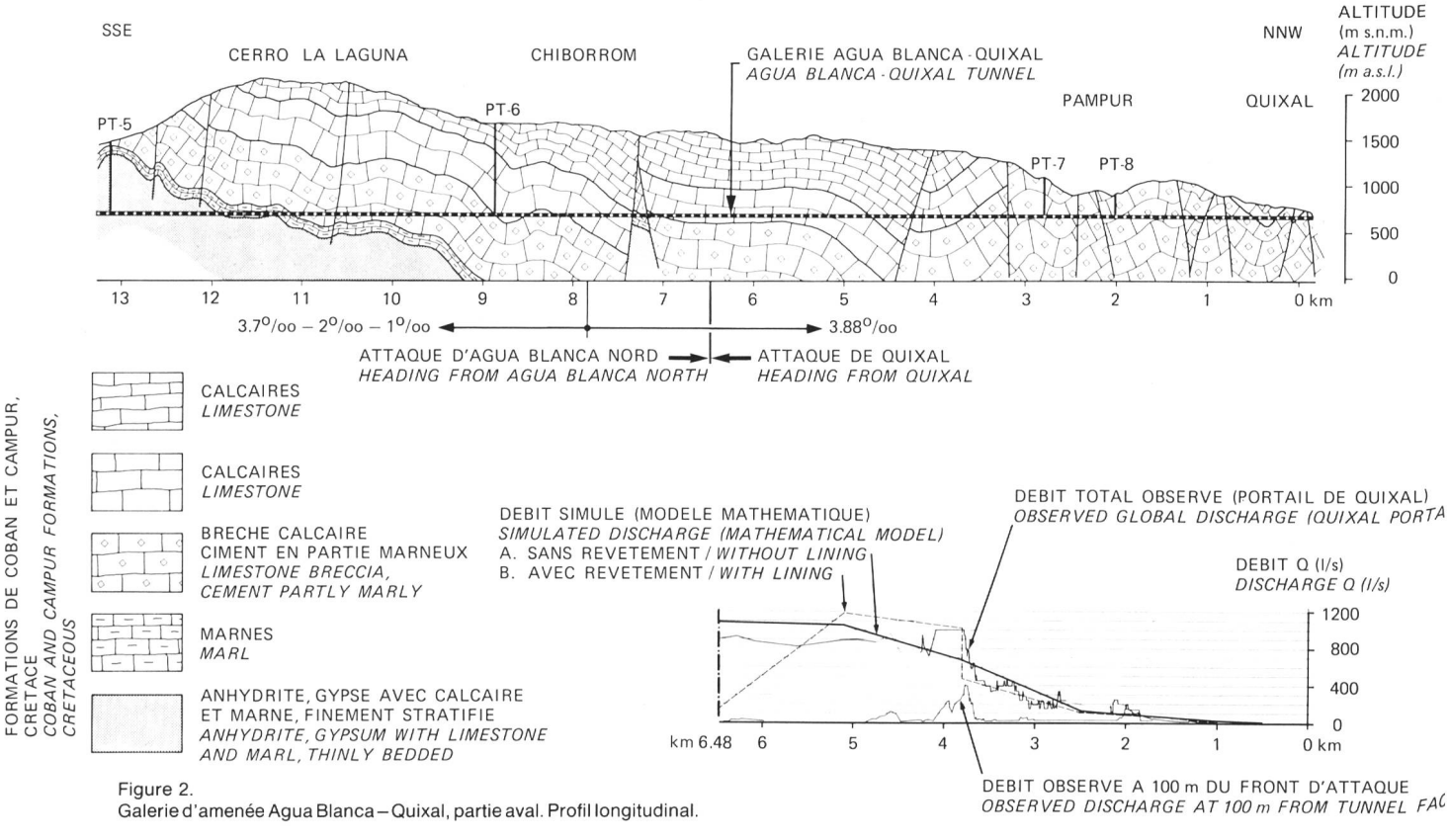


Figure 2.
Galerie d'amenée Agua Blanca – Quixal, partie aval. Profil longitudinal.

3. *Prévision hydrogéologique*

3.1 *Facteurs de la prévision*

La prévision des venues d'eau dans une galerie nécessite l'évaluation préalable d'un certain nombre de facteurs déterminants de l'écoulement souterrain. Ces facteurs sont les suivants:

- géométrie des unités géologiques
- paramètres hydrauliques des unités géologiques (perméabilité et porosité efficace)
- surface piézométrique
- alimentation naturelle des écoulements souterrains
- distribution des zones d'exutoire des écoulements souterrains.

Dans le cadre du projet en question, ces facteurs ont été évalués pour toute la zone de la galerie à partir des résultats des campagnes de mesure mentionnées plus haut; le massif karstique au nord du Cerro La Laguna a fait l'objet d'une attention toute particulière. En raison de la densité relativement faible des observations directes en profondeur, et dû au fait qu'il a été nécessaire de limiter les recherches de terrain à une étroite zone de part et d'autre de l'axe de la galerie prévue, l'interprétation des données n'a pu être réalisée qu'en faisant fréquemment appel à des interpolations ou extrapolations. Une condition essentielle pour une telle démarche est de pouvoir se référer à un modèle géologique de bonne qualité.

3.2 *Modèle du champ des perméabilités*

Une récapitulation des valeurs de perméabilités observées est présentée au tableau 1. Ces données se réfèrent aux différentes unités de la série de roches carbonatées crétacées; il n'est pas apparu de différences significatives entre les diverses formations de cette série.

Les essais de perméabilité exécutés dans les forages le long de l'axe de la galerie n'ont montré qu'une faible tendance décroissante de la perméabilité avec la profondeur. Cependant, sur la base des résultats des campagnes géophysiques, la limite inférieure de la zone intensément fracturée et karstifiée a été estimée à une profondeur de 100 à 250 m à partir de la surface du terrain; il faut souligner que la plus grande partie de la galerie est située au-dessous de cette limite (figure 2).

L'examen du tableau 1 montre un contraste très marqué entre les valeurs de perméabilité obtenues par les différentes méthodes. Ces contrastes sont dus à la différence de taille des volumes de massif rocheux appréhendés par les diverses méthodes et démontrent clairement l'effet de l'hétérogénéite de la perméabilité («effet d'échelle»). Cette situation a justifié la formulation d'un modèle de la distribution spatiale de la perméabilité dans les formations fissurées et karstifiées.

Selon ce modèle déjà décrit dans des travaux antérieurs (*Tripet,* 1973; *Kiraly,* 1975), les unités géologiques en question sont représentées par un ensemble de blocs peu perméables, relativement homogènes et de volume important, drainés par un réseau de discontinuités de perméabilité élevée mais de faible volume.

Dans le cas présent (tableau 1), les essais réalisés dans les forages (injection d'eau sous pression et essais de formation) correspondent en général aux blocs faiblement perméables; les résultats des essais de traçage correspondent à la perméabilité du réseau de drainage karstique majeur; finalement l'interpétation des hydrogrammes correspond à une perméabilité équivalente en grand pour le millieu aquifère considéré comme un continuum poreux.

Tableau 1. Estimation de la perméabilité des formations carbonatées crétacées (zone Pueblo Viejo-Quixal) – Tableau récapitulatif.

Méthode	Zone ou point d'observation	Coefficient de perméabilité de Darcy, k	
		k (m/s)	Fréquence d'observation
Essais d'injection d'eau sous pression*	Site du barrage (Pueblo Viejo)	0 $0{,}5 \cdot 10^{-8}$ à $0{,}5 \cdot 10^{-6}$ (divers) ∞	30 % 44 % 10 % 16 %
	Forages PT-1, -4 et -7	0 $1 \cdot 10^{-8}$ à $1 \cdot 10^{-6}$ ∞	20 % 73 % 7 %
Essais de formation	Forages PT-5 et -6	$< 10^{-7}$	3 essais significatifs
Essais de traçage	Site du barrage (Pueblo Viejo)	$0{,}5$ à $5 \cdot 10^{-2}$ 1 à $10 \cdot 10^{-1}$	70 % 30 %
	Galerie d'amenée (Zone de Pampur)	$0{,}1$ à $1 \cdot 10^{-2}$ $0{,}1$ à $1 \cdot 10^{-1}$	40 % 60 %
	Galerie d'amenée Plateau de Chiborrom	$0{,}5$ à $1 \cdot 10^{-1}$ 1 à $5 \cdot 10^{-1}$	25 % 75 %
Analyse d'hydrogramme	Bassin du Rio Chixoy entre Los Ganchos et Pita Floja (130 km2) et Rio Quixal (325 km2)	1 à $5 \cdot 10^{-4}$	2 hydrogrammes analysés

* Une perméabilité nulle ou infinie signifie que la valeur de ce paramètre est en dehors des possibilités techniques du dispositif de mesure

Sur la base des valeurs du tableau 1 et de l'examen des caractères lithologiques et structuraux des formations géologiques en question, il a ainsi été possible d'établir un modèle de distribution des perméabilités faisant intervenir l'existence de systèmes de drainage emboîtés. Pour un espacement croissant des joints, une perméabilité plus élevée peut être admise. Cette classification («hiérarchie») des valeurs de perméabilité est représentée au tableau 2.

Tableau 2. Modèle de distribution des perméabilités des formations carbonatées crétacées (zone Agua Blanca-Quixal).

Description du type de fracturation	Coefficient de perméabilité moyen k (m/s)	
	Blocs	Réseau de drainage, systèmes emboîtés ( ) = distance moyenne entre les joints perméables
Zone supérieure (Epaisseur approx. 200 m) Fracturation et karstification bien développées Blocs de faible perméabilité, délimités par un réseau bien développé de joints karstifiés	$0{,}5 \cdot 10^{-7}$ max. $1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-3}$ (10 - 200 m) $1 \cdot 10^{-2}$ (200 - 1 000 m) $1 \cdot 10^{-1}$ (1 - 5 km)*
Zone profonde Karstification peu développée Blocs de faible perméabilité, délimités par des joints perméables peu fréquents	$0{,}5 \cdot 10^{-7}$ max. $1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-3}$ (500 - 1 500 m) $1 \cdot 10^{-2}$ (1 - 5 km)*

* Joints perméables majeurs, isolés; perméabilité maximum pour la zone supérieure = 1 m/s

Le modèle du champ des perméabilités ainsi obtenu a représenté l'hypothèse de base pour la prévision des venues d'eau possibles dans la galerie. Cette première représentation de la distribution des perméabilités a été vérifiée à l'aide d'un modèle mathématique par éléments finis, dans le but d'éliminer d'éventuelles contradictions entre ces résultats interprétatifs et les données d'observation. Les ordres de grandeur finalement retenus pour le coefficient de perméabilité après calibration par modèle mathématique sont les suivants:

a) blocs de faible perméabilité, $k = 1$ à $2 \cdot 10^{-6}$ m/s

b) réseau de drainage bien développé (espacement des joints approx. 1 km), $k = 1 \cdot 10^{-3}$ à $1 \cdot 10^{-2}$ m/s

c) réseau de drainage majeur (espacement des joints 1 à 5 km), $k = 0{,}01$ à 1 m/s

d) perméabilité équivalente à l'échelle de l'aquifère karstique (perméabilité du milieu poreux équivalent), $k = 1$ à $5 \cdot 10^{-4}$ m/s.

3.3 Méthodes d'évaluation des venues d'eau

La prévision des venues d'eau possibles dans la galerie a été réalisée en deux phases successives:

a) estimation faite sur la base de calculs simplifiés, de caractère en partie semi-quantitatif

b) modèle mathématique par éléments finis (réseau bidimensionnel horizontal avec prise en compte simplifiée de la 3e dimension).

Dans les deux cas, l'effet des blocs relativement peu perméables et celui des discontinuités majeures de période de répétition élevée (1 à 5 km) ont été traités de manière séparée. Dans une première approche, il a été fait abstraction de l'effet des discontinuités majeures et le massif rocheux (blocs de faible perméabilité parcourus par une fissuration fine) a été assimilé à un milieu poreux équivalent. Les venues d'eau possibles liées aux discontinuités majeures ont été évaluées dans une seconde phase; ce type de discontinuités avait une probabilité faible d'être recoupé par la galerie, et les venues d'eau correspondantes représentaient par conséquent un risque limité.

Le modèle mathématique avait pour but:

a) de vérifier la cohérence des hypothèses hydrogéologiques utilisées et d'obtenir une interprétation raisonnable et sans contradictions de l'écoulement souterrain dans la zone du projet (voir ci-dessus, paragraphe 3.2)

b) d'estimer les venues d'eau possibles dans la galerie durant les travaux d'excavation.

Le modèle a été utilisé en trois étapes successives:

a) étape de calibration; simulation du système d'écoulement souterrain de la zone du projet en conditions naturelles (surface du bassin considéré, 750 km²)

b) étape de prévision avant le début des travaux d'excavation, estimation des venues d'eau possibles dans la galerie

c) étape d'ajustement pendant les travaux d'excavation; révision du calage du modèle et de la prévision des venues d'eau.

Au cours des étapes b) et c), la prévision par modèle mathématique a été appliquée au tronçon Cerro La Laguna–Quixal.

3.4 Résultats de la prévision

Les résultats de la prévision hydrogéologique pour l'attaque de Quixal (km 0 à 6,5) sont représentés à la figure 3 (courbes 1, 2, 3). Ces valeurs correspondent toutes aux venues d'eau possibles liées au milieu poreux équivalent (abstraction faite des débits élevés de faible probabilité liés aux discontinuités majeures).

Au SSE du km 6,5, les débits prévus en première estimation pour les formations calcaires se montaient à 25 l/s km (250 l/s km aux environs du km 8 en relation avec la présence supposée d'une zone fracturée majeure). Les débits calculés par modèle mathématique pour le même tronçon se montaient à 140 – 200 l/s km (estimation avant le début de l'excavation), respectivement à 30 – 35 l/s km (ajustement après 4,1 km d'excavation).

La présence possible de venues d'eau à débits élevés (supérieurs à 1 m³/s) et soutenus, de probabilité cependant très faible, liées à des discontinuités majeures, a d'autre part été signalée aux environs des km 2,5, 5,2 et 8,0.

4. Comparaison prévision – réalité

Les débits observés dans la galerie durant les travaux d'excavation sont représentés sur les figures 2 et 3. Ces deux figures permettent de comparer les résultats de la prévision hydrogéologique avec la réalité et appellent les commentaires suivants:

– Jusqu'au km 3,7, les débits estimés (particulièrement ceux obtenus par modèle mathématique, courbes 2A et 2B, figure 3) correspondent de manière satisfaisante aux débits observés.

– Il a été mentionné plus haut que des débits élevés, de probabilité cependant très faible, avaient été prévus aux environs des km 2,5 et 5,2. Cet événement n'a pas été ob-

1, 2, 3 Débit prévu
1 Première estimation
2 Modèle mathématique, avant le début de l'excavation
  A Débit stabilisé (excavation suspendue)
  B Débit de pointe estimé (excavation en marche)
3 Modèle mathématique, ajustement après 4,1 km d'excavation
  A sans revêtement
  B avec revêtement jusqu'à 1 km du front d'attaque
4 Débit observé (diagramme simplifié)

1, 2, 3 Forecasted discharge
1 First estimate
2 Mathematical model, before starting excavation
  A Stabilized discharge (excavation interrupted)
  B Estimated peak discharge (excavation going on)
3 Mathematical model, adjustement after 4,1 km of excavation
  A without concret lining
  B with lining up to 1 km form tunnel face
4 Observed discharge (simplified diagram)

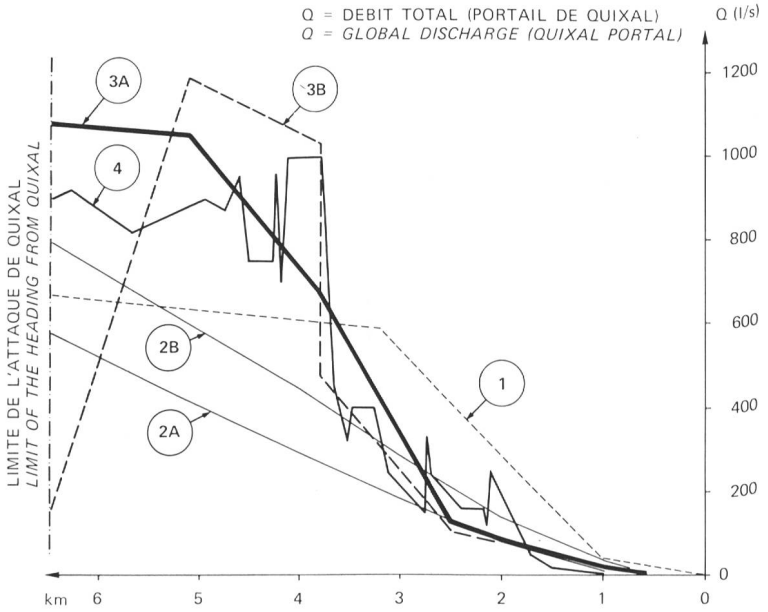


Figure 3.
Galerie d'amenée Agua Blanca – Quixal, Débits cumulés en fonction de l'avancement (prévisions et observations).

servé lors des travaux d'excavation du tronçon Agua Blanca–Quixal. Ces zones critiques se sont cependant manifestées avec un certain décalage (km 3,7 à 4,0 et km 4,6, figure 2) par des débits accrus liés à des joints karstifiés; ces venues d'eau étaient sensiblement supérieures à celles pouvant être produites par les blocs de faible perméabilité.
Cette situation explique l'écart par défaut entre la prévision (courbes 1, 2A et 2B, figure 3) et la situation réelle (courbe 4) au-delà du km 3,7.
– L'ajustement de la prévision après 4,1 km d'excavation a permis de corriger la prévision hydrogéologique de manière satisfaisante (courbe 3A pour le cas du tunnel sans revêtement, figures 2 et 3).
Deux facteurs expliquent en grande partie les divergences entre la prévision et la situation réelle; l'un est de type géologique (lithologie), l'autre est lié aux méthodes de construction de la galerie (programme d'exécution du revêtement). Ces deux facteurs sont brièvement commentés ci-dessous.

Influence de la lithologie

Les venues d'eau à débits élevés dont la possibilité avait été signalée – avec une probabilité cependant très faible – aux km 2,5, 5,2 et 8,0 n'ont pas été observées lors de l'excavation de la galerie Agua Blanca–Quixal, ni même à l'extrémité NNW où l'épaisseur de la couverture est relativement réduite. Cette situation est interprétée par la présence au niveau de la galerie, de brèches calcaires qui se sont révélées être la formation géologique prépondérante au Nord du Cerro La Laguna et dont le large développement était imprévisible. Ces brèches sont localement marneuses et en général peu sensibles à la karstification; les joints sont pour la plupart colmatés par de l'argile et des accidents majeurs se manifestant par des fractures ouvertes n'ont pas été observés au niveau de la galerie. Il est à noter que les débits accrus rencontrés aux km 3,7 à 4,0 et 4,4 sont en relation avec des zones à faciès franchement calcaire ou dolomitique montrant des signes de karstification.
La présence de ces brèches marneuses est également interprétée comme responsable de la très faible valeur des débits observés pour l'attaque d'Agua Blanca Nord, entre les km 11 et 6,5 (situation voir figure 2). Les débits observés pour ce tronçon n'ont pas dépassé 7 l/s km, ce qui est nettement inférieur à la prévision.

Influence du programme d'exécution du revêtement

La prévision hydrogéologique a été réalisée pour les conditions suivantes:

– effet du revêtement négligé (galerie drainante sur toute la longueur, courbes 1, 2, 3A, figure 3)
– seul un tronçon de 1 km en arrière du front d'attaque est non revêtu, le reste de la galerie est pourvu d'un revêtement pratiquement imperméable (courbe 3B, figure 3).

Pratiquement, le revêtement de béton a bien été posé simultanément avec l'avancement de la galerie, un tronçon d'environ 1 km en arrière du front d'attaque restant non revêtu. Cependant, les venues d'eau principales sont restées ouvertes jusqu'à la phase finale des travaux. De cette manière, les prévisions reproduisant le mieux les conditions réelles sont celles pour lesquelles l'effet du revêtement est négligé.
Il est donc intéressant de souligner que pour estimer la décharge des eaux souterraines d'un massif rocheux, en d'autre termes le débit d'eau total à évacuer par une galerie, il est nécessaire de tenir compte du programme de revêtement de l'ouvrage.

5. Conclusions

Les reconnaissances hydrogéologiques nécessitées par la réalisation de la galerie Pueblo Viejo–Quixal ont requis l'application de moyens d'étude de grande envergure. Ces études ont conduit à une prévision raisonnable des conditions d'écoulement souterrain, qui a pu être utilisée comme base de décision durant les phases d'élaboration et d'exécution du projet. Un modèle conceptuel de la distribution des perméabilités dans les formations fracturées et karstifiées, développé antérieurement dans le cadre d'autres études, a été utilisé avec profit.
Ces travaux ont mis en évidence une fois de plus les faits suivants:
– Pour toute étude hydrogéologique, une importance toute particulière doit être attribuée au modèle géologique (notamment lithologie, géométrie des unités géologiques, caractéristiques des systèmes de joints), lequel permet d'extrapoler les facteurs hydrologiques et duquel dépend la qualité de l'interprétation hydrogéologique.
– Si les moyens mis en œuvre ont permis une approche «statistique» de la distribution des perméabilités dans le massif rocheux, la détection et la localisation des discontinuités structurales majeures et la prévision de leur extension en profondeur reste cependant un problème délicat à résoudre. Les méthodes géophysiques représentent la meilleure approche de cette question.
Les conséquences des études hydrogéologiques décrites plus haut pour le dimensionnement de la galerie et la conduite des travaux d'excavation ont été principalement les suivantes:
– Dans la zone de Pampur, l'axe de la galerie a été déplacé vers l'intérieur du massif afin d'éviter des zones probablement très karstifiées au voisinage des versants.
– Dans la même région, une importante source karstique (débit généralement supérieur à 0,5 m^3/s, jusqu'à 30 m^3/s) se perd dans un entonnoir à une cote supérieure à celle de la galerie après un court trajet superficiel, pour émerger à nouveau à une cote inférieure à celle de l'ouvrage. Cette source a été captée et dérivée en dehors de la zone de la galerie afin de réduire les risques d'irruption d'eau karstique lors des travaux d'excavation.
– Pour éviter les risques liés à la possibilité de venues d'eau importantes dans la zone à faible couverture, la partie aval de la galerie a été excavée à l'explosif de manière conventionnelle. L'excavation au tunnelier, méthode choisie pour le percement de la galerie, a pu débuter au km 1,85.
– Une galerie de dérivation et de drainage a été excavée dans la partie aval de la galerie principale afin de faciliter le déroulement des travaux et la circulation des machines et du personnel.
– Des forages ont été réalisés au front d'attaque durant les travaux d'excavation afin de détecter à temps d'éventuels joints aquifères.

Références citées

Gysel M. (1982): Der Bau der Wasserkraftanlage Pueblo Viejo-Quixal in Guatemala. «wasser, energie, luft – eau, énergie, air», 74. Jahrgang, 1982, Heft 3, p. 40–42.

Kiraly L. (1975): Rapport sur l'état actuel des connaissances dans le domaine des caractères physiques des roches karstiques. In: Hydrogeology of Karstic Terrains, Ed. by *A. Burger* and *L. Dubertret*, International Association of Hydrogeologists, Paris (Chapter V).

Tripet J.P. (1973): Etude hydrogéologique du bassin de la source de l'Areuse (Jura neuchâtelois). Thèse, Neuchâtel. 183 p.

Tripet J.P. (1976 a): Etude de la perméabilité et de la porosité de formations calcaires karstifiées (Alta Verapaz, Guatemala). 2e Colloque d'Hydrologie en pays calcaire, Besançon (France) – Neuchâtel (Suisse), octobre 1976. «Annales scientifiques de l'Université de Besançon», Fasc. 25, 3e série, 1976, p. 411–421.

Tripet J. P. (1976 b): Dye tests in remote areas. Application to the karst of Alta Verapaz, Guatemala. Paper presented at the 3rd International Symposium of Underground Water Tracing (3. SUWT), Ljubljana-Bled, Yugoslavia, 1976, p. 299–307.

Tripet J. P. (1982): Investigation on hydraulic characteristics of karstified limestone formations, with reference to the use of a finite element model (Alta Verapaz, Guatemala). International Workshop «Karst Hydrology of the Caribbean Region», La Havana, Cuba, December 5–12, 1982 (sous le patronage de l'UNESCO) (à paraître).

Organisation du projet, remerciements
Nous remercions l'«Instituto Nacional de Electrificación» (INDE), maître d'œuvre de l'aménagement hydro-électrique Pueblo Viejo-Quixal, et particulièrement la direction de l'INDE, de sa coopération et son assistance.
Le projet Pueblo Viejo-Quixal a été élaboré, et la construction de l'aménagement supervisée par un consortium constitué par les trois compagnies suivantes: Lahmeyer International GmbH, chef de file du consortium, Motor-Columbus Ingénieurs-Conseils SA et International Engineering Company Inc.
A côté du projet du barrage et de la galerie d'amenée de 26 km, Motor-Columbus a été chargée du programme de recherches géologiques et hydrogéologiques du début de la phase des études jusqu'à la phase de construction.

Texte préparé d'après un exposé présenté à la journée d'étude «Constructions souterraines» du Groupement suisse de la géologie de l'ingénieur, Zurich, le 23-9-1983.

Adresse de l'auteur: *Jean-Pierre Tripet,* Dr sc., hydrogéologue principal, Motor-Columbus Ingénieurs-Conseils SA, Parkstrasse 27, CH-5401 Baden/Suisse.

Le nouveau tunnel de cavitation

de l'Institut de machines hydrauliques et de mécanique des fluides à l'EPFL

Pierre Henry

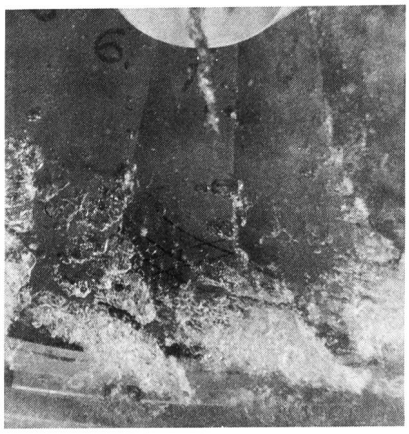
1. Description du phénomène

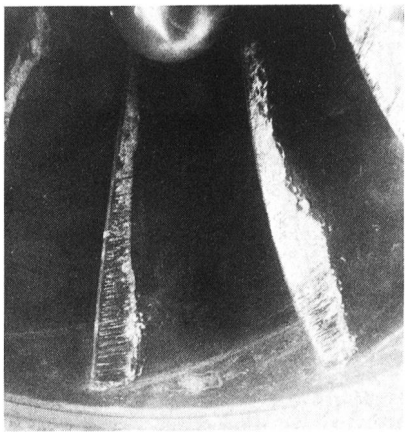
La cavitation est une ébullition de l'eau due à un abaissement de la pression, généralement à température normale (10 à 20°). La formation de bulles de vapeur dans un liquide peut en effet se produire de deux manières différentes:
– Augmentation de la température à pression constante (ébullition)
– Diminution de la pression à température constante (cavitation).

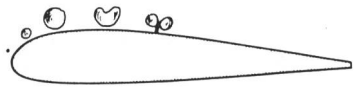
Dans le cas de l'ébullition, les bulles apparaissent dans le liquide et leur diamètre augmente d'une manière progressive, alors que dans le phénomène de cavitation, cette augmentation se produit de manière explosive lorsque la pression baisse en dessous d'un certain seuil.
Le phénomène de cavitation se présente sous plusieurs aspects distincts. Nous décrirons les deux principaux, qui sont la cavitation à bulles séparées et la cavitation à poche.
La *cavitation à bulles séparées* se présente sous forme de cavités isolées. Ces cavités (bulles) sont initiées à partir de germes contenus dans le liquide. Les germes sont des microbulles de gaz (en général il s'agit d'air libre ou fixé sur des particules solides). Les bulles se déplacent avec le fluide. Elles prennent naissance dans la zone de pression minimale, croissent dans la zone de pression faible puis disparaissent en implosant lorsque la pression remonte. La figure 1 montre l'aspect typique des bulles à la sortie d'une turbine Francis.
La *cavitation à poche* a l'aspect d'une cavité unique attachée à une paroi solide. Le contour de la poche est stable à l'amont et très fluctuant à l'aval. Cette forme de cavitation se développe en général sur le bord d'attaque des profils, à l'entrée des roues de pompes et de turbines. La figure 2 illustre une cavitation à poche à l'entrée d'une roue de pompe-turbine.

2. Effets néfastes de la cavitation

L'implosion brutale des bulles de cavitation provoque des dégâts lorsqu'elle se produit près d'une paroi. En outre, le phénomène de cavitation s'accompagne d'autres effets néfastes tels que bruit important, vibrations et diminution des performances des machines hydrauliques.
Le mécanisme d'érosion est loin d'être entièrement élucidé.
La figure 3 montre l'évolution du phénomène de la cavitation à bulles. Un germe (microbulle d'air d'environ 50 μm) pénétrant dans une zone à basse pression, augmente brutalement de diamètre pour donner naissance à une bulle de cavitation. Lorsque cette bulle arrive dans une zone de pression plus élevée, elle se déforme et donne naissance à un microjet animé d'une très haute vitesse. Ce jet provoque un petit cratère, illustré par la figure 4. Cette photo a été prise au microscope à balayage sur un échantillon de laiton placé sur une roue modèle de turbine Francis.







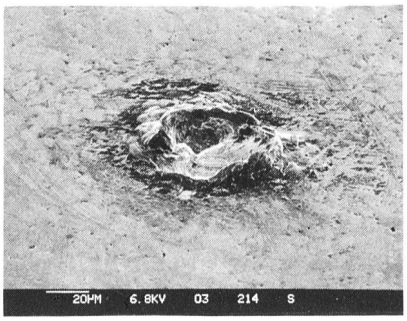


Figure 1, a gauche. Bulles de cavitation à la sortie d'une roue d'un modèle réduit de turbine Francis.

Figure 2, au milieu. Cavitation à poche à l'entrée d'une roue d'un modèle réduit de pompe turbine, fonctionnant en pompe.

Figure 3, à gauche en haut. Schéma illustrant la cavitation à bulles avec, de gauche à droite, la phase de grossissement de la bulle puis l'implosion et la formation d'un microjet.

Figure 4, à gauche, en bas. Photographie au microscope électronique à balayage, d'un cratère provoqué par l'implosion d'une bulle sur un échantillon de laiton, placé sur une roue modèle de turbine Francis.