

## **Travaux d'injection autour de la nouvelle centrale souterraine de Veytaux**

1. Olivier Müller, *STUCKY SA, Renens, Suisse*
2. Jean-Marc Fasel, *NORBERT SA, Lausanne, Suisse*
3. Alexandre Wohnlich, *STUCKY SA, Renens, Suisse*

### **Résumé**

Suite au besoin croissant en énergie de pointe et d'énergie de réglage, les Forces Motrices Hongrin-Léman (FMHL, Suisse) ont décidé d'augmenter la puissance de pompage-turbinage de leurs installations (projet FMHL+). Les actionnaires de la société FMHL+ sont Romande Énergie SA, ALPIQ Suisse SA, Groupe E et Ville de Lausanne. Le projet et l'exécution de l'ouvrage sont dirigés par ALPIQ Suisse SA, qui a attribué le mandat d'ingénieur au consortium GIHLEM, constitué des bureaux d'études STUCKY, EDF-CIH et Emch & Berger.

Ainsi, une nouvelle caverne souterraine est réalisée à côté de la centrale existante de Veytaux, permettant d'accueillir deux nouveaux groupes et faisant passer la puissance disponible de 240 MW à 420 MW avec 60 MW de réserve.

La nouvelle caverne a une longueur de 100 m, une largeur de 26 m et une hauteur de 56 m, dont 35 m situés dans la nappe fissurale, en connexion hydraulique avec le lac Léman qui constitue le niveau de base. Le massif rocheux est constitué de calcaires marneux durs en gros bancs à intercalations de calcschistes et de schistes argileux du Bajocien. La fracturation du massif rocheux est à considérer comme isotrope et détermine une perméabilité de l'ordre de  $10^{-4}$  m/s.

Afin de limiter les débits d'infiltration lors de l'excavation de la caverne et de réduire les besoins en pompage en phase d'exploitation, un voile d'injection de 10 m d'épaisseur a été réalisé autour de la caverne. Un coulis d'injection eau-ciment a été utilisé et les injections se sont déroulées selon la méthode GIN, avec des séries d'injection primaires, secondaires et tertiaires. L'excavation de la caverne a été achevée fin janvier 2014 et il est constaté que les venues d'eau sont faibles et conformes aux attentes.

### **Abstract**

In line with the growing need for peak and regulation power, the Forces Motrices Hongrin-Léman (FMHL, Switzerland) have decided to increase the pump storage power of their power plant (FMHL+ project). The Owners of FMHL+ project are Romande Energie SA, ALPIQ Suisse SA, Groupe E and City of Lausanne. The project and its implementation are led by ALPIQ Suisse SA, which awarded the project design to the GIHLEM consortium, consisting of STUCKY, EDF-CIH and Emch & Berger engineering companies.

In this regard, a new underground powerhouse is being build next to the existing powerhouse of Veytaux, allowing the installation of two new units and thus, increasing the existing capacity to 480 MW with maximal output power set to 420 MW with 60 MW of reserve.

The new cavern is 100 m long, 26 m wide and 56 m high, of which 35 m are below the ground water table, in hydraulic connection with Lake Lemman which is the lower reservoir. The rock mass is composed of hard, thickly bedded marly limestones from the Bajocian, with calcareous schist and clayey schist horizons.

The rock mass fracturing can be considered isotropic and defines the in situ permeability which is in the range of  $10^{-4}$  m/s.

In order to limit the leakage during the excavation works and decrease the dewatering pumping capacity required during operation, a 10 m thick grout curtain has been carried out around the cavern. A water-cement grout mix was used and a grouting process according to the GIN method was used, with primary, secondary and tertiary holes. The excavation works, completed at the end of January 2014, showed that the leakage is low and in accordance with the design.

# Travaux d'injection autour de la nouvelle centrale souterraine de Veytaux

1. Olivier Müller, *STUCKY SA, Renens, Suisse*
2. Jean-Marc Fasel, *NORBERT SA, Lausanne, Suisse*
3. Alexandre Wohnlich, *STUCKY SA, Renens, Suisse*

## 1 Introduction

Suite au besoin croissant en énergie de pointe et d'énergie de réglage, les Forces Motrices Hongrin-Léman (FMHL, Suisse) ont décidé d'augmenter la puissance de pompage-turbinage de leurs installations (projet FMHL+). Les travaux ont débuté en 2011; une nouvelle usine souterraine est réalisée à côté de la centrale existante de Veytaux, permettant d'accueillir deux nouveaux groupes et faisant ainsi passer la puissance disponible de 240 MW à 420 MW, avec 60 MW de réserve.

La nouvelle caverne, d'une hauteur de 56 m dont 35 m situés dans la nappe fissurale, est en connexion hydraulique directe avec le lac Léman. Afin de limiter les débits d'infiltration lors de l'excavation de la caverne et de réduire les besoins en pompage en phase d'exploitation, un traitement du massif rocheux par injection a été réalisé autour de la caverne. Cet article présente les détails d'exécution de ces travaux d'étanchement ainsi que les résultats obtenus.

## 2 Description de l'aménagement

L'aménagement de pompage-turbinage existant de Veytaux 1 est en fonction depuis 1971. Il est constitué du barrage de l'Hongrin, de la galerie d'amenée, de la cheminée d'équilibre, du puits blindé et de l'usine de Veytaux, selon l'illustration de la Figure 1.



Figure 1. Situation de l'aménagement de pompage turbine de Veytaux 1

Les 52 millions de m<sup>3</sup> d'eau de la retenue de l'Hongrin sont turbinés à l'issue de près de 8 km de conduite d'un diamètre de 2.9 à 4.0 m dans l'usine souterraine de Veytaux. Le débit de turbinage est de 32 m<sup>3</sup>/s. Située au bord du lac Léman, non loin du Château de Chillon, la centrale de Veytaux est équipée de quatre groupes hydroélectriques d'une puissance totale de 240 MW permettant de produire l'énergie électrique nécessaire durant les périodes de forte consommation. La production annuelle moyenne d'énergie est de 530 mio kWh/an.

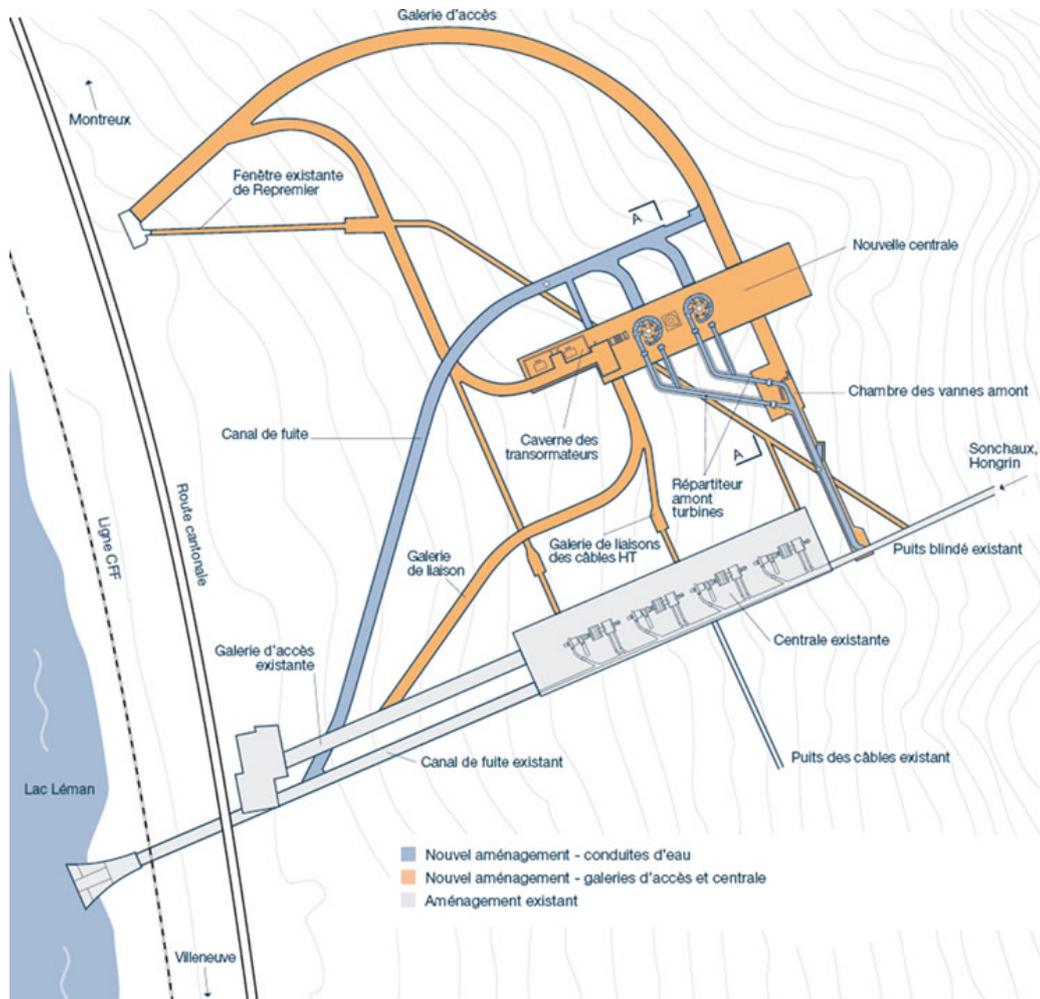
Durant les périodes creuses, lorsque la production d'électricité est supérieure à la consommation, l'énergie excédentaire peut être stockée sous forme hydraulique dans la retenue du barrage. Les pompes de la centrale peuvent prélever jusqu'à 24 m<sup>3</sup>/s d'eau du lac Léman pour la refouler quelque 800 m plus haut dans la retenue de l'Hongrin en utilisant les mêmes conduites que lors du turbinage.

Le besoin croissant en énergie de pointe et énergie de réglage, nécessaire pour adapter la production d'électricité à la demande, a incité le Conseil d'administration des FMHL à augmenter la puissance de pompage-turbinage de l'aménagement existant.

Pour cela, une nouvelle caverne est réalisée dans la montagne à côté de la centrale existante de Veytaux permettant d'accueillir deux nouveaux groupes de pompage-turbinage de 120 MW chacun.

Cette nouvelle centrale, raccordée en parallèle à la centrale existante, utilise les mêmes infrastructures hydrauliques (barrage de l'Hongrin, puits et conduites forcées, prise d'eau dans le lac Léman).

La situation de la Figure 2 présente les aménagements existants et nouveaux du projet.



La puissance à disposition sera ainsi portée à 480 MW, dont 420 MW en service et 60 MW de réserve. En outre, le projet comprend également la construction d'une nouvelle cheminée d'équilibre à Sonchaux (Figure 1) et la modernisation du poste électrique de Veytaux.

### 3 Géologie et hydrogéologie

Le site de Veytaux se trouve dans les Préalpes Médiannes plastiques, au fond d'une gouttière synclinale constituée des calcaires du Dogger.

La roche en place est formée de calcaires marneux durs en gros bancs à intercalations de calcschistes et de schistes argileux du Bajocien. Les bancs calcaires prédominent largement (80% à 90%) sur les schistes argilo-calcaires (10% à 20%).

Le profil en long géologique est illustré à la Figure 3 ci-après.

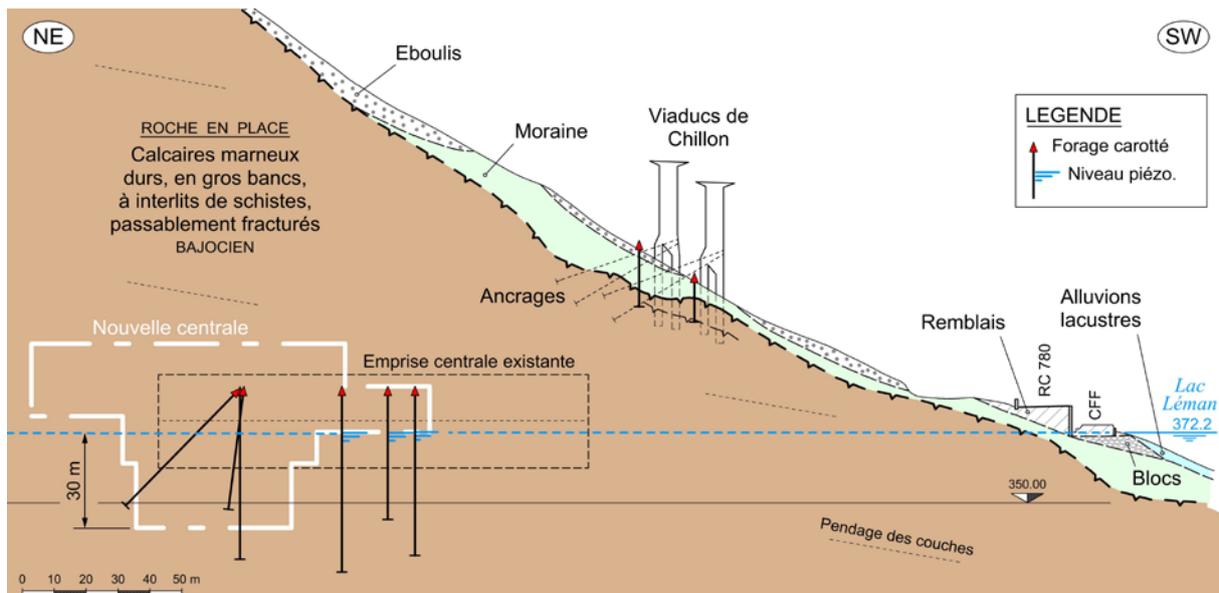


Figure 3. Profil en long géologique

L'épaisseur des bancs est comprise entre 0.1 et 1.0 m, exceptionnellement 1.5 m. Les joints de stratification sont presque toujours soudés (forte liaison entre les couches). Les couches plongent faiblement de 10-20° vers le SE, le S ou le SW.

Sur le plan géomécanique, les calcaires présentent un GSI moyen compris entre 50 et 60 et une résistance à la compression de la matrice intacte non confinée ( $\sigma_{ci}$ ) comprise entre 170 et 190 MPa.

Le massif rocheux est découpé par trois systèmes de fractures, assez redressés, dont aucun n'est prédominant. Quelques rares zones broyées sont présentes (kakirites).

Les essais de fracturation hydraulique pour la mesure des contraintes in situ ont montré que la pression moyenne à l'origine de la formation de nouvelles fractures est de 6.7 MPa, et de 3.2 MPa pour la réouverture des fractures existantes.

Le massif rocheux est le siège d'une nappe d'eau souterraine fissurale, dont les niveaux dépendent du lac Léman. Il existe, en conditions naturelles, un très faible gradient de 0.5% en direction du lac.

La perméabilité du massif rocheux est assez élevée. Les essais de pompage d'une durée de 24 h ont montré des perméabilités à l'échelle du massif de l'ordre de  $10^{-4}$  m/s. Les excavations n'ont pas montré de signes de karstification.

#### 4 Objectifs des travaux d'injection

Une partie des ouvrages projetés visant à augmenter la puissance de l'aménagement Hongrin-Léman se situe sous le niveau de la nappe fissurale du massif de Veytaux qui correspond au niveau du lac Léman. La nouvelle centrale de Veytaux 2, prévue avec deux groupes ternaires à axe vertical, se caractérise notamment par une partie située à plus de 30 m sous le niveau du lac.

Concernant la perméabilité du massif rocheux injecté, il a été admis que l'objectif des injections serait d'atteindre une valeur de perméabilité de 5 Unité Lugeon (Lu) à l'état final. Une telle valeur correspond à une perméabilité du massif rocheux injecté de  $k= 6 \times 10^{-7}$  m/s.

Une modèle numérique aux éléments finis a permis d'estimer les débits d'infiltration dans la caverne en fonction de l'épaisseur du voile d'injection. Les résultats ont montré que jusqu'à 8 m d'épaisseur, il y a une relation significative entre l'épaisseur du voile d'injection et les débits d'infiltration. Ensuite, au-delà de 8 m d'épaisseur de voile, l'influence sur les débits d'infiltration diminue sensiblement.

Au final pour le projet d'exécution, une voile d'étanchéité de 10 m d'épaisseur a été retenu. Un tel voile doit limiter le débit d'infiltration à environ  $20 \text{ m}^3/\text{h}$  pendant les travaux et durant l'exploitation de la centrale.

## 5 Caractéristiques des travaux d'injection

Les diverses caractéristiques des travaux d'injection réalisés autour de la caverne principale sont présentées ci-après.

### 5.1 Méthodologie d'injection

Les injections de la caverne principale se sont déroulées selon la méthode du split-spacing. Les forages sont réalisés en éventail et sont disposés de manière à assurer une épaisseur du voile d'étanchéité de 10 m autour et en dessous de l'excavation. Des éventails primaires (série A - espacement 8 m), secondaires (série B - espacement 8 m) et tertiaires (série C - espacement 4 m) ont été systématiquement réalisés, réduisant ainsi la distance entre éventails à 2 m. Au sein d'un même éventail de forage, à mi-épaisseur du voile d'injection, les forages adjacents sont également distants de 2 m l'un de l'autre, ce qui induit au final une maille systématique de 2 m x 2 m sur l'ensemble du voile d'étanchéité autour de la caverne. Localement, lorsque les absorptions ont été plus importantes, des forages isolés de série quaternaire (série D) ou quinaire (série E) ont été nécessaires.

### 5.2 Paramètres d'injection

La méthode du Grout Intensity Number (Méthode GIN) a été utilisée. Les injections ont été principalement effectuées par passes ascendantes de 5 m. Cependant, lorsque des pertes d'eau totales ont été observées en cours de forage, l'injection s'est faite par passes descendantes.

Les paramètres GIN utilisés pour les injections ont été les suivants:

- Grout Intensity Number:  $GIN = 1'500$
- Volume maximal:  $V_{max} = 200 \text{ kg/m}$ , soit 1027 litres de coulis par passe de 5 m.
- Pression maximale:  $P_{max} = 25 \text{ bars}$  dès 25 m de profondeur.

L'injection avec le coulis A était arrêtée lorsque la pression correspondante était maintenue pendant une minute. En cas de volume maximal atteint sans montée en pression, un coulis plus visqueux a ensuite été utilisé (coulis B). Si le volume maximal était à nouveau atteint sans mise en pression, un mortier d'injection (coulis C) était prévu. Le recours à un coulis C ne s'est avéré nécessaire qu'à une seule reprise dans la caverne.

Tous les paramètres d'injection étaient automatiquement enregistrés et permettaient une exploitation des résultats en temps réel. En particulier, le cheminement d'injection (volume x pression) avec la courbe GIN était observable à la station d'injection. L'arrêt des injections était déclenché de manière automatique par le programme lorsque les critères de fin d'injection définis au préalable étaient atteints. La Figure 4 ci-contre montre un exemple d'une passe d'injection ayant été arrêtée en interceptant la courbe GIN.

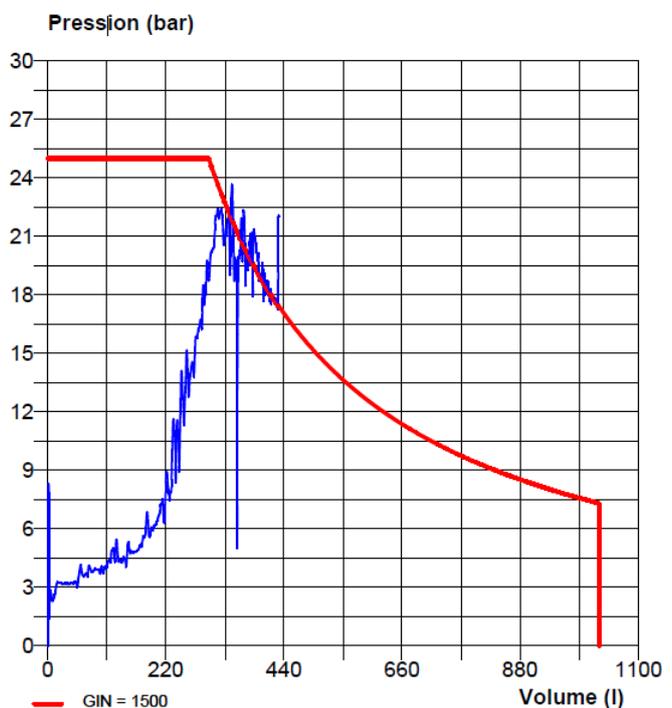


Figure 4. Exemple de courbe P-V lors d'une injection

### 5.3 Types de coulis

Les propriétés des trois types de coulis utilisés sont répertoriées dans le Tableau 1 suivant.

**Tableau 1. Type et propriétés des coulis utilisés**

coulis	E/C [-]	adjuvant [%]	viscosité Marsh [s]	décantation à 2h [%]	densité [-]
coulis A	0.70	0.7	30-33	1.5	1.60
coulis B	0.70	-	38-40	1.0	1.67
coulis C	Mortier d'injection		Ne passe pas	0	1.95

Durant les travaux, ces différentes caractéristiques étaient contrôlées de manière quotidienne, au minimum une fois par poste de travail.

## 6 Exécution des travaux

### 6.1 Plot d'essai

Un plot d'essai a été réalisé au début des travaux dans la caverne du canal de fuite, dans une zone de 12 m de longueur et 6 m de largeur. Il a nécessité la réalisation de 21 forages destructifs d'une longueur de 32 m où ont été effectués des essais d'injection ainsi qu'un forage carotté de contrôle.

Sur le plan géologique, la zone testée est représentative du massif rocheux (fracturation moyenne, RQD d'environ 70%) et de sa tranche saturée.

Des essais de pompage ont confirmé une perméabilité importante, supérieure à  $10^{-4}$  m/s dans le massif non injecté et une forte réduction de la perméabilité obtenue seulement au terme des injections quaternaires ( $< 10^{-6}$  m/s).

L'absorption de coulis de ciment dans les injections primaires était de 92 kg/m et elle s'est réduite à 44 kg/m dans les injections tertiaires systématiques et même à 12 kg/m dans les forages quaternaires.

### 6.2 Canal de fuite

Les injections du canal de fuite se sont déroulées avant les injections de la caverne principale. Le canal de fuite, d'une longueur de 240 m, a une hauteur de 9 m, dont 6 m en dessous du niveau de la nappe fissurale. Il a été excavé en deux demi-étapes, permettant ainsi de réaliser depuis la première étape une voile d'injection de 5 m autour de la partie basse du canal.

Il s'est avéré que l'espacement de 3 m entre éventails de forage et entre forages dans un même éventail n'était pas suffisant, étant donné que la série d'injection quaternaire a dû systématiquement être réalisée. Ceci s'inscrit dans la continuité des résultats obtenus lors de la réalisation du plot d'essai.

Suite à ce constat, le projet d'exécution pour la caverne a été adapté, en passant d'un maillage initialement prévu de 3 m x 3 m (1 forage/9 m<sup>2</sup>) à un maillage resserré de 2 m x 2 m (1 forage/4 m<sup>2</sup>).

### 6.3 Caverne principale

#### 6.3.1 Forages de reconnaissance

Avant le début des injections dans la caverne principale, cinq forages carottés, d'une quarantaine de mètres de longueur, ont permis de préciser et vérifier les conditions géologiques au droit du voile d'injection avant sa réalisation et confirment l'absence de karst.

Le massif rocheux, d'un RQD moyen compris entre 70% et 95%, est parcouru de nombreuses discontinuités, en particulier des:

- Joints de stratification le plus souvent fermés
- Diaclases et fractures soudées par la calcite
- Fractures à remplissages limoneux ou argileux, d'une épaisseur maximum de 50 mm
- Fractures présentant des ouvertures de 15 mm maximum, souvent oxydées, hydrauliquement conductrices. L'ouverture est indépendante du système de fractures.

Les zones très fracturées, susceptibles de provoquer des éboulements dans les forages d'injection lors de l'introduction des packers, constituent le plus souvent moins de 10% des longueurs forées.

L'intensité de la fracturation est moins importante sur le parement Sud.

Les scans optiques confirment que la direction retenue pour les auréoles d'injection permet de recouper au mieux les 3 systèmes de fractures présents.

L'examen des scans optiques pour les passes testées par des essais Lugeon révèle un modèle cohérent:

- 5 à 15 Lu: fractures ouvertes rares, quelques mm au maximum
- 15 à 50 Lu: présence de fractures ouvertes de quelques mm, max. 10 mm
- > 100 Lu: zone fracturée, comportant plusieurs discontinuités d'une ouverture importante, pouvant aller jusqu'à 15 mm.

### 6.3.2 Forage de contrôle

A la fin des injections, un forage carotté de 50 m de longueur a permis de vérifier visuellement la présence de coulis dans les fractures. Les essais de perméabilité ont révélé des valeurs inférieures à 1 Lu dans la tranche injectée du massif.

### 6.3.3 Réalisation des travaux

Le voile d'étanchéité de 10 m d'épaisseur a été réalisé à partir de différents axes au droit d'un même éventail, selon Figure 5 ci-contre.

Dans chaque éventail, des séquences d'injection ont été respectées afin de ne pas intercepter de forages adjacents non injectés lors d'un forage. Tous les forages réalisés à partir du même axe étaient de même séquence.

Le voile a été disposé de manière à former une "baignoire" tout autour de la caverne, s'étendant au moins 3 m au-delà des ancrages passifs, afin d'éviter que ceux-ci ne fassent office de drains.

Les forages les plus longs, situés en dessous de la caverne, ont une longueur de 49 m, et seules les deux ou trois dernières passes de 5 m ont été injectées.

En revanche, dans les éventails situés aux extrémités de la caverne, les injections par passe ont été réalisées sur toute la hauteur du forage.

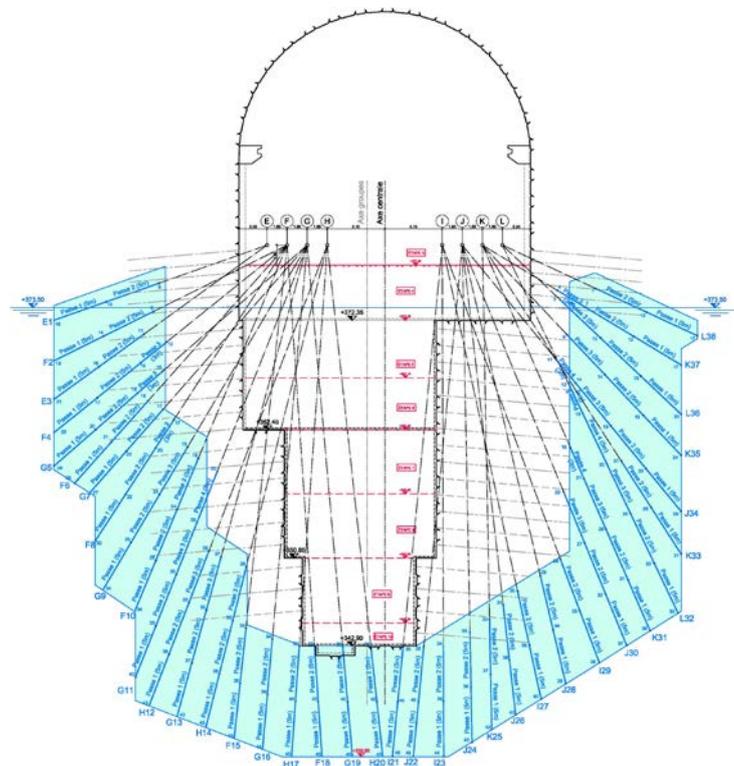


Figure 5. Exemple d'un éventail d'injection

## 6.4 Résultats des travaux d'injection

Le Tableau 2 suivant synthétise les résultats des injections réalisées autour de la caverne principale.

**Tableau 2. Caverne principale - résultats des injections**

Série	quantité de ciment injectée [t]	longueur totale injectée [m]	absorption [kg/m]	facteur de réduction [%]	pression maximale atteinte [%]
Série A	556	7'319	76		59%
Série B	483	10'363	47	61%	71%
Série C	510	20'749	25	53%	83%
Série D	96	1'818	53	215%	70%
Série E	17	400	42	80%	76%
TOTAL	1'662	40'649	41	-	-

Pour rappel, les éventails de séries A, B et C ont été réalisés partout autour de la caverne.

Une diminution de l'absorption entre séries est observée, avec des facteurs de réduction B/A ou C/B d'un ordre de grandeur tout à fait attendu pour ce genre de travaux, témoignant de la bonne adéquation entre le massif rocheux et la méthodologie d'injection utilisée.

La proportion des passes d'injection qui ont pu être arrêtées par le critère de pression maximale a également sensiblement augmenté avec les séries, avec plus de 80% des passes se terminant en pression lors de l'exécution des injections de série C.

Il est également rappelé que les forages localisés de séries D et E n'ont été réalisés que dans les zones où l'absorption a été plus importante. C'est pour cela que les absorptions des forages des séries D et E sont plus importantes que celle de la série C.

## 6.5 Perméabilité après injection et venues d'eau

Le Tableau 3 suivant fournit les principales statistiques concernant les résultats des essais Lugeon, réalisés avec les cinq paliers de pression suivants: 5 bars / 7.5 bars / 10 bars / 7.5 bars / 5 bars.

**Tableau 3. Résultats des essais Lugeon à 5 paliers de pression**

type de forage	nombre d'essais [-]	moyenne [Lu]	écart-type [Lu]	fractile 5 Lu [%]
Forages de reconnaissance	16	95.9	137.7	25.4
Forages de série C	44	2.2	4.0	75.5
Forages de contrôle	21	1.3	1.1	99.9

Les forages de reconnaissance ont été effectués dans le rocher non-injecté, par carottage.

Les essais Lugeon de série C sont des essais qui ont été intégrés au programme de forage et d'injection de série C et ont été réalisés à l'avancement (en passes descendantes) ou dans le forage carotté de contrôle. Les forages de contrôle ont été réalisés en mode destructif, tout à la fin des injections, dans les zones où l'absorption a été la plus forte.

Il est relevé qu'après les forages de série C, la moyenne des essais Lugeon était inférieure à 5 Lu, mais que le fractile correspondant, c'est-à-dire le nombre d'essais en dessous de cette valeur, était de 75%. En extrapolant ce résultat, il peut être admis qu'il y avait donc encore 25% de zones avec des perméabilités supérieures à 5 Lu.

Les forages et injections de série supplémentaire, localement, ont permis de sensiblement augmenter le fractile correspondant à 5 Lu, avec pratiquement 100% de valeurs en dessous de 5 Lu.

Le Tableau 4 ci-dessous résume les hypothèses, estimations ou observations concernant les débits d'infiltration. La photo ci-contre (Figure 5) illustre l'état à la fin des excavations.

**Tableau 4. Caverne principale - infiltrations**

Estimation	Perméabilité [m/s]	Valeur Lugeon [Lu]	Infiltrations [l/s]
rocher non-injecté	$1.3 \times 10^{-4}$	> 1000 Lu	324
après injection	$6 \times 10^{-7}$	5 Lu	6
Observations		< 5 Lu	<< 5



**Figure 5. Photo de la fosse de la caverne à la fin des excavations**

La dernière volée de l'excavation de la caverne a eu lieu le 22 janvier 2014. L'eau présente en fond de fouille provient principalement de l'eau de chantier ou des infiltrations météorites en voûte de la caverne, donc au-dessus de la nappe fissurale.

L'eau d'infiltration qui percole à travers le voile d'injection est très limitée et ne dépasse pas 5 l/s. Ceci démontre que le voile d'étanchéité réalisé dans la cadre du projet FMHL+ a pleinement atteint les objectifs fixés initialement.

## 7 Conclusions

Dans le cadre de l'augmentation de puissance (de 240 MW à 420 MW avec 60 MW de réserve) de l'aménagement de pompage-turbinage de Hongrin-Léman en Suisse, une nouvelle centrale souterraine est construite à côté de la centrale existante datant du début des années 1970. La nouvelle caverne principale, d'une longueur de 100 m, largeur 26 m et de hauteur 56 m, dont 35 m localisés sous la nappe fissurale, est excavée dans un massif rocheux constitué principalement de calcaires marneux. Pour limiter les débits d'infiltration lors des travaux de construction et réduire les besoins en pompage en phase d'exploitation, un traitement d'étanchement du massif rocheux au coulis de ciment est réalisé sur une profondeur de 10 m autour de la centrale.

Les travaux d'injection, réalisés suivant la méthode du split-spacing et l'application du GIN, ont été menés durant 5 mois principalement suivant 3 séries primaire, secondaire et tertiaire (maille finale d'environ 2 m x 2 m). L'absorption moyenne de ciment a été de 41 kg/m de forage. Les résultats obtenus à l'issue du traitement sont très satisfaisants, avec des valeurs d'essais Lugeon réalisés après injection autour de 2 Lu et des infiltrations totales de l'ordre de 5 l/s.

## 8 Remerciements

Les auteurs remercient ALPIQ Suisse SA, représentant de FMHL+, Maître d'Ouvrage, pour avoir autorisé la publication de cet article.

## 9 Références

FMHL, 2014. Site internet [www.fmhl.ch](http://www.fmhl.ch)