

LE TUNNEL DE BASE DU LOETSCHBERG – LES PREMIERS ENSEIGNEMENTS APRES PRESQUE UNE ANNEE D'EXPLOITATION

François Vuilleumier, BG Ingénieurs Conseils SA Lausanne

1 - LE PROJET

Le tunnel de base du Lötschberg va de Frutigen, à 780 m d'altitude dans le Kandertal (à l'amont de Thoun, canton de Berne) à Rarogne, à 650 m dans la vallée du Rhône (près de Brigue, canton du Valais), avec une courte branche de raccordement vers Sion et Lausanne (voir figure 1).

Reconnaitances : le tunnel traverse du nord au sud une zone de nappes sédimentaires plissées (nappes du Wildhorn et du Doldenhorn), avant le massif cristallin de l'Aar et sa couverture sédimentaire au sud. Une galerie de reconnaissance de 9,4 km a été creusée au tunnelier dans le sédimentaire de Frutigen jusqu'au droit de Kandersteg entre 1994 et 1996, 27 forages profonds (d'une longueur totale d'environ 20 km) ont permis de préciser divers points critiques.

Creusement : le creusement s'est fait à partir de cinq chantiers, les deux portails principaux, plus le portail de Steg, et les galeries de Mitholz et Ferden, au total 11 attaques, ce qui a limité les tronçons à 10 km environ en procurant au programme des travaux une grande flexibilité; les premiers percements ont eu lieu le 14 décembre 2002, le 14 mai et le 29 novembre 2003; le dernier le 28 avril 2005.

Deux tunneliers ont creusé à partir de Steg et de Rarogne; l'explosif est employé sur les autres avancements (fig. 2)

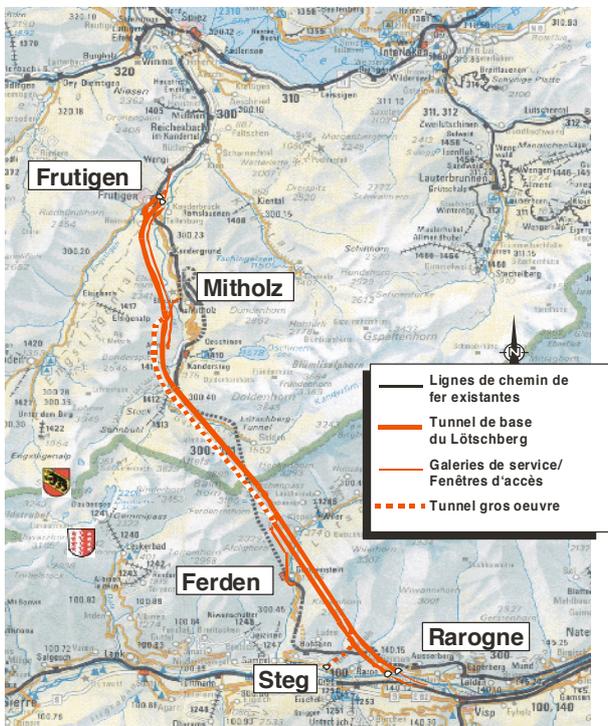


Figure 1 – Tracé du tunnel

Sa longueur est 34,6 km, pour l'essentiel à deux tubes à voie unique (un seul tube pour l'instant sur les 10 km plus au nord); son gabarit européen, pour une vitesse de trains de voyageurs à grande vitesse, lui confère un diamètre excavé de 9,43 m dans les tronçons au tunnelier, et une section entre 62 et 78 m² pour la plus grande partie, qui est creusée à l'explosif. Le tracé suit d'abord par sa rive gauche la vallée de la Kander où il bénéficie d'une couverture réduite et d'un accès par la galerie inclinée de Mitholz, longue de 1,5 km; après avoir franchi le cœur de la chaîne, il passe sous le Lötschental avec un accès par la longue galerie inclinée de Ferden (4,1 km). Les portails sont à 780 et 660 m d'altitude, le point haut à 825 m, les rampes de part et d'autre 3 et 11 %.

Sécurité : la sécurité est un aspect très important du projet : les deux stations de secours ont été construites, l'une à Mitholz, l'autre au voisinage de Ferden, environ 700 m au-dessous du niveau de la vallée, afin de gérer ventilation et désenfumage en cas d'incendie et de recevoir les passagers. Les deux tubes sont reliés par des galeries transversales tous les 333 m.

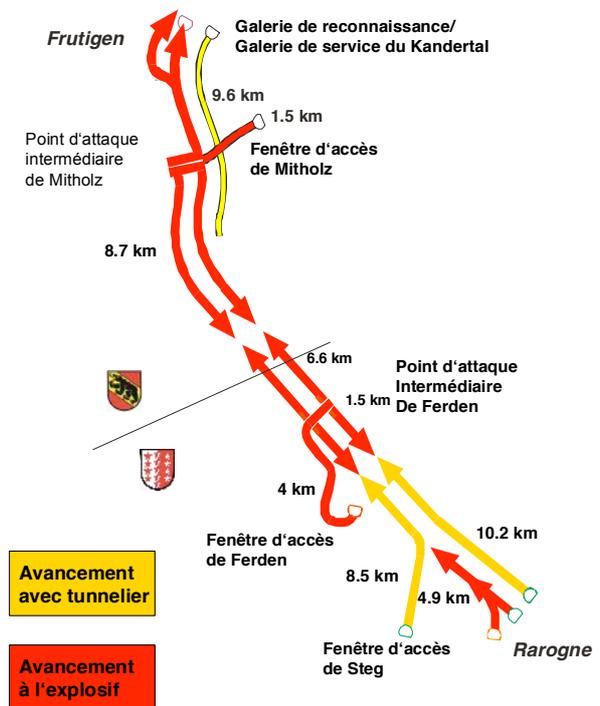


Figure 2 - Creusement

2 – PROGRAMME DES TRAVAUX

Le programme des travaux est donné sur la fig. 12.

Les dates principales sont les suivantes :

- fin des excavations (percements de la partie centrale entre Mitholz et Ferden) : 28.04.2005,
- fin des bétonnages : juin 2006,
- fin de l'équipement ferroviaire : fin 2006,
- test avec matériel roulant et réception des ouvrages : mai 2006 à novembre 2007,
- mise en service : décembre 2007

3 - PRÉVISIONS GÉOLOGIQUES, GÉOMÉCANIQUES ET HYDROGÉOLOGIQUES AU STADE DE PROJET ET DE L'APPEL D'OFFRES DES TRAVAUX

Les très nombreux travaux de reconnaissance réalisés avant l'appel d'offres des travaux avaient permis de relever les aspects et difficultés suivantes pour le creusement du tunnel (fig. 3) :

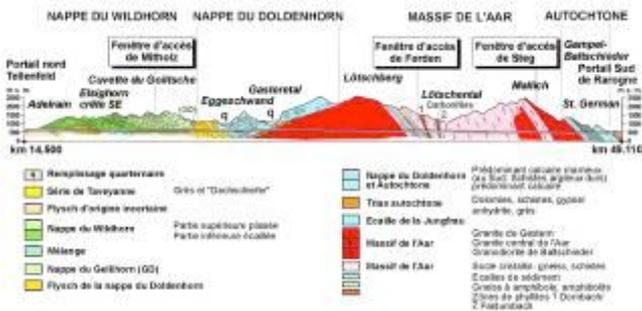


Figure 3 – Coupe géologique du tunnel

- les roches rencontrées sur plus de 95 % de la longueur sont des roches compétentes dont le soutènement léger peut être assuré par ancrages et béton projeté;
- les Gneiss, Granites du massif de l'Aar sont des roches très compactes, dures et abrasives;
- les mêmes roches sous forte couverture peuvent être sujettes à des phénomènes de décompression violente (Bergschlag);
- de fortes venues d'eau (karst) peuvent être rencontrées dans les calcaires de la nappe du Doldenhorn;
- les débits prévus au nord étaient estimés à 340 l/s, ceux du sud à 180 l/s;
- en ce qui concerne les zones géomécaniquement difficiles, le tableau suivant donne leurs épaisseurs prévue et rencontrée :

	Prévu [m]	Réel [m]
Autochtone Nord	400	400
Jungfrau	0 – 40	30
Dornbach	150	130
Faldumbach	0 – 30	50
Karbon	0 – 40	6
Trias Raron	90	130

il s'agit de zones très déformables qui peuvent engendrer des difficultés d'excavation (stabilité du front et de fortes convergences);

- dans l'écaïlle de la Jungfrau qui a été reconnues par trois forages inclinés de 1 400 m de longueur, de l'eau thermale a été détectée avec de forts débits, une température de 46 °C et une pression supérieure à 15 MPa.

4 – CONDITIONS GÉOLOGIQUES, GÉOMÉCANIQUES ET HYDROGÉOLOGIQUES RENCONTRÉES

4.1 Conditions générales

D'une manière générale les massifs rencontrés ont eu une tenue meilleure que prévue, un comportement élastique avec des convergences millimétriques sur plus de 80 % de longueur et un soutènement plus léger que prévu (presque une classe en dessous de la prévision). Par contre au sud, dans les Gneiss en particulier, il y a eu des fréquentes instabilités du front, de faible ampleur, mais très dangereuses pour les mineurs à cause de la hauteur de la section (plus de 9 m); il s'agit de chutes d'écaïlles d'environ 1 m² et de 10 cm d'épaisseur; ce phénomène a nécessité un boulonnage du front de manière plus systématique que prévu.

Les quantités d'eau rencontrées ont été également notablement plus faibles que prévu :

	Prévu [l/s]	Réel [l/s]
Débits Nord	340	130
Débits Sud	180	80 - 100

Dans le massif de l'Aar on n'a pas rencontré d'eau sur de très grandes longueurs et les peu de venues d'eau, de quelques litres par secondes, ont tari très rapidement.

Les calcaires karstiques de la nappe de Doldenhorn ont été reconnus à l'avancement de manière systématique par des forages carottés d'une longueur de 350 à 600 m réalisé dans le front, auxquels se sont ajoutés de la géophysique et de la tomographie, et ceci pour réduire au maximum les risques d'importantes venues d'eau (plusieurs m³/s) pronostiquées par les géologues.

Là encore les conditions rencontrées ont été nettement plus favorables que celles prévues.

Quelques zones aquifères ont été rencontrées à l'avancement, mais avec des débits de quelques centaines de litres par seconde. Une seule a nécessité un traitement à l'avancement par injection de coulis de ciment.

L'ensemble de ces conditions favorables indique qu'à grande profondeur (1 000 à 2 000 m de couverture) le massif du Lötschberg est très compact et fermé et très peu perméable.

Dans la zone des nappes dans la partie nord, du gaz méthane a été trouvé en beaucoup plus grande quantité que prévu. Ces venues de gaz, assez diffuses, n'ont pas entraîné de difficulté particulière pendant la construction; la ventilation du chantier avait en effet largement la capacité de diluer ces gaz en dessous des concentrations dangereuses. Par contre, elles compliquent l'exploitation. Toutes les parties de l'ouvrage doivent être ventilées avec certitude, notamment tout le réseau de drainage et les parties mortes de l'ouvrage.

4.2 Décompression violente (Bergschlag)

La couverture du tunnel atteint 2 000 m en deux points et dépasse 1 500 m sur plus de 9 km; le risque de décompression violente (phénomène appelé "rockburst" en anglais et "Bergschlag" en



Figure 6 – Ecaïlles

allemand) était donc relativement élevé. En supposant que l'état de contrainte dans le massif rocheux est gouverné par le poids du terrain davantage que par la tectonique, une modélisation 3D du volume a donné la direction verticale comme contrainte majeure. Cette hypothèse a été confirmée par des mesures de contraintes "in situ". La comparaison avec les phénomènes observés dans le

tunnel de façade et dans le tunnel du Mont Blanc a permis de définir quatre classes de risque et de faire le pronostic suivant :

- sur une longueur de 4,1 km le risque est très élevé (classe A : σ_{vert} plus grand que 130 MPa);
- sur 1,4 km il est élevé (classe B : σ_{vert} compris entre 120 et 130 MPa);
- sur 1,4 km il est moyen (classe C : σ_{vert} compris entre 110 et 120 MPa);
- et sur 300 m il est faible (classe D : σ_{vert} compris entre 100 et 110 MPa).

Voici ce qu'on a observé :

Excavation au TBM

Dans les cas de creusement au **tunnelier**, deux types de ruptures ont pu être identifiés :

a) la formation de blocs devant la tête du tunnelier, des blocs sans forme particulière, donnant un front à surface irrégulière sur lequel les molettes ne marquent leur trace que sur une faible part; dans quelques cas la formation de ces blocs tient à la présence de fractures chloriteuses; ils diminuent la pénétration des outils et le temps de travail de la machine (fig. 4 et 5);



Figure 4 – Formation de blocs devant la tête du tunnelier



Figures 5 - Blocs

b) la rupture en "pelures d'oignons" (fig. 6), qui commence au niveau du bouclier; de 0 et 4 m du front, les parois se desquament en écailles de peu d'épaisseur.

Sous forte couverture, deux entailles latérales symétriques apparaissent, jusqu'à 1 m de profondeur, qui gênent l'appui des "grippeurs". Alors que le géologue du projet attribue ces difficultés à l'accroissement de la fracturation, ces phénomènes ont été souvent remarqués dans des roches résistantes et massives. Quelques bruits violents ont été rapportés mais pratiquement pas de projections. La plus grande part de l'énergie est libérée à moins de 4 m du front. Les tunneliers ouverts sont adaptés à ce type de problème géologique.

Excavation à l'explosif

C'est dans la zone centrale des granites du Gastern, qui a été excavée à l'explosif, que les risques avaient été estimés les plus élevés. Dans cette zone, contrairement à toute attente, les manifestations de décompression violente ont été très faibles (quelques phénomènes acoustiques et quelques rares projections d'écailles de granite). Deux raisons pourraient expliquer cet état de fait :

- un état de contraintes naturelles moins déviatorique que celui du tunnel de façade; le tunnel de base est évidemment plus profond mais également plus éloigné des flancs de la vallée du Gastern;
- l'utilisation d'explosif liquide (émulsion) qui est un explosif très brisant qui aurait permis de libérer les contraintes.

4.3 Traversée de zones aquifères difficiles

Deux courtes traversées de terrains sédimentaires ont donné lieu à de grandes difficultés sur les deux tubes de la galerie et sur la galerie d'accès de Ferden (section 40 m²) :

- l'une comprend du Trias avec anhydrite, des calcaires et grès du Lias et du Dogger, et des shales (argilites) sur une épaisseur de 80 m, ainsi qu'une zone aquifère de 8 m en terrain dur mais avec 110 bars de pression d'eau;
- l'autre (Jungfrau, le "coin" de la Jungfrau) a une épaisseur de 40 m de Trias et Jurassique, avec peu d'eau, mais de même composition chimique que les sources thermales de Leukerbad (ou Loèche), ce qui laissait à penser que ce massif faisait partie de leur alimentation; on a donc prescrit de limiter le drainage par le tunnel à 1 litre par seconde. La teneur en sulfate et la température (2 g/l et 39,5 °C) ont imposé de strictes conditions aux injections nécessaires.

Les délais accordés au traitement de ces zones ont imposé une procédure rigoureuse : les forages destinés à l'injection d'étanchéité devaient servir aussi au drainage et aux essais. Le premier forage dans l'axe du tunnel mesure la pression de l'eau et la quantité à venir pendant la durée du traitement; on prévoit ensuite deux auréoles d'une vingtaine de forages, la seconde n'étant complétée que si la première n'est pas totalement efficace, une troisième en cas de besoin. La longueur des forages, entre 30 et 60 m était adaptée au pendage et à la direction de la stratification. Les machines de forage ont assuré une bonne précision et la première auréole débute 40 à 50 m avant l'entrée du tunnel dans la zone critique, les suivantes sont emboîtées d'une demi longueur.

Le traitement de ces deux zones a utilisé 172 forages (d'une longueur totale de 7 700 m) et 233 m³ de coulis adapté à l'épaisseur des fissures rencontrées (microciment et silicate de calcium), forage par forage. Pour la zone sédimentaire, la reconnaissance et l'approche ont duré 3,9 mois, le prétraitement 2,5 mois, la traversée 50 jours; pour le coin de la Jungfrau, le prétraitement a duré un mois, la traversée 20 jours. Le coût total est de 6,8 MCHF pour la zone sédimentaire, 1,6 pour le coin de la Jungfrau. Le débit mesuré avant l'injection, 8 l/s, est tombé à 3,3 l/s dans les 80 m de sédimentaire et à 0,2 dans les 40 m du Jungfrau.

4.4 Une surprise géologique

Les deux attaques depuis Mitholz ont traversé comme prévu les nappes du Wildhorn, du Gellihorn et du Doldenhorn puis l'Autochtone nord pour pénétrer ensuite dans les granites du Gastern.

Grâce à des caractéristiques géomécaniques des roches rencontrées meilleures que prévues et une entreprise extrêmement performante (avancement à l'explosif compris entre 12 et

18 m/jour), l'entreprise avait à ce moment plus de 8 mois d'avance sur le programme de travail.

Contre toute attente, l'avancement en direction du sud atteignit alors sous le flanc nord du Balmhorn des roches sédimentaires, et ceci après le percement de plus de 800 m de cristallin. Il s'agissait dans un premier temps de formations du Trias ainsi que du Lias avant d'atteindre après plus de 400 m, des formations encore plus anciennes datant du Carbonifère supérieur. Ce Carbonifère long de plus de 300 m est constitué de grès, de siltites et de schistes contenant des filons d'antracite.

Figure 7 – Pronostics optimiste et pessimiste

Dans la phase initiale du projet cette situation avait été retenue dans un pronostic dit "pessimiste" (figure 7) établi sur la base des affleurements de carbonifères dans les alpes occidentales (figure 8).

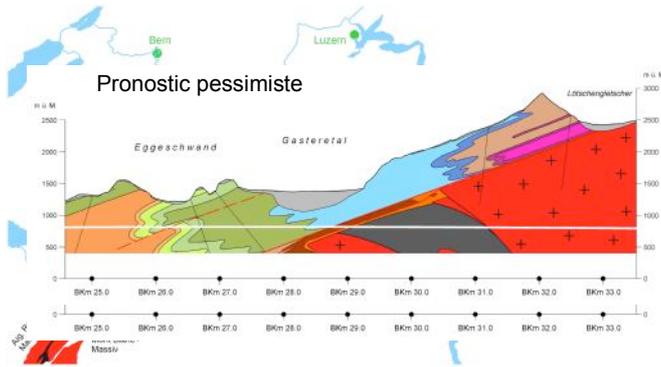


Figure 8 – Affleurements de carbonifères

Il a alors été jugé par les géologues du projet et ceux de la commission géologique fédérale de contrôle comme trop pessimiste et ensuite abandonné. Rappelons que le tunnel de faite, qui est situé environ 500 m plus haut, n'a pas rencontré de formation de carbonifère dans les granites du Gasterm (figure 9).

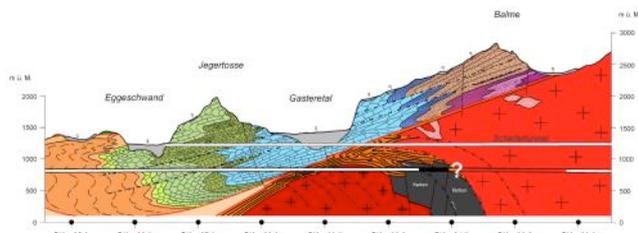


Figure 9 – Profil des pronostics géologiques

La traversée de ces roches sous plus de 1 500 m de couverture a entraîné des difficultés considérables (figures 10 et 11).



Figure 10



Figure 11

Dans les zones les plus déformables des convergences de l'ordre du mètre ont été observées. Ces zones ont montré la limite des soutènements par ancrages; elles ont nécessité plusieurs reprofilage. Les convergences ont été finalement maîtrisées par du béton projeté fibré avec incorporation dans le soutènement d'éléments métalliques déformables (Stauchelement en allemand). L'avancement moyen dans cette zone a été de 1 à 2 m par jour.

4.5 comparaison de l'avancement au TBM et à l'explosif d'une longueur d'environ 4 km

L'analyse des avancements réalisés par la même entreprise en parallèle entre le portail de Rarogne et Lötschen (4 600 m) sur le tube ouest à l'explosif et le tube est avec un TBM permet de tirer les conclusions suivantes (sur les 4 600 m environ on rencontre les formations suivantes : sédiments - calcaires et schistes – sur 2 100 m; gneiss sur 1 000 m et granite sur 1 500 m) :

	Unité	Tube ouest (explosif)	Tube est (TBM)
Profil d'excavation	m ²	64-75	70
Longueur	m	4 600	4 600
Revêtement intérieur en béton théorique	m ³ /m'	12.0	9.8
Hors profil mesuré	m ³ /m'	5.5	0.5
Coût excavation	CHF/m'	6 100	5 800
Coût revêtement	CHF/m'	4 750	3 450
Avancement moyen de l'excavation	m'/jour	6.05	11

Compte tenu du prix plus élevé des installations de chantier de l'excavation au TBM, la différence du coût de l'excavation entre les deux méthodes n'est pas significative.

Le coût du revêtement dans le tunnel excavé au TBM est environ 30 % inférieur à celui excavé à l'explosif. En réalité, la différence est encore plus grande car les conditions du contrat pénalisent beaucoup l'entreprise pour le paiement des bétons des hors profils.

A l'évidence, les conditions de travail, d'hygiène et de sécurité, sont très nettement à l'avantage du TBM.

A posteriori l'entreprise dit d'ailleurs qu'elle réaliserait maintenant les deux tubes avec un TBM et ceci malgré la faible longueur de l'attaque ouest (4 600 m) et le peu de place au portail pour l'installation des TBM.

5 – Mise en service des tunnels

Après bientôt une année d'exploitation l'ensemble de l'ouvrage et en particulier les nombreux éléments complexes liés à la sécurité se comportent de manière remarquable. Le taux de fiabilité est à ce jour de 99.88 %, ce qui doit constituer un record mondial !



6 – Conclusions

La réalisation du tunnel de base du Lötschberg est un succès. La mise en service a eu lieu en décembre 2007, comme cela était prévu initialement. Le programme des travaux (figure 12) établi au stade du projet définitif en 1998 a été tenu au prix, il est vrai, de très nombreuses mesures d'accélération qui ont pu être décidées et mises en place très rapidement grâce à une coopération exemplaire entre le Maître de l'Ouvrage, la Maîtrise d'œuvre et les diverses entreprises.

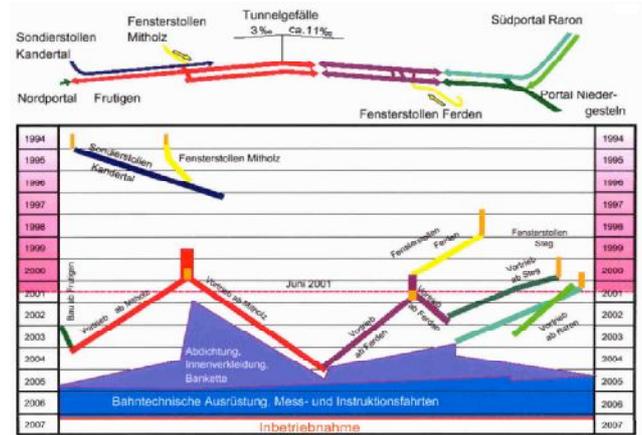


Figure 12 – Programme des travaux

La figure 13 présente l'évolution des coûts entre le devis du projet définitif en 1998 et l'estimation du coût final de l'ouvrage établi à fin 2004. Cette figure montre que les coûts ont été également maîtrisés.

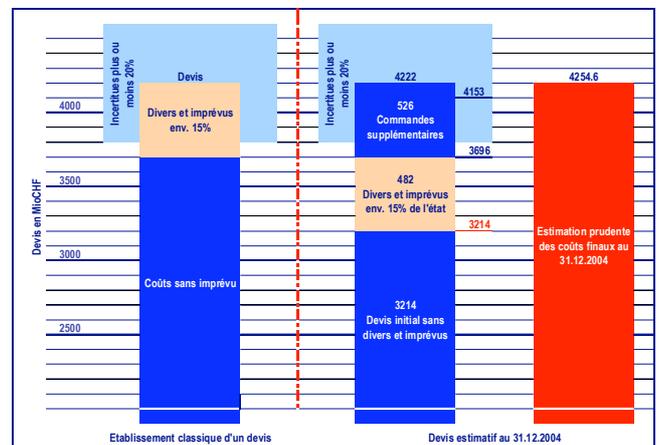


Figure 13 - Evolution des coûts

Parmi les nombreuses raisons de ce succès je n'en mentionnerai que six :

- dans toutes les phases de la réalisation le Maître d'ouvrage, BLS AlpTransit, a toujours engagé les moyens nécessaires; ceci a permis de définir assez tôt de manière précise les conditions géologiques, géomécaniques et hydrogéologiques de la réalisation de l'ouvrage ainsi que les risques résiduels acceptés par le Maître d'ouvrage;

- sur ces bases fiables et après des études de variantes exhaustives, un solide projet définitif a pu être établi, puis des documents d'appel d'offres des travaux laissant peu de place aux spéculations des soumissionnaires;

- un système de choix des entreprises privilégiant les compétences de l'équipe proposée, la solidité de l'entreprise, la qualité de l'offre autant que le prix a permis de choisir pour chaque lot l'entreprise économiquement la plus intéressante plutôt que de se faire imposer l'entreprise la meilleure marché;

- la recherche d'un esprit de partenariat entre tous les intervenants et dans toutes les phases de la réalisation plutôt que celle d'un juridisme stérile qui oppose les intervenants les uns contre les autres;

- un type de contrat qui :

- pousse tous les intervenants à l'excellence,

- permet une adaptation rapide du projet aux conditions réelles du chantier

- enfin, LA CHANCE.