

Rapport Final

# Etude partenariat public-privé Traversée du Lac à Genève

Etude de pré-faisabilité  
Tome 2 / Annexes

En collaboration avec



Stephan Kritzinger

ProgTrans

Bâle

Serge Y. Bodart

IPD

Genève

Alain Bloch

SETEC

Paris

Edward Clayton

SETEC

Lyon

Monica A. Schulte Strathaus

Ernst & Young

Düsseldorf



<b>Table des matières</b>	<b>Page</b>
<b>Annexe 1 : Réponse de l'étude aux questions clés</b>	<b>2</b>
<b>Annexe 2 : Sources</b>	<b>11</b>
<b>Annexe 3: Analyse technique détaillée des études de faisabilité</b>	<b>13</b>
<b>Annexe 4 : Le modèle de financement</b>	<b>32</b>
<b>Annexe 5 : Pièces graphiques</b>	<b>34</b>

## Annexe 1 : Réponse de l'étude aux questions clés

Les questions citées ci-dessus ont été tirées du cahier des charges transmis par le mandant :

### Conditions-cadre / rôle de l'État et du secteur privé /avantages

Question	Réponse
<p>Quel type de PPP serait adéquat ?</p>	<p>Un modèle PPP global englobant toutes les prestations (développement, conception, construction, exploitation, maintenance et GER) serait adéquat. Il existe plusieurs possibilités parmi les modèles:</p> <p>a) PPP/contrat de concession où le partenaire privé endosse le risque de trafic et de revenus à travers un péage</p> <p>b) PPP/contrat de partenariat où le partenaire privé est rétribué par un loyer fixe</p>
<p>Qui gérerait le projet, avec quelle gouvernance ?</p>	<p>S'agissant d'un projet de route nationale, le projet selon la législation suisse serait géré : du côté public par la Confédération et son administration (OFROU) ; du côté du partenaire privé par une SPV créée pour le projet par les actionnaires du consortium du partenaire privé.</p>
<p>Quelle pourrait être la répartition contractuelle des tâches et des risques entre État et partenaires privés ?</p>	<p>Comme principe général, chaque partenaire (public et privé) assume les risques du projet qu'il est le mieux à même de maîtriser. De manière synthétique, le partenaire public se chargera des risques du cadre légal, de la mise à disposition des terrains nécessaire au projet, de la délivrance des autorisations et selon les cas, d'une partie des risques du sous-sol du terrain d'emprise. Le privé prendra clairement les risques de conception, de construction, d'exploitation et de maintenance ainsi que des conditions de l'infrastructure en fin de contrat. Selon le modèle, il porte également le risque de trafic et revenus (péage). Une analyse plus détaillée des risques est fournie au chapitre 3.3 du rapport.</p>

Question	Réponse
<p>A qui reviendrait l'infrastructure au terme du contrat et à quelles conditions ?</p>	<p>Au partenaire public : dans ce cas, à la Confédération et son administration l'OFROU. Ce transfert est en principe gratuit. Il est en général conditionné à ce que le partenaire privé entreprenne certains travaux de grands entretiens et de renouvellements d'équipement (GER) avant la date du transfert afin que la continuité de l'exploitation de l'infrastructure puisse se faire dans de bonnes conditions une fois transférée.</p>
<p>Que se passerait-il en cas de changement des conditions-cadre, p.ex. nouvelle réglementation, construction d'une infrastructure concurrente ?</p>	<p>Les obligations en matière de conditions cadre sont à définir dans le contrat. Selon les standards internationaux, un changement de conditions cadre spécifique à l'infrastructure serait de la responsabilité du partenaire public. Le risque de construction d'une infrastructure concurrente varie selon les cas. En général, il dépend de l'impact que celle-ci a sur le trafic de l'infrastructure. Dans certains contrats PPP, un mécanisme de compensation est prévu selon des modalités à définir.</p>
<p>Quels seraient les avantages financiers et autres avantages pour l'État d'une solution PPP (bilan coûts / bénéfices par rapport à une construction selon la procédure ordinaire) ?</p>	<p>Bien que les conditions de financement semblent désavantageuses à première vue, le transfert du financement sur un partenaire privé représente une démarche de structuration judicieuse sur le plan économique. Les avantages du PPP provenant d'un financement privé se présentent en premier lieu comme suit :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Les PPP incitent le partenaire privé au bon achèvement des prestations</li> <li>▪ Les PPP contribuent à une répartition et couverture équilibrées des risques du projet</li> <li>▪ Les PPP ménagent les liquidités de l'État</li> </ul> <p>Mis à part l'aspect financier, le PPP présente d'autres avantages importants par rapport à un projet conventionnel. Les forces du PPP proviennent en premier lieu de son approche globale orientée vers le cycle de vie :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Une approche PPP conduit à une analyse détaillée et transparente des coûts du projet d'infrastructure, prenant également en compte les coûts liés aux risques du projet</li> <li>▪ Un modèle PPP peut apporter aux administrations publiques</li> </ul>

Question	Réponse
	<p>des avantages économiques sur l'ensemble du cycle de vie du projet en prenant en compte le bénéfice des risques transférés aux partenaires privés. Le gain en efficacité que peut apporter le PPP par rapport à la réalisation conventionnelle du projet se situe autour de 5%-10%.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ La durée de conception et de construction d'un projet peut être réduite considérablement avec une procédure d'appel d'offre bien définie et claire.</li> <li>▪ Grâce à l'externalisation de l'ensemble des prestations, l'administration publique peut se concentrer sur sa fonction d'administration et de contrôle de la fonctionnalité et de la performance de l'infrastructure.</li> </ul>
<p>Rappel du cadre juridique actuel d'un péage</p>	<p>La Constitution fédérale (art. 82, al. 3) spécifie que «<i>L'utilisation des routes publiques est exempte de taxe. L'Assemblée fédérale peut autoriser des exceptions.</i>».</p>

**Projet**

Question	Réponse
<p>Les coûts chiffrés par le canton et la Confédération sont-ils crédibles et utilisables comme référence (variante pont ou tunnel) ? Subsidiairement : y a-t-il éventuellement d'autres variantes plus intéressantes ?</p>	<p>Oui, les coûts présentés dans le rapport de synthèse des études de faisabilité sont crédibles et peuvent être utilisés comme référence.</p> <p>La variante avec réalisation des tunnels de Choulex et Collonge au tunnelier présente à notre avis des avantages en termes de coûts et délais.</p> <p>La variante avec réalisation de la Traversée du Lac en tunnel foré nous semble très intéressante pour le projet, mais les pentes de 8% nécessaires excluent le passage des poids lourds.</p>
<p>Quels coûts d'entretien et de maintien de l'infrastructure faut-il prévoir ?</p>	<p>Le coût d'entretien et d'exploitation de l'ouvrage est estimé à 18 millions de CHF par an plus 4 millions de CHF par an dans le cas d'une exploitation avec péage.</p>

Question	Réponse
<p>Est-ce que le volume de trafic prévu est crédible ?</p>	<p>Le niveau du trafic pour la région de Genève est en ligne avec les prévisions de trafic récentes comparables. La perspective d'une croissance économique et démographique justifie l'hypothèse que le trafic autoroutier augmentera jusqu'en 2030. Cependant, le nombre de voitures sur la Traversée du Lac dépendra de multiples facteurs qui ne peuvent être analysés ici en détail. Il convient, pour cette raison, de considérer les volumes de trafic chiffrés pour la Traversée du Lac dans cette étude comme des prévisions préliminaires restant à valider par une étude complémentaire de trafic. Elle devrait être menée à un stade ultérieur, se fondant sur une base de données empiriques, relevées par des entretiens et des comptages dans la zone d'influence de la Traversée du Lac.</p>
<p>Comment évaluer et gérer le problème du trafic d'évitement et quelle influence peut-il avoir sur le financement ?</p>	<p>Le trafic d'évitement est calculé sur la base de la propension des usagers à acquitter un péage. Cette étude a identifié un trafic d'évitement de l'ordre de 55% si on applique un péage de 8 CHF/trajet simple et de 33% si on applique un péage de 4 CHF/trajet simple. Le risque de trafic sous conditions d'un péage réel a un impact sensible sur le financement.</p> <p>Pour gérer le problème du trafic d'évitement, les partenaires disposent de moyens différents :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Le partenaire public pourrait saisir des mesures d'accompagnement qui favorisent l'utilisation de la Traversée du Lac : rendre difficile la traversée de la ville sur les axes existants, balisage des routes dirigeant le trafic sur les autoroutes de contournement (y compris la Traversée du Lac)</li> <li>▪ Le partenaire privé a des moyens très limités : en faisant varier les tarifs, il pourrait essayer d'influencer le choix d'itinéraire en faveur de la Traversée du Lac. En tout cas, chaque modulation des tarifs impacte ses recettes.</li> </ul>
<p>Qui assumerait des modifications des plans initiaux ?</p>	<p>Une modification des plans initiaux est en général de la responsabilité de la partie qui la demande. Le partenaire privé peut proposer des modifications. Si celle-ci permet d'optimiser le projet du point de vue économique, certains contrats prévoient un mécanisme de partage du bénéfice de cette optimisation entre les partenaires public et privé.</p>

Question	Réponse
Qui assumerait d'éventuels dépassements de coûts ?	Les dépassements de coûts sont du ressort du partenaire privé.
Qui assumerait une disparition du constructeur en cours de travaux ?	Dans un premier temps, la SPV doit trouver une solution, sinon les prêteurs ont un « step in right » qui leur permet de reprendre le contrat PPP et ceux des sous-traitants afin de trouver des solutions et de poursuivre le projet. Les différentes garanties mises en place doivent pouvoir couvrir ce scénario pessimiste.
Quelles pourraient être les sanctions en cas de non-respect des délais et/ou des critères de qualité ?	Des critères de performance en matière de qualité (en général performance fonctionnelle dans un contrat PPP) et de délais liés à des pénalités sont à fixer dans le contrat. Le partenaire privé assume les conséquences du non-respect de ces critères et les pénalités. Typiquement, des pénalités de retard qui se comptent en € par jour peuvent représenter jusqu'à 5 - 10 % du montant de la conception – construction. Les pénalités de performance s'élèvent en général à environ 5 % du montant annuel des charges d'exploitation et de maintenance et peuvent être appliquées chaque année. En cas de dépassement d'un certain barème de pénalité à définir, le contrat peut être dénoncé.

### **Exploitation**

Question	Réponse
Qui entretiendrait l'infrastructure, selon quels critères de qualité et à quels coûts ?	Dans le cadre d'une approche globale « cycle de vie », les prestations d'entretien de l'infrastructure sont confiées au partenaire privé. D'autres montages sont toutefois possibles. L'entretien est effectué sur la base d'un programme de maintenance préventive. Le coût global d'exploitation est évalué à 18 millions de CHF HT par an plus 4 millions de CHF par an dans le cas d'une exploitation avec péage.
Qui l'exploiterait ?	Dans le cadre d'une approche globale « cycle de vie », les prestations d'exploitation de l'infrastructure sont confiées au partenaire privé. D'autres montages sont toutefois possibles.



Question	Réponse
<p>Qui contrôlerait, qui sanctionnerait et comment ?</p>	<p>Dans le cadre d'une approche globale « cycle de vie » sur plusieurs dizaines d'années, l'intérêt du partenaire privé est de concevoir un ouvrage pérenne et d'assurer régulièrement son entretien pour lisser les dépenses d'entretien dans le temps et les maîtriser. L'état de l'ouvrage peut être contrôlé par le partenaire public à la fin du cycle de vie. Des sanctions financières de type pénalités peuvent être prévues dans le contrat en cas de fermetures répétées de l'ouvrage dues à un défaut d'entretien.</p>
<p>Comment le péage serait-il prélevé ?</p>	<p>Dans le cas d'un péage réel, les dispositifs de péage envisageables sont soit des barrières de péage (avec possibilité de télépéage, de paiement manuel, par carte bleue ou par pièces dans une corbeille), soit des systèmes « free-flow » sans arrêt, avec des portiques qui lisent une carte posée derrière le pare-brise (ce qui suppose que tous les véhicules soient équipés).</p>
<p>Qui répondrait en cas de non-disponibilité de l'infrastructure ?</p>	<p>Le partenaire privé. La disponibilité est typiquement un critère de performance dans un contrat PPP associé à un régime de pénalité.</p>
<p>Que se passerait-il en cas de disparition ou de reprise du concessionnaire ?</p>	<p>Le concessionnaire est une SPV. Les banques et institutions financières étant les débiteurs les plus importants, ils ont un « step in right » afin de reprendre le contrat PPP et de trouver des solutions de refinancement et/ou de reprise.</p>

**Financement**

Question	Réponse
<p>Quelles seraient les variantes de financement envisageable : totalement privé ou mix privé/public ?</p>	<p>Suivant un test mené auprès de différents instituts de crédit et investisseurs institutionnels, le projet se prête à un financement totalement privé. Les modèles concrets auxquels pourrait recourir le pouvoir public pour le financement sont le financement de projet et, respectivement, le financement par « Project Bonds » (obligations de projet).</p> <p>Toutefois, le projet est bancable, c'est-à-dire que la faisabilité d'un financement privé présuppose une rémunération du partenaire privé selon un « modèle de disponibilité ». Dans ce modèle, le partenaire privé est rémunéré par le pouvoir public en fonction de sa performance et de la disponibilité de la Traversée du Lac. Le risque lié au volume de trafic est porté par le pouvoir public.</p>
<p>Quelle partie du projet pourrait être financée par un PPP ? Seulement la traversée et ses accès ou tout le tronçon ?</p>	<p>Présupposant une rémunération du partenaire privé selon un « modèle de disponibilité », le test mené auprès du marché financier a confirmé que la totalité du projet est bancable, c'est-à-dire la traversée en tant que telle et des tronçons adjacents.</p>
<p>Quels partenaires privés seraient susceptibles de financer le projet et à quelles conditions (caisses de pensions, banques, fonds d'investissement p.ex.) ?</p>	<p>Partant du test de l'intérêt du marché, le projet pourrait être financé par des banques, des caisses de pensions, des sociétés d'assurances ou des fonds d'infrastructure. La place financière suisse ayant signalé son intérêt à s'engager et ayant les moyens suffisants pour la réalisation du projet en question, les résultats du test de l'intérêt du marché ont esquissé une solution « suisse » pour un financement privé de la Traversée du Lac.</p> <p>Vu les coûts de construction importants se situant autour de 3,0 à 3,5 MCHF (TTC), un financement bancaire, c'est-à-dire un financement de projet, se ferait probablement par un syndicat de banques.</p> <p>L'intérêt constaté repose en premier lieu sur un besoin de sécurité du marché financier, qui semble chercher aujourd'hui à engager ses moyens financiers dans des projets présentant un niveau de risque contrôlable.</p>

Question	Réponse
	<p>Étant bien conscient de la situation actuelle sur les marchés financiers, le rendement demandé ou, respectivement, attendu semble constituer un facteur secondaire et se situe en conséquence tant pour les capitaux externes que pour les capitaux propres à un niveau très modéré.</p>
<p>Quelle serait la durée de l'exploitation ?</p>	<p>D'après les résultats obtenus au cours du test de l'intérêt du marché, le remboursement des coûts d'investissement devrait être aménagé sur le long terme. La durée du contrat pourrait s'inscrire par exemple entre 30 et 50 ans. Il est même possible d'envisager une durée d'exploitation qui dépasse la durée d'amortissement.</p>
<p>Quels taux de rendement faut-il prévoir ? A quels risques correspond le rendement sur les fonds propres demandé par les partenaires privés ?</p>	<p>C'est avant tout l'importance de la Traversée du Lac en tant qu'infrastructure publique, le caractère « conservateur » et l'engagement à long terme avec un niveau de risque contrôlable qui ont été appréciés par le marché. Le rendement attendu semble constituer un facteur secondaire et ne pouvait en outre pas être chiffré par les acteurs. Il y aurait lieu de suivre le projet, c'est-à-dire de détailler et d'avancer les études économiques afin que les acteurs financiers soient en mesure de concrétiser leur évaluation du projet.</p> <p>La structuration du financement devrait se faire en premier lieu sous l'aspect sécurité. Les acteurs contactés ont jugé judicieux d'élargir les moyens propres de la société de projet.</p> <p>Comme l'a démontré le test de l'intérêt du marché, le marché sera disposé à assumer les risques techniques du projet pendant la phase d'exploitation. Le risque lié au volume du trafic devra être porté par le pouvoir public dans tous les cas.</p>
<p>Quel serait le montant du péage et qui le paierait : les usagers, l'État ou un mix des deux ?</p>	<p>D'après les simulations menées reposant sur un modèle probabiliste, le montant du péage se situe autour de 8 CHF pour un trajet simple ; ce prix correspond à la propension (théorique) des usagers à acquitter un péage pour les gains de temps et de confort sur la Traversée du Lac. Ce prix reflète les valeurs du temps des Genevois et celles des frontaliers français.</p> <p>Concernant le système de rémunération du partenaire privé et, en particulier, la question de l'application ou non d'un péage réel/fictif, les acteurs ont donné une réponse claire : une relation</p>

Question	Réponse
	<p>directe ou indirecte entre le remboursement des moyens engagés, c'est-à-dire. de la rémunération des coûts de construction (et des coûts du financement intermédiaire), et le volume du trafic en commun avec un transfert du risque lié au trafic au partenaire privé représente un critère d'exclusion pour un financement privé du projet.</p> <p>L'introduction d'un péage réel ou non ne relève pas du financement du projet puisque le pouvoir public devra assumer le risque lié au volume du trafic dans tous les cas.</p> <p>La décision d'appliquer ou non un péage réel doit être prise uniquement sous l'angle de la politique du transport et des effets socio-économiques.</p>
<p>L'État devrait-il fournir une « garantie de rentabilité » aux partenaires privés ?</p>	<p>Bien que l'introduction d'un péage semble représenter une démarche de structuration non judicieuse en termes de répartition des risques et du financement du projet, les modèles de financement appropriés pourraient néanmoins s'appliquer avec un péage réel/fictif.</p> <p>Si c'est un péage réel, ce sont bien sûr, par définition les usagers qui paieront le péage évalué à 8 CHF dans notre étude; l'État peut cependant décider d'instaurer un péage plus bas, mais dans ce cas, cela accentuera la charge du contribuable. Dans le cas d'un péage fictif (« shadow toll »), c'est l'État et donc le contribuable qui paie.</p> <p>Dans ces cas, les recettes issues du péage devraient être garanties par le pouvoir public qui devrait ainsi assumer le risque lié au volume du trafic. Si les recettes devaient s'avérer inférieures aux estimations initiales, le pouvoir public devrait équilibrer le déficit du partenaire privé. Du point de vue du financement et, en particulier, de la répartition des risques et de la rémunération du partenaire privé, un tel modèle reviendrait à un modèle de disponibilité.</p>

## Annexe 2 : Sources

**Association Mondiale de la Route AIPCR** : Manuel des tunnels routiers – Encyclopédie électronique [EXPL2]

**Association suisse des professionnels de la route et des transports VSS**: Norme Suisse SN 641 822a, Analyses coûts / avantages du trafic routier, couts horaires du transport de personnes ; Zurich, août 2009 [VSS]

**CITEC / RGR Ingénieurs Conseils / Office des Transports et de la Circulation**: Évolution prévisible du trafic routier – Evolution du TJM entre 2000 et 2020; Genève, octobre 2005 [CITEC 1]

**CITEC Ingénieurs Conseils** : Enquête sur les flux de déplacements à la frontière: résultats 2011, Rapport technique ; Genève, mai 2012 [CITEC 2]

**CITEC Ingénieurs Conseils** : Enquête sur les flux de déplacements à la frontière: résultats 2011, Annexe au rapport technique (résultats détaillés), Genève ; Mai 2012 [CITEC 3]

**Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication DETEC / Office fédéral des routes OFROU** : Coûts horaires du trafic des personnes: Dépendance de la perception et de la distance ; Contrat de recherche no°2005/007 à la demande de l'association suisse des ingénieurs et experts en transport (SVI), St. Gall, septembre 2008 [SVI]

**Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication DETEC / Office fédéral du développement territorial ARE** : Perspectives du trafic voyageurs en Suisse ; Berne, mars 2006 [ARE 1]

**Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication DETEC / Office fédéral du développement territorial ARE** : Modèle de base bimodal pour le trafic voyageurs national ; Berne, 2012 [ARE 2]

**Ministère de l'Équipement, des Transports, du Logement, du Tourisme et de la mer / Direction des Routes / Centre d'Études des Tunnels** : Guide pour la maîtrise des coûts de fonctionnement des tunnels routiers – De la conception à l'exploitation ; Bron, 24/8/05 [EXPL1]

**Office fédéral de la statistique OFS / Office fédéral des routes OFROU :** Comptage de la circulation routière en suisse (CSCR); Neuchâtel, 2006 [CSCR]

**Office fédéral de la statistique OFS / Office fédéral du développement territorial ARE :** Microrecensement mobilité et transports 2010; Neuchâtel, 2012 [Micro]

**Office fédéral de la statistique OFS :** Enquête sur le budget des ménages (EBM) ; Neuchâtel, novembre 2012 [HABE]

**République et canton de Genève / Département des constructions et des technologies de l'information / Office du génie civil :** Rapport de synthèse des études de faisabilité ; Genève, mars 2011 [RSYN]

**République et Canton de Genève / Département de constructions et des technologies de l'Information DCTI / Office de génie civil:** Traversée du Lac. Contournement Est de Genève. Rapport de synthèse des études de faisabilité ; Genève, mars 2011 [DCTI]

**Secrétariat du Grand Conseil (IN 152 A) :** Rapport du Conseil d'État au Grand Conseil sur la validité et la prise en considération de l'initiative populaire 152 « Pour une traversée de la rade » ; novembre 2012 [SGC]

## Annexe 3: Analyse technique détaillée des études de faisabilité

### 1 Données géologiques, hydrogéologiques et géotechniques

Ce chapitre a pour objet de récapituler les données géologiques, hydrogéologiques et géotechniques telles que présentées dans le dossier de faisabilité et servant de base à notre audit du dossier, notamment vis-à-vis des ouvrages souterrains.

Nous avons reconstitué un profil en long géologique de l'ensemble du projet sur les 12 km (voir page suivante), que nous commentons ci-après pour chacun des horizons concernés par les travaux en y incluant une évaluation du comportement géomécanique sur la base des informations essentiellement qualitatives disponibles et de notre expérience :

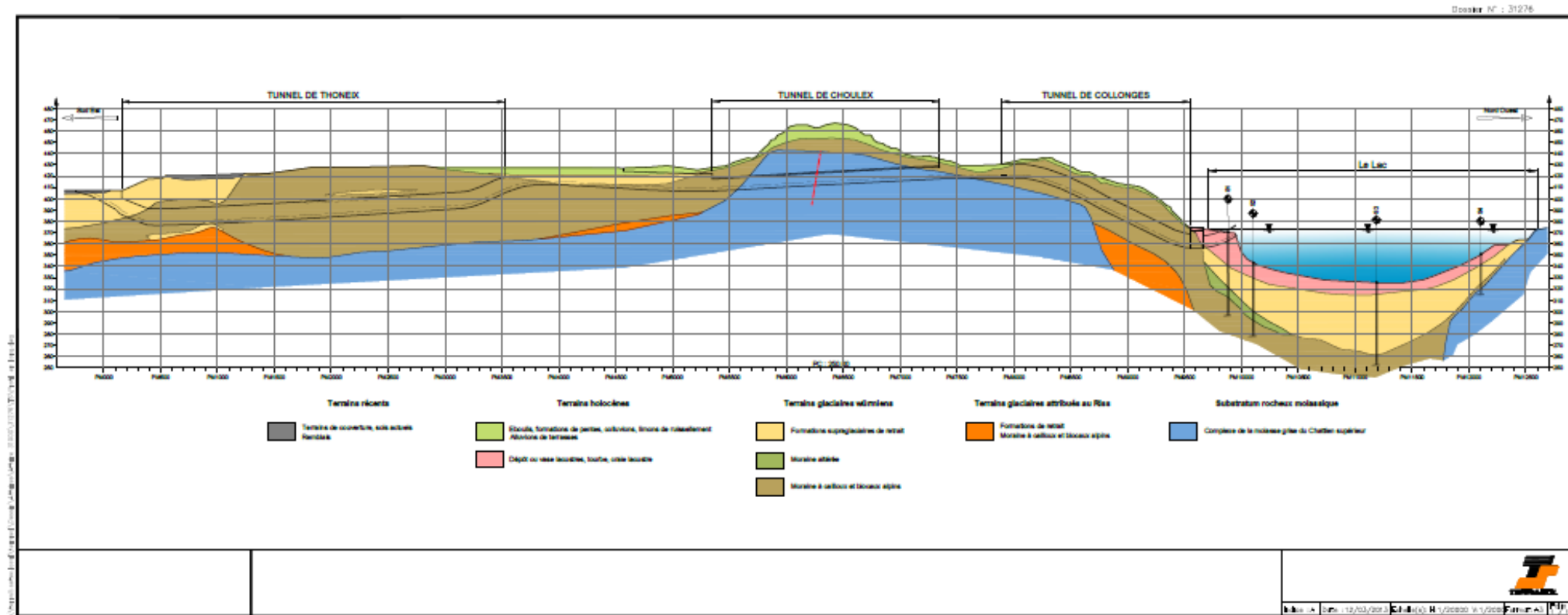
Terrains de couverture : remblais, éboulis, colluvions, alluvions. Sans incidence notable sur le projet.

Dépôts / vases lacustres : présentes uniquement au fond du lac, sur une épaisseur atteignant 10m environ, elles n'ont pratiquement aucune consistance.

Formations de retrait : datant du Riss ou du Würm, elles s'apparentent à des moraines classiques, c'est-à-dire à granulométrie très étalée (contenant des argiles jusqu'aux graviers, et parfois blocs métriques), mais de consistance moyenne. On les rencontre localement sous les formations superficielles ou en placage sur le toit des molasses, et sous le lac sur une épaisseur atteignant 50 à 60m, où elles semblent plus argileuses (avec des passages sablo-graveleux) et moins consistantes en surface.

Moraines à cailloux et blocs alpins (Würm) : c'est la principale formation rencontrée sur les ouvrages souterrains (tunnel de Thônex, extrémité du tunnel de Choulex et tunnel de Collonge). Ce sont des terrains très hétérogènes, avec une composition granulométrique très étalée (des argiles aux graviers, voire blocs), mais aussi des horizons métriques à plurimétriques très argileux ou au contraire très caillouteux. Elles sont en général de compacité correcte à bonne, sauf dans les passages très argileux. Elles reposent sur la molasse et leur épaisseur varie sur ce projet de 10 à plus de 80m.

Figure 1: La Traversée du Lac – Profil en long





Molasse (substratum du Chattien) : c'est une roche tendre, avec souvent toutes les combinaisons intermédiaires entre des horizons gréseux et d'autres plus marneux. On les rencontre sur le tracé à des profondeurs très variables entre 20 et 80m, et même probablement plus de 100 m sous le fond du lac.

Du point de vue hydrogéologique, on pourra considérer que :

- les molasses sont globalement pratiquement imperméables, à l'exception de possibles horizons sableux avec nappes captives en charge (mais sans forte alimentation),
- les moraines ou formations de retrait sont en général plus ou moins perméables, et peuvent contenir en outre des horizons de graviers très perméables et qui sont le siège de nappes captives en charge, localement artésiennes, avec une alimentation potentiellement forte (notamment sur les berges en rive gauche du lac).

En dehors de ces nappes captives locales, les niveaux piézométriques correspondent sensiblement au niveau du lac sous ce dernier, et le plus souvent aux formations superficielles pour les tunnels à terre.

## 2 Analyse détaillée par ouvrage

### 2.1 Tunnel de THÔNEX

Ce tunnel bi-tube d'environ 11m d'ouverture intérieure et long de 3 150m environ, a la particularité d'être situé pour une grande partie en zone urbaine. La couverture varie en général de 20 à 30m environ (moins de 10m aux extrémités), et il est à excaver presque exclusivement dans les moraines, qui semblent de nature assez limono-argileuse et de consistance faible dans cette zone.

Ces spécificités ont conduit les concepteurs à proposer un creusement au tunnelier (TBM – tunnel Boring Machine) à pression de terre, et avec revêtement en voussoirs (et une deuxième peau en béton coffré), ce qui permet d'assurer la stabilité du front et des parois et de limiter les tassements en surface, point sensible en zone urbaine.

Ce choix paraît tout à fait adapté, et n'appelle que les quelques commentaires suivants :

- L'entraxe de 3 diamètres, ramené à 2 diamètres pour les faibles couvertures, apparaît bien adapté pour éviter les cumuls de cuvettes de tassements en surface, et garantir la tenue du « pilier » entre les deux tubes dans ces terrains de qualité médiocre
- Les critères de tassements admissibles (30 à 50mm en absolu et 3/1000° en différentiel) apparaissent élevés, notamment en différentiel, par rapport à ce qui se pratique usuellement et qui consiste à ne pas dépasser 1.5 à 2/1000° pour éviter les risques de désordres sur les constructions. Les modélisations semblent montrer que l'on pourrait atteindre voire dépasser les valeurs limites retenues, ce qui représente un aléa assez fort. En revanche, la maîtrise du creusement au TBM peut permettre d'envisager des performances meilleures en termes de tassements.
- Bien que ce soit la pratique usuelle en Suisse de cumuler des voussoirs – ici de 30 cm – et un revêtement BA coffré – ici de 35 cm -, l'expérience de multiples autres pays montre que l'on peut tout à fait envisager un anneau de voussoirs en revêtement définitif, à condition bien sûr que les injections de mortier de bourrage derrière les voussoirs et les joints entre voussoirs soient correctement réalisés pour éviter les infiltrations d'eau. Outre l'incidence sur les coûts, il y a certainement là un gain potentiel significatif en délai de réalisation.
- Le creusement en attaque descendante n'est pas une contrainte majeure, même en terrain aquifère, à partir du moment où l'on excave le tunnel au TBM.

## 2.2 Tunnel de CHOULEX

Ce tunnel bi-tube, de 10m environ d'ouverture intérieure et long de 2000m environ, plus 700m en tranchée couverte dans la plaine côté Sud, passe sous le coteau de Choulex, avec une couverture de l'ordre de 40m au maximum. Il est situé dans une zone peu urbanisée. Environ 85 % du linéaire s'inscrit dans le substratum molassique, tandis que l'extrémité Sud se situe dans le même type de moraines que le tunnel de Thônex, mais semble-t-il un peu moins limono-argileuses et plus consistantes.

Les concepteurs proposent un creusement en méthode conventionnelle :

- En pleine section à l'abri d'une voûte parapluie dans les moraines (en ½ section au voisinage immédiat des têtes)
- Et avec une galerie pilote réalisée au tunnelier dans la molasse.

Ces méthodes peuvent convenir aux terrains rencontrés, et appellent les commentaires suivants :

- La réalisation de la galerie pilote dans la molasse est une contrainte importante, et le rôle de ventilation évoqué dans le rapport n'apparaît peut être pas à l'échelle d'une telle contrainte
- Les délais de réalisation de cette galerie en traditionnel, dont une partie en voûte parapluie, sont a priori très longs (1 à 1,5m/jour dans les moraines, 3 à 4m/jour dans les molasses, soit environ 3 ans, plus le délai de réalisation de la galerie pilote.

On pourrait tout à fait envisager une variante au tunnelier, travaillant à pression de terre dans les moraines, et en mode ouvert dans les molasses, et qui permettrait de « rentabiliser » le TBM déjà prévu pour le tunnel de Thônex.

## 2.3 Tunnel de COLLONGE

Le tunnel de Collonge, bitube de 1 400m environ en souterrain plus 250m en tranchée couverte, est un tunnel à forte pente d'environ 5% permettant la jonction entre le plateau et la rive gauche du lac. Il est entièrement à excaver dans les moraines würmiennes consolidées, et la couverture est faible dans l'ensemble, avec un minimum de 7 à 8m aux têtes (< diamètre) et ne dépassant pas 20m au maximum. Les niveaux de nappes phréatiques ne sont pas connus, mais on sait qu'il y a des niveaux graveleux au sein des molasses pouvant contenir des nappes en charge. L'ensemble est moyennement urbanisé.

La technique d'exécution proposée est en traditionnel à l'abri d'une voûte-parapluie, en pleine section en zone courante et en sections divisées (calottes puis stross, piédroits et radier) dans les zones de têtes et les sections élargies, le tout associé à un système de forages drainants à l'avancement.

Comme pour le tunnel de Choulex, nous considérons que ces méthodes conviennent tout à fait aux terrains rencontrés, mais présentent l'inconvénient de délais de réalisation très longs, notamment du fait de la voûte parapluie : avec une cadence d'avancement moyenne de 1,5m/jour, il faut prévoir 3 à 4 ans de creusement.

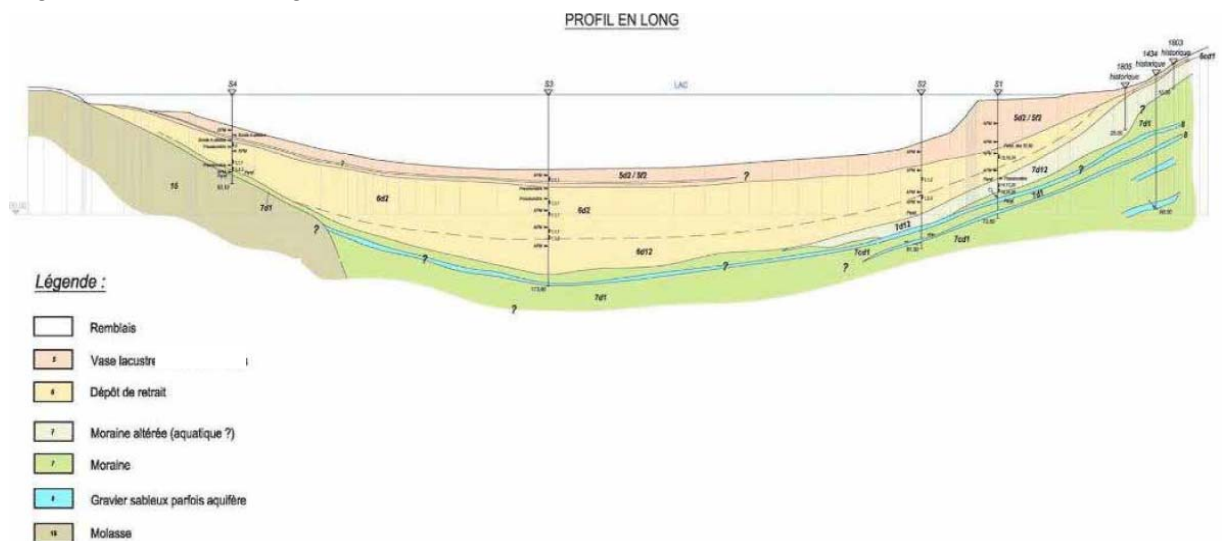
On pourrait également envisager une variante au tunnelier à pression de terre, les pressions hydrostatiques étant relativement modérées, et qui permettrait d'envisager un planning de réalisation adapté dans l'hypothèse où les 3 tunnels seraient réalisés avec des TBM comparables.

## **2.4 Traversée du Lac**

L'ouvrage de Traversée du Lac, sur une longueur de 2 500 à 3 000m est à réaliser dans un contexte géotechnique très délicat, puisqu'il y a 40 à 50 de tirant d'eau, puis des terrains pas à peu consolidés sur de grandes épaisseurs :

- Environ 10m de vases lacustres extrêmement molles (jusqu'à 30 m localement en rive gauche)
- 40 à 50m de moraines de retrait, essentiellement limono-argileuses avec quelques graves et bancs de sable fin, et de compacité faible mais croissante avec la profondeur
- 15 à 20m de moraines plus sablo-graveleuses avec une matrice argileuse, compactes à fermes voire dures, mais avec un horizon « altéré » plus argileux et moyennement compact en rive gauche
- Un substratum molassique grés-marneux dur, rencontré au moins à 60m sous le fond du lac en partie centrale et en rive gauche, et qui remonte plus rapidement en rive droite, où il est situé à 20-30m de profondeur sous le fond

Figure 2: Profil en long de la Traversée du Lac



Source : Setec

Dans ce contexte et vu les contraintes géométriques de profil en long, il est exclu (comme indiqué dans le rapport de synthèse) d'envisager un tunnel foré profond dans le substratum molassique ou même dans les moraines compactes.

Il ne reste donc que trois grands principes de solutions :

- Un viaduc, solution examinée dont les fondations restent complexes à concevoir et à réaliser dans ce contexte géotechnique (voir §3 de l'annexe)
- Un tunnel immergé
- Un tunnel foré dans les formations de moraines de retrait

Tunnel en caissons immergés : outre les aspects « logistiques » (réalisation d'une cale sèche pour la construction difficile sur le site), la principale problématique réside dans la présence de la couche de vases lacustres qui ne peut pas servir de niveau d'assise aux caissons. Il faut donc envisager de s'en affranchir :

- Les solutions présentées dans le rapport de synthèse consistent à purger cette couche, soit après mise en œuvre d'un préchargement, soit par constitution de deux cordons latéraux puis purge à l'intérieur, puis mise en place des caissons, avec éventuellement amélioration des moraines peu consolidées par inclusions rigides (selon la portance et la déformabilité de ces terrains, encore mal connues). Ces solutions posent essentiellement la question de la tenue, et donc de la pente des talus de la souille, et par suite des volumes de matériaux à mettre en dépôt : sur 3km de long, au minimum 50m de large et en moyenne

10m d'épaisseur, cela représente un volume de l'ordre de 1,5 millions de m<sup>3</sup> ! Sans parler de la pollution temporaire des eaux du lac pendant ces travaux de dragage.

- On peut en variante envisager des techniques d'amélioration de sol de type soil-mixing, ou de soutènement par palplanches par exemple pour limiter la largeur de la fouille et donc les volumes à excaver
- Des solutions de mise en place des caissons par havage (avec lancement), voire fonçage horizontal, pourraient s'envisager, mais ne sont pas des techniques usuelles : il y a donc un risque « d'innovation technologique »
- Enfin, également solution innovante, on pourrait étudier une solution de caissons posés sur pieux battus et ne venant donc pas solliciter les vases. Il faudrait alors examiner attentivement la question de la flottabilité de l'ouvrage (reprise de la poussée d'Archimède par pieux en traction ?) et de sa protection de surface si les caissons ne sont pas enterrés.

Tunnel foré : il nous semble que la solution de tunnel foré dans les moraines de retrait mérite d'être étudiée plus attentivement, notamment sur le plan du profil en long, car elle présente de multiples avantages (malgré un coût de construction direct certainement élevé) :

- La qualité médiocre des terrains n'est plus maintenant une limite technologique pour le creusement de tunnels : on sait concevoir et mettre en œuvre des tunneliers à confinement capables de creuser dans des terrains de mauvaise qualité géotechnique, et sous des pressions hydrostatiques de 8 à 10 bar ; ce n'est certes pas courant mais des références existent, et permettent de considérer que ce n'est pas du tout rédhibitoire.
- Dans la mesure où il n'y a aucune liaison avec les réseaux routiers existants en rive gauche du lac, et où cette zone est fortement urbanisée, une solution permettant de réduire fortement, voire de supprimer, toute intervention en surface dans cette zone présente à l'évidence des atouts considérables : avec une Traversée du Lac en tunnel foré au TBM, on pourrait envisager de ne réaliser qu'un puits de sortie du tunnelier (qui serait lancé depuis la rive droite), voire même de réaliser le tunnel sous le lac en continuité de celui de Collonges (avec probablement malgré tout une sortie de ventilation et de secours, mais d'emprise limitée).
- Enfin une telle solution évite toutes les contraintes logistiques liées à la solution caisson immergé, à savoir la construction d'une cale sèche, et l'aménagement d'une zone de dépôts capable de stocker 1 à 2 millions de m<sup>3</sup>.

Ainsi le coût direct de la Traversée du Lac en tunnel foré est à mettre en balance avec les avantages socio-économiques d'une solution minimisant très fortement l'impact en surface des travaux.

## 3 Examen détaillé du franchissement en viaduc

### 3.1 Tracé

Le projet préconisé réduit la longueur de l'ouvrage haubané en augmentant la longueur de la galerie de liaison en rive gauche et en créant un remblai côté rive droite dans lequel s'inscrit une trémie. Si ces dispositions réduisent la longueur du pont, elles rendent toutefois nécessaires la construction d'ouvrages enterrés préfabriqués et fondés sur pieux dont la réalisation restera délicate en site lacustre.

Le tracé rectiligne envisagé est en courbe ( $R = 6\,000$ ) pour des considérations architecturales rompant la monotonie et créant une image plus dynamique. Cette disposition augmente quelque peu la complexité de l'ouvrage. Ce choix devra être confirmé lors des phases ultérieures compte tenu de la proximité du plan d'eau et du relief des berges. La courbure est, pour l'essentiel, visible de l'utilisateur circulant sur le pont. La hauteur du tablier est de 35 m au-dessus du plan d'eau.

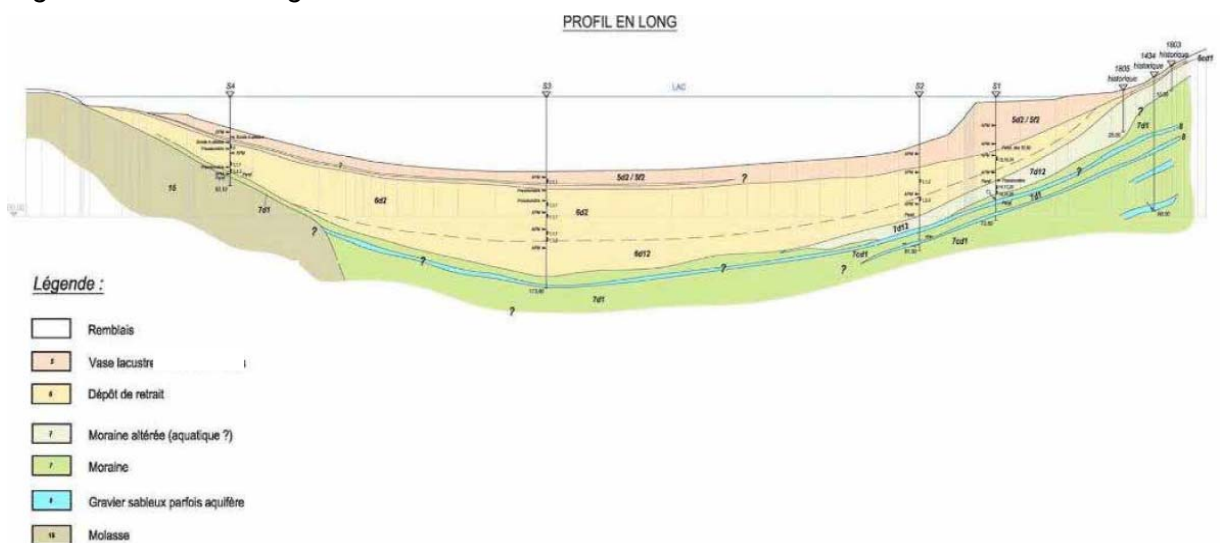
### 3.2 Contexte géotechnique

Le contexte géotechnique des rives et du fond du lac Léman est caractérisé par :

- Des vases et dépôts lacustres : cette formation a été mise en évidence sur une épaisseur d'environ 10m dans le fond du lac sauf en rive Est où son épaisseur avoisine les 30m à 350m environ de la berge du lac. Cette formation est extrêmement molle, voire inconsistante.
- Des dépôts de retrait : cette formation, fluvio-glaciaire, est rencontrée sur les deux berges du lac sur une épaisseur de 10 – 15m et au centre sur une épaisseur avoisinant 55m. Elle est composée de matériaux essentiellement fins (argile, limon) avec des intercalations de lentilles sableuses et de passées plus graveleuses. La compacité de ce matériau augmente avec la profondeur et la consistance passe de molle pour la frange supérieure à moyennement ferme pour la frange inférieure.
- Des moraines Wurmiennes : cet étage géologique est composé de limon sablo-graveleux, plus ou moins argileux. En rive Ouest, cet horizon est d'épaisseur faible (< 10m) jusqu'à 700m de la berge environ. Puis, il s'épaissit nettement à la faveur du surcreusement Rissien jusqu'à atteindre plus de 50m d'épaisseur au centre du lac. De nombreuses poches et passées graveleuses, pouvant être aquifères, ont été rencontrées au sein des moraines et, en rive Est, une frange d'altération superficielle a été mise en évidence sur 15 – 20m d'épaisseur. L'altération peut être qualifiée de moyennement ferme alors que la moraine est,

- quant à elle, ferme à dure.
- Le substratum molassique : il s'agit classiquement d'une alternance de grès et grès marneux qui, sur la largeur du lac, est rencontrée à une profondeur très importante, sauf en rive Ouest, puisqu'on note une remontée du toit molassique et, corrélativement, une quasi absence des moraines.
  - L'analyse du contexte géotechnique conduit donc aux constatations suivantes :
  - Il est exclu de fonder l'ouvrage sur des fondations superficielles dans le fond du lac, même après avoir purgé les vases.
  - Le substratum rocheux ne peut pas constituer le matériau d'assise de fondations profondes sur la totalité du linéaire de l'ouvrage de franchissement mais seulement sur 700m en rive droite.
  - Les dépôts de retrait semblent compressibles et ne pas présenter des caractéristiques mécaniques suffisantes pour assurer l'assise de l'ouvrage.
  - Les matériaux morainiques semblent constituer une bonne alternative d'assise pour des fondations.

Figure 3: Profil en long de la Traversée du Lac



Source : Setec



### 3.3 Méthodes de réalisation des appuis

Le concepteur envisage 3 principales solutions de fondation :

- Caisson de confinement du sol,
- Inclusions rigides,
- Pieux.

On note que ces trois solutions sont couplées avec un système d'embase de pile préfabriquée, flottée puis immergée.

#### a. Caisson de confinement

La technique consiste à mettre en fiche des caissons circulaires d'un diamètre d'environ 50m jusqu'au toit de la moraine (environ 60m sous le fond du lac), puis de fonder les piles sur le sol naturel (après décapage des vases), confiné dans l'enceinte du caisson, après l'avoir consolidé.

Plusieurs difficultés et/ou incertitudes persistent quant à la faisabilité de la méthode :

- Même avec un système de lançage, les caissons atteindront-ils la couche morainique ?
- Le sol confiné sera-t-il suffisamment homogène ?
- Comment réaliser la pré-consolidation (surcharge/délai) ?

Nous pensons donc que cette technique, innovante, est très incertaine dans l'état actuel de connaissance de la géotechnique du fond du lac et ne doit pas constituer l'axe de travail principal.

#### b. Inclusions rigides

Cette technique consiste à mettre en place des tubes métalliques battus à travers la couche médiocre, qui font office de renforcement de sol, et à assier les piles dessus par l'intermédiaire d'un matelas en matériaux graveleux.

Cette technique a été employée a de nombreuses reprises durant les vingt dernières années et les méthodes de dimensionnement sont désormais fiables. La technique de battage d'inclusions métalliques est maîtrisée par les entreprises de travaux maritimes. Le fait que la semelle de la pile repose sur un matelas granulaire et que le sol soit renforcé par les inclusions contribue à améliorer le comportement de l'ensemble sous séisme.

Il faut toutefois noter :

- L'épaisseur du matelas granulaire de transition peut être importante pour des

semelles du gabarit de celles du projet,

- Les inclusions devront sans doute pénétrer légèrement dans la moraine,
- Le tassement nécessaire à la mobilisation du frottement sur les inclusions (positif et négatif) peut être important et doit être anticipé.

Nous pensons que cette technique est adaptée aux fondations du projet et présente un bon rapport fiabilité/efficacité/coût. Nous recommandons de poursuivre les études avec cette option.

### **c. Pieux forés**

Il s'agit de forer des pieux jusqu'au sein des moraines afin d'y transférer les efforts provenant des appuis.

Cette technique est déclinée en deux variantes pour des questions de réalisation :

- Forage depuis une barge,
- Forage depuis une fausse pile.

Ces pieux, sans doute de gros diamètre (> 2 000mm) auraient une longueur très importante (> 70 – 80m) au centre du lac. Ils seraient ensuite connectés à la semelle.

La technique est très répandue mais ici nous atteignons ses limites à notre avis. La mise en œuvre de tubage provisoire sur de telles profondeurs est très aléatoire et le forage des moraines peut présenter de grandes difficultés (blocs, niveaux aquifères en charge, etc...). La fiabilité de l'ensemble est incertaine du fait qu'en raison du nombre réduit de pieux, si l'un d'entre eux ne pouvait être mené à terme, tout le design de la fondation serait à revoir.

Le comportement de ce type de fondation sous séisme, avec une forte épaisseur de matériaux mous, induit des efforts très importants dans les pieux. Nous recommandons de ne poursuivre les études de la solution pieux que comme alternative à la solution inclusions rigides.

### **d. Autres solutions**

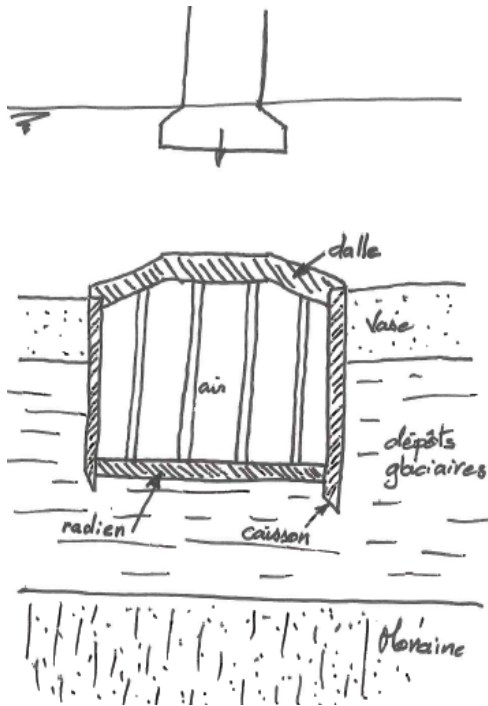
Hormis des variantes de soil-mixing (jet grouting ou autres) également très difficiles à mettre en œuvre dans de telles conditions, mais pouvant constituer un complément, il ne nous semble pas qu'une autre méthode de fondation puisse satisfaire aux besoins du projet.

Toutefois, une variante à la solution caisson de confinement, peut être intéressante : il s'agit du caisson havé avec fondation compensée (fondation « flottante »).

Le principe est de haver les caissons en excavant à l'intérieur jusqu'à une cote où la contrainte apportée sur le sol par l'ouvrage est sensiblement égale à celle régnant au

préalable dans le sol (avant excavation). Les tassements sont ainsi circonscrits aux tassements de re-compression sous une contrainte effective très faible.

Figure 4: Caisson havé avec fondation compensée



Source : Setec

Le chantier est, tout au moins au départ des opérations, le même que celui de la solution caissons de confinement :

- Préfabrication de caissons de grande dimension,
- Mise en œuvre des caissons par havage.

Ensuite, les méthodes divergent :

- Excavation au centre des caissons,
- Coulage d'un radier et de contreventements,
- Coulage de la dalle supérieure,
- Mise en place de la pile,
- Remplissage d'air au fur et à mesure du chargement.

Les avantages de cette solution sont :

- Progression du caisson facilitée par l'excavation intérieure,
- Sans doute pas de nécessité d'atteindre les moraines profondes,

- Méthodologie maîtrisée.

Les inconvénients sont :

- Ouvrage nécessitant une cale sèche importante,
- Travaux de bétonnage sous l'eau,
- Important volume de matériaux à extraire

Il nous semble que cette solution mérite d'être étudiée dans les phases ultérieures du projet.

### **3.4 Ouvrage haubané**

La solution proposée est un tablier multi-haubané à nappe centrale reposant sur des appuis dédoublés, lesquels constituent un encastrement. La silhouette retenue est désormais classique des grands ouvrages multi-haubanés. Le choix de la courbure et de la progressivité des travées est un choix purement esthétique, l'ouvrage pouvant être réalisé rectiligne et à travées constantes.

#### **a. Le tablier**

Le tablier métallique est un caisson en acier raidi intérieurement par des poutres treillis régulièrement espacées. Bien que non précisé, cet espacement se situe généralement entre 3,50 et 5,00m selon le calepinage des travées. Les travées étant choisies différentes, la progression est de 30m puis de 15m, il sera préférable d'adopter un pas constant de 5,00m pour ne pas modifier la structure du caisson à chaque travée. Ainsi, on aura un fléau de 320m, un fléau de 350m et un fléau de 380m, chaque fléau étant déduit du précédent par une progression arithmétique de 30m. Le rapport H/L (hauteur du pylône au-dessus du tablier divisé par la portée du fléau) est de l'ordre de 0,21, ce qui est plutôt dans la fourchette basse des élancements utilisés (de 0,20 à 0,25 en général).

La structure en caisson soudée est maintenant une solution très classique (Ponts de Normandie, Millau et plus récemment Russky et Golden Horn à Vladivostok) et ne pose pas de problème particulier de construction. Il en est de même de la triangulation intérieure.

Les pylônes sont en V inversés et disposés au centre du tablier. Leur hauteur est respectivement égale à 70m, 80m et 83m. Ces pylônes sont réalisés en caissons d'acier. Le mode de construction de ces pylônes n'est pas précisé et reste un sujet

majeur.

Des aménagements particuliers seront à prévoir au droit des appuis, pour permettre la transmission des charges apportées par le pylône sur les appuis dédoublés. L'encastrement sur les piles de béton rendra nécessaire un clouage par câble de précontrainte et la pose de quatre appuis fixes.

Dans la suite de l'étude, il est possible de revenir à un tracé rectiligne et des travées constantes de 350m dans un souci légitime d'économie.

#### **b. Les appuis**

Les appuis sont constitués de deux fûts réalisés au-dessus de la partie préfabriquée immergée. Leur hauteur et leur géométrie ne posent pas de problème particulier. Les têtes de pylône devront permettre la mise en place des appareils d'appui fixes de grandes dimensions et des câbles de clouage. La raideur des appuis immergés, la hauteur modeste des voiles (35m), associées à un tablier encastré pose un problème de dilatation thermique.

Généralement, les tabliers de ce type sont posés soit sur des piles très souples (Millau), soit le tablier est libre de se dilater au travers de pylônes très rigides (Rion Antirion).

#### **c. Variante de tablier**

La proposition fait état d'un tablier mixte, c'est-à-dire du remplacement de la dalle orthotrope par une dalle de béton. Cette proposition pose toutefois plusieurs problèmes :

- La dalle sera fortement tendue sur appui sous l'effet de la flexion localisée du tablier et cette traction dépendra du schéma statique adopté lors de la mise en tension des haubans. En effet, si la dalle béton est préfabriquée avec chaque tronçon, elle est comprimée par la mise en tension des haubans. Mais les voussoirs à transporter et à lever sont plus lourds.
- Si la dalle est réalisée dans un deuxième temps, elle n'est pas comprimée par les haubans (ou seulement par le réglage final) et il est nécessaire de prévoir un contreventement provisoire horizontal du tablier en cours de montage. Et cela ajoute une phase supplémentaire de travaux.

#### **d. Culées et approches en rive**

Côté pointe de la Bise, en rive gauche, l'ouvrage est prolongé par une galerie de près de 550m, composée successivement d'une galerie émergée de 250m, d'une galerie immergée de 200m et d'une tranchée couverte.

Les deux tronçons de galerie sont imaginés comme étant préfabriqués. La réalisation de cet ouvrage demande des moyens importants de préfabrication et de mise en place par moyens nautiques, après réalisation d'un socle sur pieux battus.

Notamment, il faudra trouver la place à terre pour réaliser une darse dans lesquels les tronçons seront réalisés. Les moyens de remorquage devront être importants. Enfin, la mise en place des caissons dans une souille constituée de matériaux vasards et la pose sur un matelas répartiteur sont des opérations délicates demandant une forte expérience de la part de l'entreprise : la pose des caissons, l'ajustement des joints, la vidange après mise en place sont affaire d'entreprises spécialisées en travaux fluviaux et maritimes.

### **3.5 Mode de construction de l'ouvrage haubané**

La difficulté principale sera la mise en œuvre des voussoirs de pile et des pylônes sur les appuis en béton.

Plusieurs méthodes sont possibles :

- Pose de tronçons de tablier et de pylône par des pontons-grues. Cette méthode demande d'adapter la taille des tronçons aux capacités de levage,
- Pose de tronçons de pylône au moyen d'une grue fixée sur le socle de la pile. Là encore la capacité de levage limitera la taille des colis.

Pour la construction du tablier, la méthode la plus probable sera la construction par encorbellements successifs. Après la pose du voussoir sur pile, les tronçons, de l'ordre de 15 à 20m seront approvisionnés par barge et pourront être levés à l'extrémité des fléaux au moyen d'une chèvre de levage. Ils seront ensuite soudés bout à bout au tronçon précédent.

D'autres variantes sont possibles, comme la construction des pylônes en béton, au prix d'une adaptation de l'architecture des piles et des pylônes, mais permettant l'indépendance de la construction et la limitation des moyens nautiques. Le changement de géométrie des pylônes permettrait aussi d'améliorer le comportement de l'ouvrage sous l'effet des dilatations thermiques.

### 3.6 Coût de l'ouvrage haubané

Le coût d'un ouvrage de ce type est d'environ 400 millions d'euros (M€), hors incidence des fondations en site lacustre. Ce poste fondation est à majorer pour tenir compte des moyens exceptionnels de mise en œuvre : battage de pieu depuis une plate-forme immergée, immersion de structures préfabriquées.

A ce coût s'ajoute celui des trémies, qui elles aussi exigent d'importants travaux préparatoires et des moyens nautiques exceptionnels, soit environ 145 millions d'euros. On peut donc penser que le coût final des travaux se situerait autour de (valeur mars 2013) :

Fondations et appuis	300 M€
Tabliers	150 M€
Equipements	105 M€
Accès Vengeron	45 M€
Accès rive gauche	100 M€
<b>Total hors taxes</b>	<b>700 M€</b>

A comparer au coût des 603 millions CHF (pont haubané courbe - 2010) figurant dans l'estimatif général du coût de réalisation.

Le délai proposé est de trois ans. Les principales tâches étant dans la préparation des moyens nautiques : construction de darses, de pontons, engins spéciaux de manutention, on peut estimer que les travaux préparatoires seront longs. La construction du tablier par voussoirs de 15m environ demandera également de construire simultanément plusieurs fléaux. Le délai minimum sera de 36 mois et un délai plus vraisemblable de 42 mois tiendra compte des travaux préparatoires des fondations, des piles immergées et des trémies d'accès.

### 3.7 Estimations détaillées

Taux de conversion €/CHF	1,22	Projet de base défini dans les études de faisabilité								Variantes avec infrastructure à 2x3 voies autorisée aux PL (Estimations groupement)				Variantes avec infrastructure interdite aux PL (Estimations groupement)											
		Rappel des estimations issues des études de faisabilité				Ré-estimations du projet de base (Estimations groupement)				Solution viaduc		Solution tunnel immergé		Solution viaduc				Solution tunnel immergé				Solution tunnel foré sous le lac			
		Solution viaduc		Solution tunnel immergé		Solution viaduc		Solution tunnel immergé						2x2 voies		2x3 voies		2x2 voies		2x3 voies		2x2 voies		2x3 voies	
		MCHF HT	ME HT	MCHF HT	ME HT	MCHF HT	ME HT	MCHF HT	ME HT	MCHF HT	ME HT	MCHF HT	ME HT	MCHF HT	ME HT	MCHF HT	ME HT	MCHF HT	ME HT	MCHF HT	ME HT	MCHF HT	ME HT	MCHF HT	ME HT
		nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	
		27	22	27	22	27	22	27	22	27	22	27	22	27	22	27	22	27	22	27	22	27	22	27	
		47	38	47	38	47	38	47	38	49	40	49	40	47	38	49	40	47	38	49	40	47	38	49	
		491	403	491	403	457	375	457	375	617	506	617	506	411	337	555	455	411	337	555	455	411	337	555	
		176	144	176	144	176	144	176	144	185	151	185	151	176	144	185	151	176	144	185	151	176	144	185	
		471	386	471	386	401	329	401	329	541	444	541	444	361	296	487	399	361	296	487	399	361	296	487	
		165	135	165	135	165	135	165	135	173	142	173	142	165	135	173	142	165	135	173	142	165	135	173	
		293	240	so	so	249	204	so	so	337	276	so	so	224	184	303	248	so	so	so	so	so	so	so	
		604	495	so	so	806	660	so	so	982	805	so	so	806	660	982	805	so	so	so	so	so	so	so	
		so	so	1417	1161	so	so	1417	1161	so	so	1796	1472	so	so	so	so	1275	1045	1616	1325	916	751	1237	
		334	274	334	274	334	274	334	274	350	287	350	287	334	274	350	287	334	274	350	287	334	274	350	
		253	207	264	216	240	197	273	223	294	241	337	276	230	189	281	230	252	207	310	254	220	180	276	
		5	4	5	4	5	4	5	4	5	4	5	4	5	4	5	4	5	4	5	4	5	4	5	
		<b>2 865</b>	<b>2 349</b>	<b>3 396</b>	<b>2 784</b>	<b>2 906</b>	<b>2 382</b>	<b>3 301</b>	<b>2 706</b>	<b>3 560</b>	<b>2 918</b>	<b>4 081</b>	<b>3 345</b>	<b>2 786</b>	<b>2 283</b>	<b>3 397</b>	<b>2 785</b>	<b>3 053</b>	<b>2 502</b>	<b>3 759</b>	<b>3 081</b>	<b>2 662</b>	<b>2 182</b>	<b>3 345</b>	
		229	188	272	223	233	191	264	216	285	233	326	268	223	183	272	223	244	200	301	246	213	175	268	
		3 094	2 536	3 668	3 007	3 139	2 573	3 565	2 922	3 845	3 152	4 407	3 612	3 008	2 466	3 669	3 007	3 297	2 702	4 059	3 327	2 875	2 356	3 613	
						-35	-29	-35	-29	-47	-39	-47	-39	-32	-26	-43	-35	-32	-26	-43	-35	-20	-16	-26	
						-80	-66	-80	-66	-109	-89	-109	-89	-72	-59	-98	-80	-72	-59	-98	-80	-127	-104	-171	
						<b>2 791</b>	<b>2 287</b>	<b>3 185</b>	<b>2 611</b>	<b>3 404</b>	<b>2 790</b>	<b>3 925</b>	<b>3 217</b>	<b>2 682</b>	<b>2 198</b>	<b>3 257</b>	<b>2 670</b>	<b>2 949</b>	<b>2 417</b>	<b>3 618</b>	<b>2 966</b>	<b>2 515</b>	<b>2 062</b>		
						223	183	255	209	272	223	314	257	215	176	261	214	236	193	289	237	201	165	252	
						3 014	2 470	3 440	2 820	3 677	3 014	4 239	3 474	2 896	2 374	3 517	2 883	3 185	2 610	3 908	3 203	2 717	2 227	3 400	
						-126	-103	-126	-103	-178	-146	-178	-146	-111	-91	-157	-129	-111	-91	-157	-129	-111	-91	-157	
						<b>2 780</b>	<b>2 279</b>	<b>3 175</b>	<b>2 602</b>	<b>3 382</b>	<b>2 772</b>	<b>3 903</b>	<b>3 199</b>	<b>2 675</b>	<b>2 193</b>	<b>3 240</b>	<b>2 656</b>	<b>2 942</b>	<b>2 412</b>	<b>3 601</b>	<b>2 952</b>	<b>2 551</b>	<b>2 091</b>		
						222	182	254	208	271	222	312	256	214	175	259	212	235	193	288	236	204	167	255	
						3 003	2 461	3 429	2 810	3 653	2 994	4 215	3 455	2 889	2 368	3 499	2 868	3 177	2 604	3 889	3 188	2 755	2 258		

Source : Setec, tableau interne



### **3.8 Conclusions**

La construction d'un ouvrage multi-haubané sur le lac Léman demandera des moyens exceptionnels en site lacustre, en termes de pontons grues, remorquage, et construction de darses.

La solution proposée, caisson en acier à haubanage central, est une solution éprouvée et maîtrisée. Dans le cas particulier du lac Léman, les fondations et la construction des pylônes seront les difficultés majeures du site. Une alternative avec un pylône en béton s'avèrerait une piste intéressante pour diminuer les moyens de mise en œuvre. Au vue de la rigidité des appuis, la dilatation longitudinale de l'ouvrage reste toutefois à examiner de paire avec la conception d'ensemble.

De notre point de vue, la solution suspendue n'apparaît pas comme une alternative intéressante et ne devrait pas être examinée plus avant.

## Annexe 4 : Le modèle de financement

Dans le cas d'une réalisation de la Traversée du Lac selon le **scénario 2**, « **Optimisation de la fonction socio-économique** », la charge annuelle à supporter par le pouvoir public pourrait se présenter comme suit :

<b>Scénario 2 : Optimisation de la fonction socio-économique</b>		V1		V2		
Coûts de construction (HT)	CHF 3'190'000'000	CHF 3'190'000'000	CHF 3'190'000'000	CHF 3'190'000'000		
<b>Pré-financement public</b>		25%	<b>CHF 797'500'000</b>	50%	<b>CHF 1'595'000'000</b>	
<b>Financement privé</b>	100%	<b>CHF 3'190'000'000</b>	75%	<b>CHF 2'392'500'000</b>	50%	<b>CHF 1'595'000'000</b>
Part capitaux propres	20%	CHF 638'000'000	20%	CHF 478'500'000	20%	CHF 319'000'000
Part capitaux externes	80%	CHF 2'552'000'000	80%	CHF 1'914'000'000	80%	CHF 1'276'000'000
Taux d'intérêt des capitaux propres		9,00%	9,00%	9,00%	9,00%	
Taux d'intérêt des capitaux externes		3,50%	3,50%	3,50%	3,50%	
Durée d'amortissement		40 années	40 années	40 années	40 années	
Annuité part capitaux propres (HT)		CHF 59'308'231	CHF 44'481'173	CHF 29'654'115		
Annuité part capitaux externes (HT)		CHF 119'503'224	CHF 89'627'418	CHF 59'751'612		
<b>Annuité constante (HT)</b>		<b>CHF 178'811'455</b>	<b>CHF 134'108'591</b>	<b>CHF 89'405'728</b>		
<b>Coûts d'exploitation et d'entretien p.a. (HT)</b>		<b>CHF 18'000'000</b>	<b>CHF 18'000'000</b>	<b>CHF 18'000'000</b>		
<b>Coût global (première année d'exploitation, HT)</b>		<b>CHF 196'811'455</b>	<b>CHF 152'108'591</b>	<b>CHF 107'405'728</b>		
T.V.A. (8%)		CHF 15'744'916	CHF 12'168'687	CHF 8'592'458		
<b>Coût global (première année d'exploitation, TTC)</b>		<b>CHF 212'556'371</b>	<b>CHF 164'277'279</b>	<b>CHF 115'998'186</b>		

Dans le cas d'une réalisation de la Traversée du Lac selon le **scénario 3**, « **Optimisation de la rentabilité (projet de base)** », la charge annuelle à supporter par le pouvoir public pourrait se présenter comme suit :

<b>Scénario 3 : Optimisation de la rentabilité (projet de base)</b>		V1		V2		
Coûts de construction (HT)	CHF 2'910'000'000	CHF 2'910'000'000	CHF 2'910'000'000	CHF 2'910'000'000		
<b>Pré-financement public</b>		25%	<b>CHF 727'500'000</b>	50%	<b>CHF 1'455'000'000</b>	
<b>Financement privé</b>	100%	<b>CHF 2'910'000'000</b>	75%	<b>CHF 2'182'500'000</b>	50%	<b>CHF 1'455'000'000</b>
Part capitaux propres	20%	CHF 582'000'000	20%	CHF 436'500'000	20%	CHF 291'000'000
Part capitaux externes	80%	CHF 2'328'000'000	80%	CHF 1'746'000'000	80%	CHF 1'164'000'000
Taux d'intérêt des capitaux propres		9,00%	9,00%	9,00%	9,00%	
Taux d'intérêt des capitaux externes		3,50%	3,50%	3,50%	3,50%	
Durée d'amortissement		40 années	40 années	40 années	40 années	
Annuité part capitaux propres (HT)		CHF 54'102'493	CHF 40'576'869	CHF 27'051'246		
Annuité part capitaux externes (HT)		CHF 109'013'913	CHF 81'760'435	CHF 54'506'957		
<b>Annuité constante (HT)</b>		<b>CHF 163'116'406</b>	<b>CHF 122'337'304</b>	<b>CHF 81'558'203</b>		
<b>Coûts d'exploitation et d'entretien p.a. (HT)</b>		<b>CHF 18'000'000</b>	<b>CHF 18'000'000</b>	<b>CHF 18'000'000</b>		
<b>Coût global (première année d'exploitation, HT)</b>		<b>CHF 181'116'406</b>	<b>CHF 140'337'304</b>	<b>CHF 99'558'203</b>		
T.V.A. (8%)		CHF 14'489'312	CHF 11'226'984	CHF 7'964'656		
<b>Coût global (première année d'exploitation, TTC)</b>		<b>CHF 195'605'718</b>	<b>CHF 151'564'289</b>	<b>CHF 107'522'859</b>		

Dans ce scénario, il convient de prendre en considération les éventuelles recettes issues du péage réel. D'après l'estimation du trafic, ces recettes pourraient se monter à CHF 110'000'000 (TTC) p. a.

#### **Prudence par rapport à l'interprétation des calculs**

Au stade actuel, les données relatives au projet permettent seulement des calculs sensiblement simplifiés. Les chiffres obtenus donnent de bons ordres de grandeur, mais ne se prêtent pas à des extrapolations. Une étude beaucoup plus poussée serait nécessaire pour déterminer la charge financière sur la durée.

Relevons en particulier que :

- Les coûts annuels calculés ne concernent que la première année d'exploitation.
- Ils ne se basent pas sur une actualisation des flux financiers.
- Les conditions de financement sont celles usuellement pratiquées actuellement sur le marché, mais ne sont pas spécifiques au projet.

Par ailleurs, d'autres éléments seraient pris en compte dans l'hypothèse d'un financement en PPP, notamment :

- Le coût du financement intermédiaire durant la phase de construction.
- L'indexation des prix pendant la durée du contrat.
- L'évaluation des risques du projet.
- Les coûts de transaction liés à la préparation du projet et à la mise en concurrence, ainsi que ceux liés au contrôle durant la construction et l'exploitation.
- Le coût des éventuels mécanismes de sécurité (p.ex. garantie)
- Les gains d'efficacité d'une réalisation en PPP, par rapport à une procédure conventionnelle

En conséquence, le calcul présenté ne se prête pas à une comparaison monétaire avec la réalisation conventionnelle. En principe, une telle comparaison entend fournir au pouvoir public les éléments nécessaires permettant de décider du point de vue économique de la variante de réalisation. Afin de garantir la comparabilité des modèles à étudier et la solidité de l'étude, une comparaison monétaire ne peut s'effectuer qu'après avoir clarifié et détaillé les éléments constitutifs mentionnés ci-dessus.

## Annexe 5 : Pièces graphiques



ProgTrans AG Basel

**prog***trans*

Prognoses and strategy consulting  
for transport and traffic

Henric Petri-Strasse 9  
CH-4010 Basel  
Phone +41 61 327 34 70  
Fax +41 61 327 34 71  
E-Mail [info@progtrans.com](mailto:info@progtrans.com)  
[www.progtrans.com](http://www.progtrans.com)

Rapport final

**Etude partenariat public-privé  
Traversée du Lac à Genève**

Etude de pré-faisabilité

Stephan Kritzinger (ProgTrans)

Serge Y. Bodart (IPD, Genève)

Alain Bloch (Setec)

Monica A. Schulte Strathaus (Ernst & Young)

Bâle, le 12 juillet 2013

PT 209

© 2013 ProgTrans AG