

CONTEXTE ET IMPACT HYDROGEOLOGIQUE DU PROJET CEVA SUR LE TRONÇON FRANÇAIS

HYDROGEOLOGICAL OVERVIEW AND IMPACT ON THE FRENCH SECTION OF THE CEVA RAILWAY PROJECT

Christophe JASSIONNESSE, GEOS Ingénieurs Conseils, France, christophe.jassionnesse@geos.fr

Stéphane GODARD, INGEROP, France, stephane.godard@ingerop.com

Christophe MONTANTEME, INEXIA, France, christophe.montanteme@inexia-ingenierie.com

1. LE PROJET CORNAVIN – EAUX-VIVES – ANNEMASSE (CEVA)

Le projet CEVA est le maillon central du projet de réorganisation des dessertes ferroviaires sur l'ensemble du bassin transfrontalier franco-valdo-genevois. Cette ligne, nouvelle à partir de La Praille, reliera la gare de Genève–Cornavin à celle d'Annemasse, via Genève–Eaux-Vives. Cette liaison à double voie est longue de 15.7 km dont 2 km en France, majoritairement en souterrain, y compris les gares et haltes intermédiaires.

1.1 Un peu d'histoire

L'idée d'une liaison ferroviaire entre Genève et Annemasse n'est pas nouvelle. Cela fait plus de 150 ans que l'on y pense !

La création d'une gare centrale à Genève en 1855 sur le site de Cornavin, en rive droite du Rhône est lourde de conséquences car elle empêchera pendant longtemps tout développement de voies ferrées vers la rive gauche et la Savoie, qui constituent pourtant le prolongement naturel, depuis Genève, de l'important axe commercial en direction des grands points de passages alpins.

Le rattachement de la Savoie à la France en 1860 incitera la France à créer une liaison Bellegarde – Annemasse – Thonon qui évite le territoire suisse. Pour sortir de son isolement, Genève n'a d'autre alternative que de se raccorder à sa voisine : une ligne entre Eaux-Vives et Annemasse est exploitée à partir du 1er juin 1888 par la compagnie française PLM, le tronçon jusqu'à Cornavin étant renvoyé à une date ultérieure : avec l'ouverture au début du XXe siècle du tunnel du Simplon, le projet de liaison Cornavin – Eaux-Vives tombe quand la compagnie PLM mise sur la liaison Dijon – Lausanne par Vallorbe.

En 1923, les CFF décident la réalisation de la liaison en deux étapes : la liaison Cornavin – La Praille, avec la création d'une gare marchande à La Praille, qui sera construite entre 1941 et 1949 à voie unique (doublée en 1959), puis La Praille – Eaux-Vives.

La gare de La Praille sera achevée en 1964. Différé, l'achèvement de la liaison de ceinture fut relancé en 2001 par le projet CEVA.

1.2 Les objectifs du projet CEVA

Le CEVA et les projets connexes permettent de relier l'est genevois, et plus loin Annemasse, à la gare de Cornavin, à l'aéroport de Meyrin, et au-delà en direction de Lausanne.

L'influence de l'agglomération genevoise s'étend en effet bien au-delà du canton de Genève vers le canton de Vaud et Lausanne, le pays de Gex d'une part et vers la Haute-Savoie d'autre part : c'est le bassin transfrontalier franco-valdo-genevois.

Plus d'un million d'habitants vivent dans le bassin transfrontalier d'environ 40 km de rayon. Le bassin compte également plus de 500 000 emplois avec des perspectives d'accroissement des déplacements de plus de 40% à l'horizon 2020.

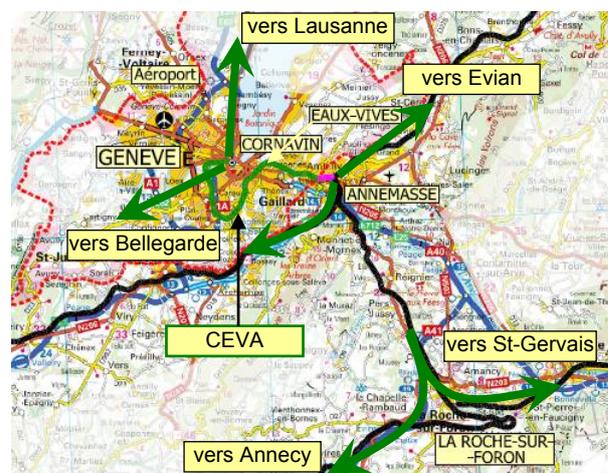


Figure 1 : Le CEVA et l'étoile ferroviaire d'Annemasse

Pour la Haute-Savoie, le projet CEVA pose la question de la modernisation des lignes de l'étoile d'Annemasse, nécessaire pour répondre à la hausse de la demande induite par la liaison jusqu'au cœur de Genève et l'amélioration des dessertes par TGV grâce à la modernisation de la ligne du Haut-Bugey.

CEVA s'accompagne donc d'une mise en place du cadencement des trains sur les 4 branches de l'étoile, vers Evian, Bellegarde, Annecy et Saint-Gervais, sans que cette amélioration des dessertes périurbaines ne soit au détriment des trains de fret.

1.3 Le projet et le tronçon français

Le projet est situé au cœur d'un ensemble de communes agglomérées, situées de part et d'autre de la frontière, qui représente actuellement environ 120 000 habitants. Annemasse, Ambilly et Gaillard sont les trois communes françaises traversées par la voie ferrée du CEVA.

La ligne CEVA entre Cornavin et Annemasse se décompose en cinq tronçons :

- 3.1 km de voie existante entre Cornavin et La Praille,
- 7.0 km de ligne nouvelle entre La Praille – Eaux-Vives à construire en double voie, essentiellement en souterrain, comprenant trois nouvelles haltes (Lancy – Pont-Rouge, Carouge – Bachet et Champel-Hôpital) et la gare de Genève- Eaux-Vives ;
- 3.6 km en double voie en tranchée couverte à la place d'une voie unique en surface, entre Eaux-Vives et la frontière, avec une nouvelle halte à Chêne-Bourg ;
- 1.5 km de double voie entre la frontière et la gare d'Annemasse, enterrée dans une tranchée couverte sur 1200 m avant de sortir à l'air libre dans une trémie pour rejoindre le niveau de la gare,
- environ 0.5 km, en gare d'Annemasse, de voie unique à doubler, et de voies à quai à réorganiser.

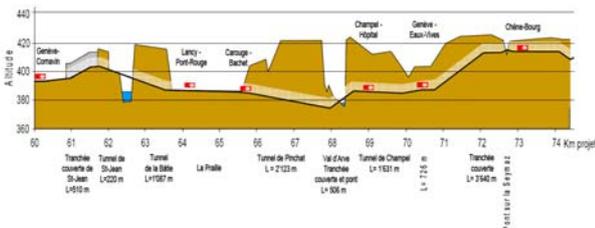


Figure 2 : Le tronçon suisse du CEVA – profil en long

Le 4^{ème} tronçon, objet du présent article, se développe sur les emprises de la ligne existante Annemasse – Eaux-Vives. Il consiste en une ligne à double voie qui plonge depuis la sortie de la gare d'Annemasse pour s'enterrer sous faible couverture et passer sous la rivière du Foron à la frontière avec la Suisse.



Figure 3 : Le tronçon français du CEVA – vue en plan

Dans la continuité du projet suisse, la tranchée couverte du tronçon français permet d'effacer la cassure urbaine représentée par la présence des rails au cœur même de la commune d'Ambilly, en favorisant l'accessibilité du site de la gare d'Annemasse, lui permettant d'assurer son rôle transfrontalier de «3^{ème} gare» de Genève.

1.4 La conception générale de l'ouvrage sur le tronçon français

Les enjeux techniques du tronçon français du projet peuvent se synthétiser ainsi :

La ligne aujourd'hui à voie unique, à l'air libre, sera enterrée et à double voie, ce qui implique l'élargissement de la plateforme ferroviaire dans une emprise étroite cernée de propriétés privées, et donc des ouvrages de génie civil conséquents pour réaliser la tranchée.

Le tronçon français ne peut pas être étudié en faisant abstraction des tronçons encadrant. Sa partie enterrée représente seulement l'extrémité d'une galerie longue au total de près de 10 km.

Le niveau de définition du projet en Suisse à ce jour très supérieur au projet en France conditionne significativement le choix fonctionnel du projet français. La hauteur libre de 6.40 m et le gabarit latéral en tranchée couverte de 3,2 m sont calés sur la base Suisse et permettent d'assurer la continuité des parements et des trottoirs de part et d'autre de la frontière.

Le contexte géotechnique est essentiel pour le choix des structures. Par exemple, la présence de galets de dimension décimétrique engendre des difficultés pour l'utilisation d'éléments de soutènement battus ou foncés. Les limites de mise en œuvre des types de soutènement ont été appréciées d'une part en fonction du contexte hydrogéologique et, d'autre part, en fonction du coût d'ouvrage. Un soutènement provisoire de type parois berlinoises qui n'est pas adaptée dans la nappe est parfaitement adapté lorsque le niveau du radier est supérieur au niveau maximum de la nappe et permet de limiter l'impact de l'ouvrage sur la nappe par l'absence de fiche étanche sous le radier. Ces soutènements provisoires seront complétés par des structures en béton armé de types «cadre fermé». Lorsque le niveau du radier est inférieur au niveau maximum de la nappe, les structures seront réalisées en parois moulées complétées par un radier étanche et une dalle supérieure. Le passage en souterrain de la voie ferrée sous le lit du Foron nécessite une dérivation provisoire dimensionnée pour la crue centennale. Le lit après travaux est reconstruit avec une capacité hydraulique identique à la capacité actuelle avec une amélioration de l'état des berges.

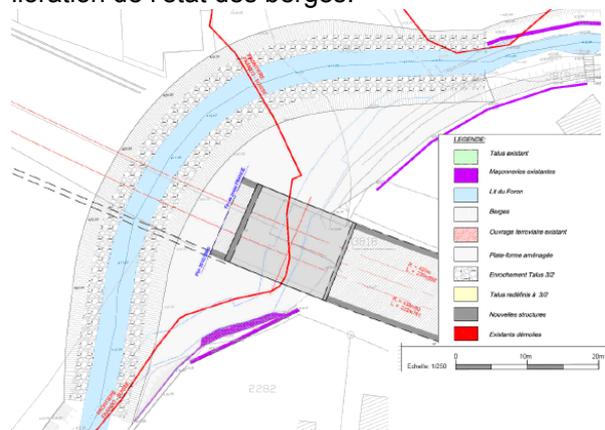


Figure 4 : La déviation provisoire du Foron

2. LE CONTEXTE GEOLOGIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE DU TRONÇON FRANÇAIS

Le principe de cohérence et d'unicité des ouvrages et de l'exploitation qui a guidé la conception de la tranchée côté français s'applique également en ce qui concerne la problématique du rétablissement des écoulements de la nappe phréatique qui est abordée ici.

2.1 Le contexte géologique

Les terrains intéressés par le projet sont constitués de dépôts fluvioglaciers qui correspondent aux faciès sablo-graveleux "de retrait wurmien" suivant la nomenclature genevoise. Les dépôts fluvioglaciers s'intercalent et se fondent au voisinage du Foron avec les dépôts glacio-lacustres de Chêne-Bougerie (Suisse). Mais elles comportent également des niveaux plus sablo-limoneux ou des graves argileuses. Au centre d'Annemasse, les formations fluvioglacières constituées majoritairement de graves sableuses, très compactes en profondeur et pouvant comporter de gros éléments pluri-décimétriques, recouvrent vers 10 m de profondeur, un niveau argilo-graveleux généralement compact, pouvant correspondre à un faciès morainique.

Sur l'axe du projet, la « stratigraphie » telle qu'elle résulte des sondages réalisés en 2009 pour le projet, correspond à un « grano-classement » des formations « fluvioglacières » et « glacio-lacustres » devenant de plus en plus fines de l'Est vers l'Ouest et du haut vers le bas, avec toutefois des intercalations erratiques, caractéristiques d'un dépôt de type « deltaïque ».

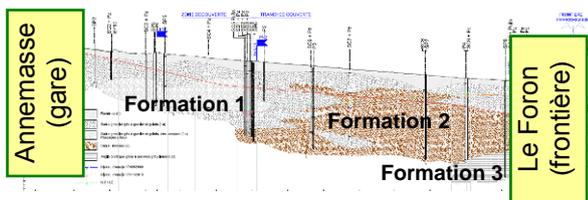


Figure 5 : La géologie du tronçon français

En dessous des remblais anthropiques et limons de couverture, il a été distingué trois faciès, sur la base de la granulométrie, de leurs propriétés géomécaniques et de leur perméabilité :

- Les sables grossiers à graviers et galets (formation notée «1» sur le profil en long ci-dessus). Du point de vue hydrogéologique, il s'agit d'une formation perméable (perméabilité en «grand» $K \approx 10^{-3}$ m/s),
- Les sables limoneux (formation notée «2»). Du point de vue hydrogéologique, il s'agit d'une formation moyennement perméable (perméabilité en «grand» $K \approx 10^{-4}$ m/s),
- Les argiles sableuses (formation notée «3»). Il pourrait s'agir d'une formation glacio-lacustre dont la base n'a pas été reconnue. Du point de vue hydrogéologique, il s'agit d'une formation peu per-

méable (perméabilité en « grand » $K \leq 10^{-5}$ m/s). Du point de vue géotechnique, il faut souligner qu'il s'agit d'une formation « sous-consolidée » et donc sensible au phénomène de consolidation.

2.2 Le contexte hydrogéologique

Suivant le profil en long géotechnique présenté ci-avant, l'ouvrage est en interaction avec la nappe sur 40 % du tronçon français, coté ouest. La nappe s'écoulant vers le sud en direction de l'Arve, l'ouvrage en tranchée, orienté est-ouest fait potentiellement barrage à cet écoulement, sur toute la largeur de l'aquifère, entre Chêne-Bougeries (Suisse) et Annemasse (France).

La nappe a été identifiée par les études réalisées en Suisse, comme étant la « nappe de Puplinge ». Cet aquifère superficiel au sein des matériaux d'épandage fluvioglacière a une extension en Suisse et en France de l'ordre de 21 km².

La cote de la nappe serait voisine de 455 NGF au Nord-Est et vers 390 NGF à son exutoire dans la nappe alluviale de l'Arve, soit un gradient d'écoulement moyen de l'ordre de 1% sur 6 km.

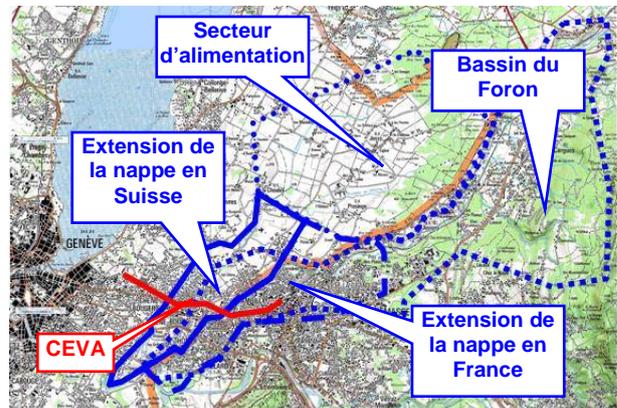


Figure 6 : L'extension de la nappe de Puplinge

L'extension de la nappe ne coïncide que très partiellement avec le bassin versant du Foron. Notamment, elle ne semble pas alimentée par la pluviométrie importante sur le massif des Voirons qui alimente le Foron. La nappe serait donc alimentée par l'infiltration directe de la pluviométrie au dessus de l'aquifère. Suivant les hypothèses sur l'extension de la zone d'alimentation et de son coefficient d'absorption de la pluviométrie, la nappe serait alors alimentée annuellement par 10 à 50 millions de m³, ce qui engendrerait un débit à l'exutoire de l'ordre de 0,3 m³/s à 1,5 m³/s.

2.2.1 Variations saisonnières du niveau de la nappe

Comme l'illustre le graphique ci-après, il a été observé une influence indirecte de la pluviométrie (courbe bleue en trait gras - valeur mensuelle moyenne sur un an) sur le niveau de la nappe de Puplinge. La corrélation faible avec les niveaux relevés dans le zone du projet traduit l'influence probable de la durée de renouvellement de l'aquifère (évaluée à un an environ) et de l'absorption des épisodes pluvieux intenses par le réseau hydrographique.

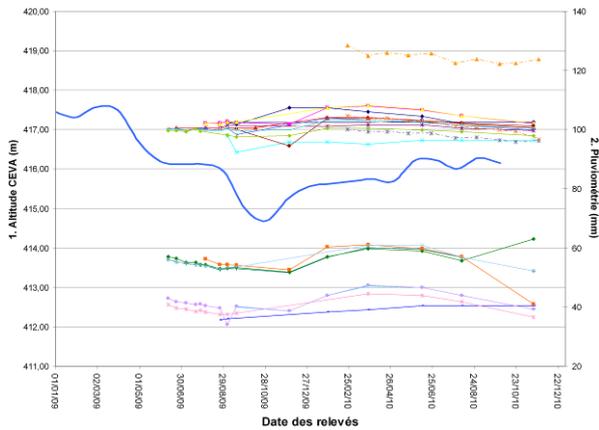


Figure 7 : pluviométrie et piézométrie dans le secteur du projet

En revanche, il paraît difficile d'extrapoler la valeur des P.H.E. centennales en fonction de la pluviométrie sur une très longue période car les cumuls pluviométriques les plus importants (1700 mm/an à Genève en 1977) correspondent à des épisodes pluvio-orageux extrêmement intenses dont l'influence sur la nappe est sans doute faible.

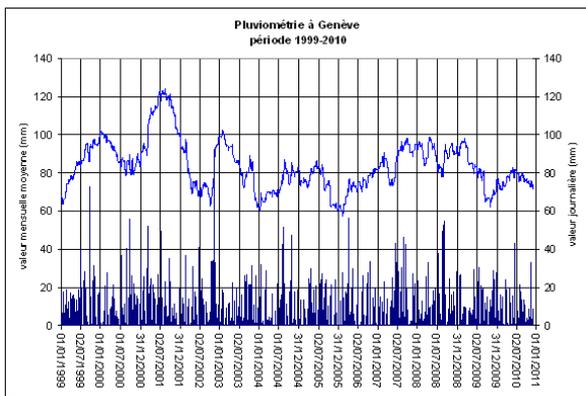


Figure 8 : pluviométrie à Genève de 1999 à 2011

2.2.2 Relation avec le régime hydraulique du Foron

Le débit d'étiage du Foron est de quelques m^3/s pour des vitesses d'écoulement de quelques m/s. Le débit global de la nappe est donc probablement inférieur à celui du Foron. Compte tenu d'un niveau de la nappe en dessous du lit du Foron, il semble que le cours d'eau puisse alimenter la nappe à l'amont (au nord) du projet. Une simulation numérique des écoulements (cf. § 3 et ci-dessous) sur un profil transversal au cours d'eau montre que le débit d'alimentation par le Foron pourrait être de l'ordre de 10 à 30% du débit total de la nappe.

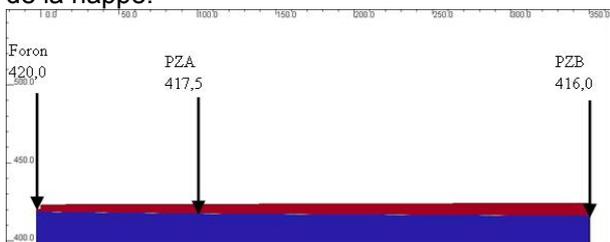


Figure 9 : simulation numérique de l'interaction nappe-

Foron

Toutefois, cet apport pourrait être partiellement compensé par un exutoire de la nappe dans le Foron à l'aval (au sud) du projet. En revanche, les crues du Foron sont générées par des épisodes pluvieux intenses mais de courte durée. La montée du niveau du cours d'eau ne peut donc pas engendrer une remontée concomitante de la nappe sur une période aussi courte, sauf en période d'excédent pluviométrique de longue durée.

3. LA MODELISATION DE L'INTER-ACTION NAPPE-OUVRAGE

3.1 L'état initial

Une modélisation des isopièzes du toit de la nappe sur un secteur assez large autour de l'ouvrage en projet a été établie :

Le contexte local semble largement conditionné par la topographie. Le rebord du plateau d'Annemasse – Gaillard, bien marqué dans la topographie par un talus raide correspond à un abaissement en altitude absolue du toit de la nappe d'une dizaine de mètres entre le plateau et la vallée alluviale de l'Arve. Il existe toutefois un «chenal» de drainage, d'orientation nord-sud, qui correspond d'un part à une concavité d'un ancien méandre de l'Arve et d'autre part à la plus grande épaisseur reconnue des formations sablo-graveleuses sur l'axe du projet. Par conséquent, l'orientation des écoulements pourrait être NW-SE sur la partie centrale du secteur d'étude correspondant au $\frac{2}{3}$ ouest du projet. Le gradient d'écoulement serait de l'ordre de 1,5 % à 2 % en moyenne mais serait seulement de 0,5 % sous le plateau de Gaillard, vers le sud.



Figure 10 : cartographie de la nappe dans le secteur du projet

Sur l'axe de l'ouvrage, le toit de la nappe présente un abaissement général de l'Ouest vers l'Est, avec un gradient apparent de 0,5 %. La profondeur de la nappe varie en sens inverse du fait du relèvement concomitant de la topographie, de 3,5 m à la frontière à 15 m au Pk 1.000. Au voisinage de la frontière (Pk 1.500 et 2.000), le toit de la nappe est à une altimétrie relativement constante et le toit de la formation argilo-limoneuse (3), peu perméable, a été reconnu entre 20 et 25 m de profondeur. En considérant cette formation comme le mur de la

nappe, la puissance de la nappe attendrait 20 m environ.

3.2 Les modélisations numériques

La méthode des éléments finis avec le logiciel Z_Soil a été utilisée pour évaluer la perméabilité des différentes couches et quantifier l'impact de l'ouvrage sur la variation du niveau de la nappe. L'étude a suivi la démarche suivante :

- une simulation d'un essai de pompage effectivement réalisé afin de caler le modèle ;
- une simulation de l'écoulement de la nappe sur un profil en travers du projet avec la prise en compte de l'interaction nappe-ouvrage.

3.2.1 Simulation d'un essai de pompage

La simulation du rabattement de la nappe par le pompage s'est fait en condition axisymétrique d'un écoulement stationnaire. Cette simulation consiste à modéliser le puits et le sol au voisinage. Le flux imposé à l'axe du modèle représente le débit de pompage continu de 50 m³/h à la profondeur de la pompe et la charge hydraulique est imposée par le niveau d'eau observé dans un piézomètre pendant le pompage d'essai.

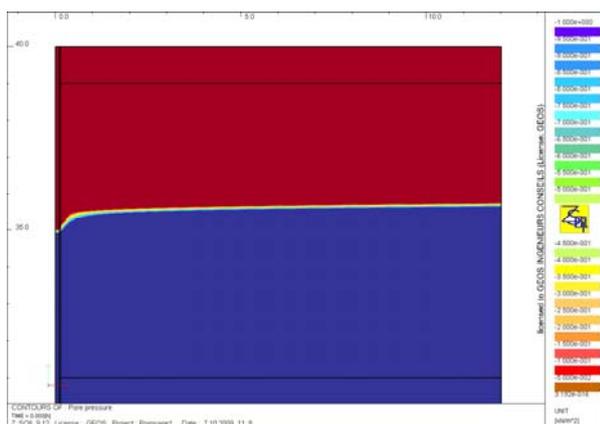


Figure 12 : simulation d'un essai de pompage - rabattement autour du puits

Pour tenir compte dans le modèle numérique de la perte de charge causée par l'écoulement turbulent dans le forage, les crépines et le tubage, le puits est modélisé par un matériau équivalent (perméabilité ≈ 100 m/s) qui donne la même perte de charge à l'aide de l'équation de Darcy-Weisbach. Le filtre granulaire autour du tube est modélisé par une couche très mince de perméabilité 10^{-3} m/s.

Le rabattement de la nappe est correctement simulé avec les perméabilités anisotropes présentées dans le tableau ci-dessous :

Formation	Perméabilité	
	horizontale Kh [m/s]	verticale Kv [m/s]
1a	$1,2 \times 10^{-3}$	$1,2 \times 10^{-4}$ à $1,2 \times 10^{-5}$
2	$3,0 \times 10^{-4}$	$3,0 \times 10^{-5}$ à $3,0 \times 10^{-6}$
3	$9,0 \times 10^{-6}$	$9,0 \times 10^{-7}$ à $9,0 \times 10^{-8}$

3.2.2 Simulation de l'interaction sur un profil en travers

Une approche analytique préliminaire a permis de mettre en évidence les facteurs influençant l'interaction nappe-ouvrage pour différents profils en travers, à savoir :

- la charge hydraulique en fond de fouille,
- le gradient d'écoulement de la nappe
- l'épaisseur de la formation la plus perméable,
- la longueur de la fiche de l'ouvrage.

Une modélisation numérique 2D des écoulements sur un profil en travers a été réalisée au voisinage du Pk 1.800 de l'ouvrage, sur un profil de 2700 m de longueur qui représente les différentes couches de sol. Les conditions aux limites sont exprimées par la charge hydraulique en définissant le niveau d'eau à l'amont et à l'aval.

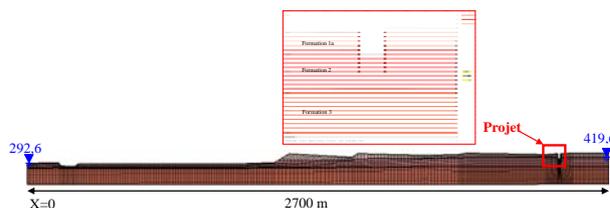


Figure 13 : simulation numérique des écoulements sur un profil en travers

Afin de comparer le modèle numérique avec le niveau de la nappe observé dans les piézomètres, un calcul d'écoulement est mené sur un profil à l'état initial avant la construction de l'ouvrage. Le débit total traversant le modèle, pour un mètre de largeur transversale, varie selon l'hypothèse d'anisotropie des perméabilités, de 10^{-5} m/s à 10^{-4} m/s, cohérent avec les estimations faites à partir du bilan pluviométrique.

3.3 L'impact de l'ouvrage

3.3.1 Impact pendant les travaux

La construction de l'ouvrage en tranchée nécessite une mise hors d'eau de la fouille par un système de pompage. La simulation montre que, pendant la construction, en raison du pompage de l'eau dans le fond de fouille, le niveau de la nappe pourrait baisser de 3 m à 5 m environ à l'aval. L'anisotropie des perméabilités a une influence notable sur le rabattement à l'amont et le débit de pompage, comme le montrent les figures ci-dessous :

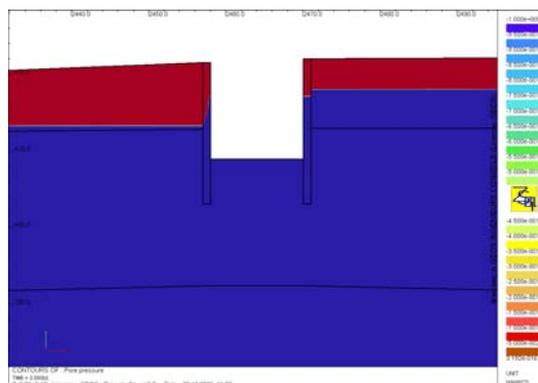


Figure 14 : Rabattement en phase de travaux - perméabilité horizontale Kh = 100 x Kv

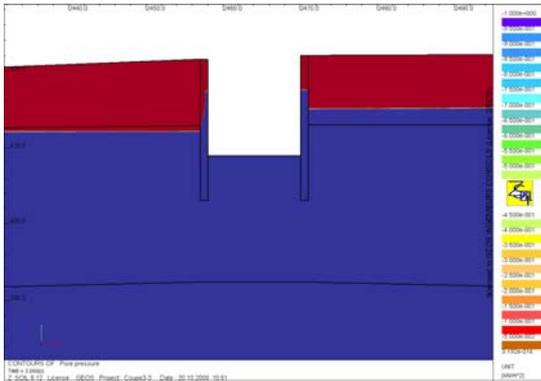


Figure 15 : Rabattement en phase de travaux - perméabilité horizontale $K_h = 10 \times K_v$

Suivant les hypothèses, un débit de pompage de l'ordre de $0,12 \text{ m}^3/\text{h/ml}$ ($K_h = 100 K_v$) à $1,20 \text{ m}^3/\text{h/ml}$ ($K_h = 10 K_v$) est attendu en fond de fouille au droit de la section de calcul.

3.3.2 Impact de l'ouvrage fini

Après la construction, l'ouvrage imperméable diminue la perméabilité du système global sol-ouvrage. En l'absence de mesure de rétablissement, la nappe remonte en amont et s'abaisse à l'aval.

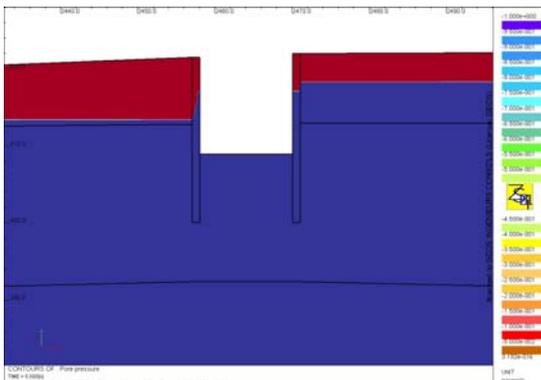


Figure 16 : Interaction nappe-ouvrage - simulation de l'effet de barrage

Afin de rétablir la transparence hydraulique, l'eau doit être pompée en amont et réinjectée à l'aval. Le fonctionnement théorique d'un tel système est illustré par la figure suivante: le niveau de la nappe n'est pas modifié à l'aval par rapport à l'état initial si on réinjecte l'eau pompée pour maintenir le niveau initial à l'amont.

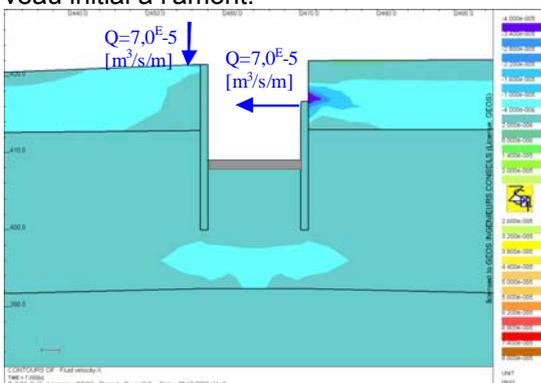


Figure 17 : Interaction nappe-ouvrage – estimation du débit à transférer

Au final, le débit à transférer de l'aval à l'amont de l'ouvrage est estimé à $0,25 \text{ m}^3 / \text{h} / \text{ml}$ au droit du profil de calcul.

4. LE RETABLISSEMENT DE LA TRANSPARENCE HYDRAULIQUE

4.1 La problématique de l'effet de « barrage »

Sur le tronçon français du CEVA, l'ouvrage en tranchée couverte intercepte la nappe perpendiculairement à sa direction d'écoulement, sur un linéaire de 600 m. La zone d'influence géotechnique de l'ouvrage peut être définie à long terme par une bande s'étendant de part et d'autre de l'ouvrage dans laquelle le niveau de la nappe subit une modification (remontée ou abaissement) due à la présence de l'ouvrage.

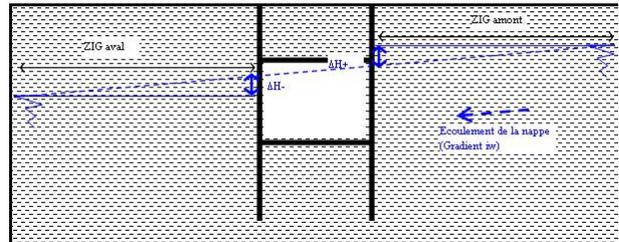


Figure 18 : Interaction nappe-ouvrage – définition de la Zone d'Influence Géotechnique

En l'absence de dispositif de rétablissement de la transparence hydraulique, la zone d'influence géotechnique (ZIG) de l'ouvrage pourrait s'étendre sur 50 m environ de part et d'autre de l'axe de l'ouvrage.

4.1.1 Dommages liés à une remontée de la nappe

A l'amont de l'ouvrage (coté nord), les principaux dommages concernent les fonctionnalités du bâti, lorsque la nappe est susceptible de remonter au dessus du niveau bas d'occupation. Selon notre estimation, le bâti mitoyen de l'ouvrage sans niveau de sous-sol, ne devrait pas subir de dommage fonctionnel notable, même en l'absence de tout dispositif de rétablissement de la transparence hydraulique. En présence d'un niveau de sous-sol, les parcelles mitoyennes pourraient être concernées par des remontées d'humidité, voire par une submersion temporaire du sous-sol en période de hautes eaux.

A l'aval de l'ouvrage, les dommages concernent essentiellement le bâti et les réseaux enterrés, soumis à des tassements de consolidation des sols. L'importance du phénomène de consolidation doit être évaluée, afin de quantifier les objectifs du «dispositif de transparence hydraulique». Le phénomène de consolidation est engendré par une augmentation de la contrainte effective dans les sols situés sous la nappe, lorsque le niveau de celle-ci est modifié de façon permanente. Cependant, le phénomène pourrait s'étaler sur plusieurs années, voir plusieurs décennies. En l'absence de dispositif de rétablissement de la transparence hydraulique, l'abaissement de la nappe, de l'ordre de 1,3 m pourrait provoquer des tassements de plus de 5 cm, et un tassement différentiel de l'ordre de 1/500 à une distance de plus de 20 m de

l'ouvrage, susceptible d'entraîner des dommages légers au bâti riverain. En revanche, un dispositif de transparence hydraulique conçu pour limiter la modification permanente du niveau de la nappe à +/- 50 cm permettrait de limiter les tassements dans une zone d'influence géotechnique étroite, sans conséquence pour le bâti.

4.2 La modélisation d'un système de rétablissement de la transparence par pompage

Les études du système de rétablissement ont bénéficié de celles menées pour le tronçon suisse du projet, avec quatre types de solution dont le fonctionnement peut être résumé par :

- Solution 1: l'eau de la nappe captée par une tranchée drainante le long de la paroi amont de l'ouvrage est restituée par des siphons de gros diamètre (visitables) passant sous le radier.
- Solution 2: l'eau de la nappe, captée par une tranchée drainante le long de la paroi amont de l'ouvrage, est pompée et réinjectée à l'aval.
- Solution 3: l'eau de la nappe, captée par des puits, est relevée par des siphons de faible diamètre fonctionnant par aspiration au dessus de la dalle et réinjectée dans des puits à l'aval.
- Solution 4: l'eau de la nappe, captée par des drains traversant la paroi amont de l'ouvrage, est réinjectée par des drains traversant la paroi aval de l'ouvrage en passant par des siphons de faible diamètre sous le radier.

Une solution de type 1 avec des siphons de gros diamètre ne semble pas économiquement adaptée au contexte du tronçon français car la réalisation d'une tranchée de captage est difficile en raison de la plus grande profondeur de la nappe, ce qui conduit à multiplier le nombre des siphons.

Une solution de type 3 avec des siphons par aspiration présente un risque de dysfonctionnement répété. Finalement, deux systèmes seulement semblent adaptés et peuvent être régénérés tout au long des 100 ans de durée de vie de l'ouvrage, depuis l'extérieur de la tranchée.

Une solution avec des puits de pompage est envisageable : comme il est souhaitable de concevoir un système de rétablissement de la nappe opérationnel dès le commencement des travaux, ce système doit permettre la réinjection de l'eau pompée dans la nappe en phase de travaux, à l'extérieur des rideaux étanches de l'ouvrage. En phase d'exploitation, le débit à transférer d'un côté à l'autre de l'ouvrage afin de maintenir la nappe à son niveau initial est compatible avec un système de pompage et de réinjection permanent. Le schéma de fonctionnement régulé du système est le suivant :

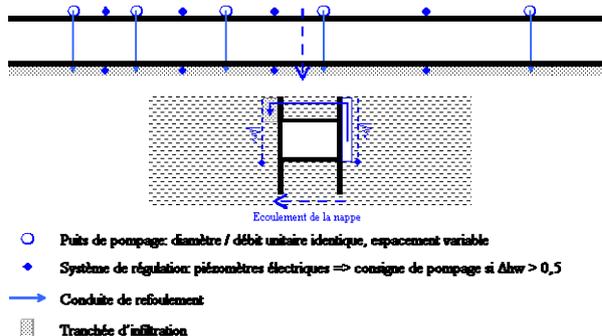


Figure 19 : Schéma de fonctionnement du rétablissement de la transparence hydraulique par pompage et réinjection

Le débit de pompage, régulé par le différentiel de niveau de nappe à l'amont et l'aval est calibré pour un fonctionnement intermittent, à 50% de sa capacité. L'espacement des puits doit alors être suffisamment faible pour permettre un rabattement acceptable de la nappe en tout point, même en mode dégradé. De plus, le suréquipement du système de pompage permettra de faire face à un épisode de crue exceptionnel. En cas d'arrêt total accidentel des pompes, le délai de remontée de la nappe ne permettant pas une intervention humaine, le système de pompage doit être pourvu d'une alimentation secourue automatique.

Une simulation numérique par éléments finis 3D du fonctionnement a permis de dimensionner le système en fonction :

- de la différence maximale admissible de niveau de nappe de part et d'autre de l'ouvrage ;
- du débit de rétablissement de la nappe qui est le débit nécessaire pour respecter le critère précédent
- du débit nominal des pompes en fonctionnement intermittent,
- du gradient hydraulique maximal à l'entrée du puits de pompage afin d'éviter le développement du phénomène « d'entraînement des fines ».

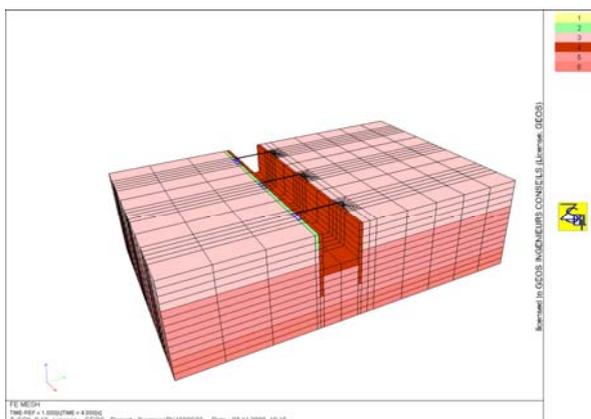


Figure 20 : Modélisation 3D du rétablissement de la transparence hydraulique par pompage et réinjection

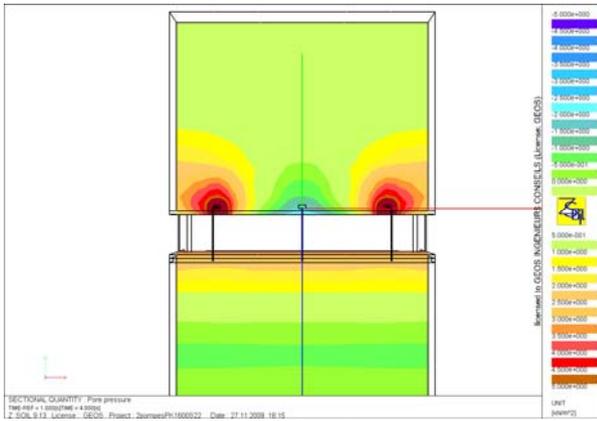


Figure 21 : Simulation du fonctionnement en mode dégradé du système de pompage et de réinjection – une pompe en panne (au centre) – abaissement (en rouge) et élévation (en bleu) du niveau de la nappe

4.3 L'alternative au pompage : un système d'écoulement gravitaire par siphon

L'eau de la nappe, captée par des « puits de décantation » à l'amont, est réinjectée dans des puits à l'aval par des siphons traversant les deux parois et passant sous le radier.

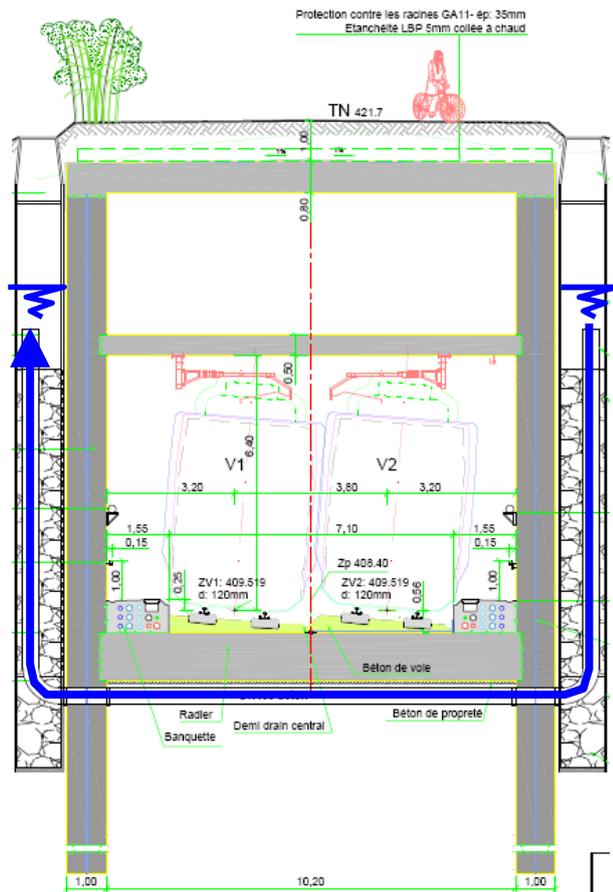


Figure 22 : Coupe descriptive du système de rétablissement de la transparence hydraulique au droit d'un siphon

L'eau est captée par un siphon de diamètre conséquent dans la partie haute du puits afin de favoriser la décantation et limiter les quantités de matières solides en transit dans la liaison sous radier.

Les puits amont et aval, sont crépinés et remplis de matériau filtrant dans leur partie intermédiaire, la partie inférieure étant en béton pour pouvoir la carotter depuis la fouille pour faire passer le siphon sous radier. Le siphon pour radier est un tube en béton, parfaitement pérenne. Il traverse les parois moulées par des carottages réalisés dans ces dernières préalablement au coulage du radier.

Ce système de siphon n'utilise que l'action du gradient hydraulique pour écouler l'eau de la nappe. Son rayon d'action, plus faible que celui du système par pompage nécessite de réduire l'espacement des puits à 10 m environ.

5. CONCLUSIONS

Envisagée depuis les premiers temps des chemins de fer alpins, la liaison ferroviaire entre Genève-Cornavin et Annemasse entre dans sa phase de réalisation, avec une vocation périurbaine, régionale et transfrontalière affirmée : c'est le projet CEVA. En unité avec la partie suisse du projet, le tronçon français du CEVA, majoritairement souterrain, doit être conçu dans la recherche d'une intégration urbaine et environnementale optimale. C'est pourquoi l'interaction de l'ouvrage en tranchée couverte avec la nappe aquifère dite « de Puplinge » a fait l'objet tant du côté suisse que français d'études assez exhaustives dès la phase d'avant-projet. Ces études ont porté en premier lieu sur la caractérisation de cet aquifère, relativement peu connu car de puissance médiocre et peu exploitable. L'ouvrage intercepte l'aquifère sur toute sa largeur d'est en ouest. La problématique de l'effet « de barrage » créé par l'ouvrage a donc été appréhendée par des modélisations numériques 2D et 3D qui ont permis, d'une part de quantifier le phénomène et les risques encourus par les avoisinants et d'autre part, de concevoir un système de « rétablissement de la transparence hydraulique ». A ce stade du projet, la conception d'un tel système suivant différents principes envisageables a fait l'objet d'une analyse multicritère. Sa compatibilité avec la conception du Génie Civil, comme avec les principes de maintenance et de durabilité adoptés pour le projet, ont été analysés ainsi que les coûts de construction et de maintenance. A l'issue de cette analyse, les deux systèmes retenus sont relativement équivalents. Toutefois, leurs coûts respectifs se répartissent différemment :

	Coût de réalisation (k€)	Coûts de maintenance et de fonctionnement (k€/an)	TOTAL sur 100 ans (k€)
Système de pompage	500	62	6700
Système gravitaire	2400	20	4400

Le choix de la solution retenue incombera au Maître d'Ouvrage.