

# Modélisation des infiltrations d'eau dans les ouvrages souterrains par la méthode des éléments finis à l'aide du logiciel CESAR - LCPC : Application sur un tunnel du métro de Paris.

Walid BOUCHENAF<sup>1</sup>, Nassima MOUHOUS-VOYNEAU<sup>1</sup>, Philippe SERGENT<sup>2</sup>, Rodolphe GUILLOIS<sup>3</sup>, Marianna CHATZIPETROU<sup>3</sup>.

<sup>1</sup> Equipe AVENUES-GSU EA 7284, département du Génie des Systèmes Urbains, Université de Technologie de Compiègne(UTC). Centre Pierre Guillaumat, rue du Docteur Schweitzer, BP 60319, 60203 Compiègne Cedex, France. Tél : +33 (0)3 44 23 79 95, Fax : +33 (0)3 44 23 52 62, E-Mail : walid.bouchenafa@utc.fr; nassima.voyneau@utc.fr.

<sup>2</sup> Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement (CEREMA). 134 rue de Beauvais – CS 60039, 60280 Margny Lès Compiègne, France. Tél : +33 (0)3 44 92 60 30, Fax : +33 (0)3 44 92 60 70. E-Mail : Philippe.Sergent@cerema.fr.

<sup>3</sup> Régie Autonome des Transports Parisiens RATP, Cellule PPRI, 50, rue Roger Salengro 94724 Fontenay sous-Bois. T 01.587.70363. E-Mail : rodolphe.guillois@ratp.fr; Marianna Chatzipetrou@ratp.fr.

---

**RÉSUMÉ.** Cet article présente une étude qui permet d'estimer le débit d'infiltration rentrant dans un tunnel en fonction de la charge de la nappe phréatique. Nous allons décrire et représenter numériquement et d'une façon détaillée, le flux d'eau entrant dans les tunnels par infiltration liée à la nappe phréatique. Pour cela nous utilisons un modèle de simulation des écoulements souterrains. Nous traitons mathématiquement un problème d'écoulement en milieu poreux non saturé qui jusqu'à présent n'est pas encore bien cerné dans le domaine des écoulements souterrains dans les tunnels de métro. Et enfin, nous appliquerons le modèle retenu sur un tunnel du métro de paris.

**ABSTRACT.** This work is devoted to flow modeling in the urban underground. This article presents a study that estimates the infiltration discharge in a subway tunnel in Paris according to the water table load. We describe and represent numerically in details the water flow incoming in tunnels by infiltration related to water table. For this we use a simulation model of groundwater flow. We mathematically treat a flow problem in unsaturated porous media which until now is still not well treated in the field of groundwater flow in the subway tunnels. An example of application and validation performed on a real case is finally presented.

**MOTS-CLÉS:** Infiltration, suintement, modélisation, perméabilité, inondation par remontée de nappe, métro.

**KEY WORDS:** Infiltration, seepage, modeling, permeability, flooding by groundwater, subway.

---

## 1. Introduction

La protection du réseau RATP contre le risque inondations nécessite une connaissance sur l'origine d'écoulement susceptible d'inonder le réseau. En effet, le réseau souterrain de la RATP est doublement menacé, il est d'abord inondé par les eaux de surface à travers les émergences. Lorsque la Seine est en crue exceptionnelle, l'eau du fleuve qui inonde la ville, pénètre à son tour dans le réseau. L'inondation du réseau RATP est aussi nourrie par-dessous, à cause de la remontée de la nappe phréatique. D'ailleurs, lors de la crue centennale en 1910, l'infiltration a été l'une des premières causes de l'ennoiement du réseau [BROC 10].

Ces écoulements souterrains sont susceptibles de modifier très nettement l'étendue du réseau directement inondé. En observant la carte de l'inondation de 1910, [PIC 10] on remarque que certains ouvrages situés dans des profondeurs moyennes hors nappes ont été la source de forts apports d'eau. La station Saint-Lazare, située à 1400 mètres du lit de la Seine a été submergée par la remontée de la nappe. Cette gare date de 1837 et accueille aujourd'hui près de 100 millions de voyageurs par an - c'est la deuxième gare de France en termes de trafic de voyageurs - , s'est retrouvée inondée en 1910.

L'eau d'infiltration s'engouffre dans toutes les ouvertures, les fissures, elle s'infiltre par capillarité dans les mortiers et les ciments des tunnels. Certaines infiltrations sont possibles par les murs. La Station Cité de la ligne 4 du métro située à deux pas de Notre Dame au plein cœur de Paris est sujette à des suintements même en cas de petites crues (Figure 1).

Mais ce n'est rien en comparaison avec la crue de 1910. Le 23 Janvier 1910 les stations de Châtelet, Saint Michel et Odéon étaient plongées dans le noir, l'eau s'est infiltrée le long du ballast de l'actuelle ligne 4 qui traverse la Seine sous fluviale, une carte postale montre un quai et des voies totalement submergées à la station Odéon, située après la station Saint Michel (Figure 2).



**Figure 1.** Les traces des infiltrations dans le tunnel de la station Cité. Juillet 2013.



**Figure 2.** Station odéon inondée par remontée de la nappe en 1910 [BOI 48].

Le problème est que, si l'on connaît bien le mécanisme de la remontée de la nappe, on ne sait pas avec précision comment se déplace l'eau à travers les tunnels et quelle est la quantité d'eau infiltrée en fonction de la charge. La protection du réseau contre les infiltrations exige une connaissance approfondie des conditions d'écoulements souterrains. Il est donc nécessaire de quantifier les infiltrations d'eau à travers les tunnels.

Cette étude a pour vocation de modéliser numériquement le flux d'eau entrant dans les tunnels en fonction de la charge de la nappe. Nous disposons de données précises sur le niveau de la nappe et le débit d'infiltration sur certains tunnels. Le niveau de la nappe est mesuré par des piézomètres, installés à Paris et gérés par l'Inspection générale des carrières. Les eaux souterraines s'infiltrant à l'intérieur du réseau RATP sont accumulées dans des cuvettes dans lesquelles le débit d'écoulement est mesuré.

Les débits d'infiltration simulés seront comparés à des mesures in situ pour valider le modèle mis en œuvre dans cette étude.



**Figure 3.** Eau d'infiltration pompée à Cité. Cuvette de cité. Juin 2013.

## 2. Modèle numérique

Plusieurs approches numériques permettent d'évaluer le flux d'infiltration dans le sous-sol urbain, notamment dans les réseaux d'assainissement [KRA 11]. Ces modèles, qui décrivent mathématiquement l'écoulement des infiltrations dans un réseau d'assainissement, sont basés sur des approches conceptuelles [BEL 95] et mécanistes [ROD 04]. Le choix du modèle numérique dans notre cas d'étude doit satisfaire les conditions aux limites proposées pour simuler mathématiquement l'écoulement par infiltration dans un tunnel de métro.

### 2.1. Equations résolues

Les infiltrations à travers les tunnels résultent de l'inondation des sols souterrains par remontée de la nappe et correspondent au type d'écoulement dans un milieu poreux non saturé. L'équation générale qui décrit les écoulements en milieu non saturé, ou équation de RICHARDS s'obtient en substituant la loi de DARCY dans l'équation de continuité [SOU 07] :

$$C \cdot \frac{\partial \phi}{\partial t} - \operatorname{div} (k_r k_s \overrightarrow{\operatorname{grad}}(\phi)) = q \quad [1]$$

Où  $q$  ( $s^{-1}$ ) est le débit volumique par unité de volume.

$\phi$  (m) est la charge hydraulique dans le sol, égale à la somme de la cote  $z$  du point considéré et de la pression réduite de l'eau  $h = \frac{p}{\rho g}$  ( $p$  est la pression de l'eau au point considéré,  $\rho$  la masse volumique de l'eau et  $g$  l'accélération de la pesanteur). Soit :

$$\phi = z + h. \quad [2]$$

$C$  ( $m^{-1}$ ) représente la capacité capillaire. Appelé coefficient d'emménagement dans certains ouvrages, il est égal à la variation de la teneur en eau  $\theta$  par unité de variation de la charge de pression et est donnée par la pente de la relation  $\theta(h)$ . On a :

$$C = \frac{\partial \theta}{\partial h} \quad [3]$$

Le coefficient  $k_s$ , représente la conductivité hydraulique à saturation. Cette grandeur représente la résistance exercée par un sol à l'égard d'un écoulement d'eau [BEA 79] et doit être déterminée de façon expérimentale

$$k_s = \frac{k \rho g f_p}{\eta} \quad [4]$$

Dont  $k$  est la perméabilité intrinsèque,  $f_p$  est la porosité et  $\eta$  est la viscosité dynamique. Le coefficient  $k_s$  ( $ms^{-1}$ ) est la perméabilité du sol saturé et  $k_r$  est le coefficient appliqué en cas de non saturation ( $k_r < 1$ ) dépendant de la teneur en eau  $\theta$  et de la charge hydraulique  $\phi$ .

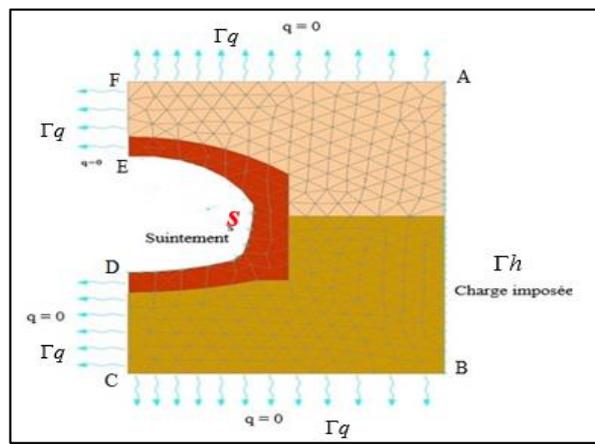
### 2.2. Conditions aux limites

L'équation de Richards est fortement non linéaire compte tenu des variations importantes que subissent la perméabilité  $k_r$  et la capacité capillaire  $C$  en fonction de la teneur en eau, Il est pratiquement impossible d'avoir une solution analytique excepté dans certains cas particuliers [POL 02, ATW 96]. Sa résolution nécessite la connaissance des caractéristiques hydrodynamiques du milieu et des conditions aux limites régnants sur les frontières géométriques. En effet, la résolution numérique du problème d'écoulement par infiltration dans les tunnels, consiste à résoudre l'équation de Richards complétée par des conditions aux limites. Mathématiquement, il existe trois types de conditions aux limites admissibles pour cette équation [POL 02]. Elles sont de type Dirichlet, Neumann et Cauchy. Sur un contour de tunnel  $\Gamma$  défini du domaine d'étude, nous pouvons opérer un découpage de  $\Gamma$  en trois facettes :

- $\Gamma h$  : Facette de la frontière soumise à la condition de **charge imposée**, c'est la condition de type Dirichlet.
- $\Gamma q$  : Facette de la frontière soumise à la condition de **flux imposé** c'est la condition de type Neumann.
- $\Gamma \lambda$  : Facette de la frontière où une condition de **type Cauchy** est imposée.

La condition limite de Dirichlet consiste à imposer une charge piézométrique sur la partie  $\Gamma_h$ , soit une charge imposée sur le côté du contour. La condition aux limites de Neumann consiste à imposer un flux d'eau  $q$  sur la partie  $\Gamma_q$  du contour, pour une partie du contour imperméable, le flux à travers ce contour est nul, soit  $q = 0$ . Dans La condition aux limites de Cauchy, le flux d'eau à travers la partie  $\Gamma_\lambda$  du contour dépend de la charge piézométrique de ce contour.

Cependant, en hydrologie une quatrième condition limite peut-être proposée, c'est une condition spécifique de l'écoulement en milieu non saturé. Cette condition s'appelle aussi la surface de suintement. Il s'agit d'une partie du contour où l'eau peut s'infiltrer mais on ne sait pas à partir de quel point le suintement se produit [POL 02]. C'est une condition mixte charge hydraulique/flux, permettant de basculer d'une condition de charge imposée à une condition de flux imposé et inversement.



**Figure 4.** Conditions aux limites imposées pour le tunnel  $\Gamma$ .

La figure 4 illustre les conditions aux limites imposées sur une moitié du domaine (l'autre partie étant symétrique). Il s'agit d'un demi tunnel homogène, soumis à une infiltration sur une partie de sa surface, ce tunnel est situé dans un massif homogène d'un sol bordé de son côté gauche d'un plan d'eau de hauteur constante.

Dans notre travail, trois conditions aux limites seront appliquées. La charge imposée comme illustré dans cette figure, représente la condition aux limites de type Dirichlet. Ainsi, lorsque l'eau s'infiltré dans le tunnel, le point d'entrée réel de l'eau est appelé point de suintement (point S dans la figure), le point de suintement S n'est pas connu. Le calcul numérique permet de définir la position de ce point de manière itérative, une condition de suintement est appliquée sur le périmètre du tunnel. Les autres contours du domaine sont considérés imperméables ; dans la zone surfacique au-dessus du tunnel et dans le substratum, ainsi que dans la partie droite où il n'y a pas de flux d'eau ni d'infiltration, la condition imposée est celle de type Neumann ( $q = 0$ ).

## 2.2. Code utilisé

Le code de calcul par éléments finis du module NSAT de CESAR-LCPC est utilisé dans notre travail pour simuler les écoulements par infiltration dans les tunnels du métro. Il a été retenu pour sa capacité à reproduire les écoulements d'in en milieu poreux, pour sa simplicité [BER 99] et pour sa disponibilité. Il permet de résoudre les problèmes d'écoulement en milieu poreux non saturé en régime permanent ou transitoire [ATW 96].

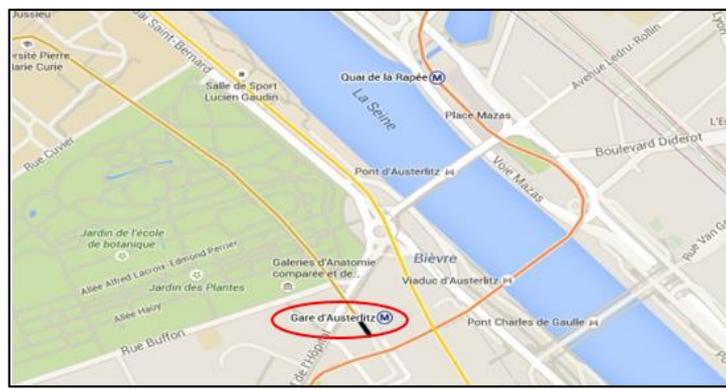
Le choix du modèle est notamment justifié par la particularité de traitement de conditions de suintement et de la difficulté de modélisation de la zone non saturée de ce milieu poreux particulier (tunnel situé dans un sol poreux). Cette méthode a été appliquée pour estimer l'écoulement dû à la remontée de la nappe au site Val d'Avaray sur la Loire (France) [POL 03].

## 3. Modélisation de l'infiltration dans un tunnel de métro à la station Austerlitz

Le cas d'application retenue un tunnel de la station d'Austerlitz. Ce site a été retenu d'une part parce qu'il a subi l'inondation par remontée de nappe lors de la crue de 1910 – ce phénomène est encore souvent observé -, et d'autre part parce que c'est le secteur sur lequel les données sont les plus abondantes. Ces données sont principalement des relevés ponctuels de la charge piézométrique de nappe et des mesures de débits au niveau du PEP.

### 3.1. Présentation du secteur d'étude

La station d'Austerlitz construite à proximité de la Seine de sorte que l'on aperçoit le fleuve depuis le quai est totalement inondable lors d'une crue du type 1910. En temps normal le niveau de la Seine avoisine le zéro de l'échelle d'Austerlitz (soit environ 26 m NGF-IGN69) et son débit est de l'ordre de 330 m<sup>3</sup>/s. En 1910, la Seine avait atteint au pic de la crue une hauteur de 8,62 m pour un débit de 240 m<sup>3</sup>/s. le niveau piézométrique dans cette station correspond au niveau de la Seine. Le transfert souterrain provenant de la nappe phréatique dépend de la structure et de la géologie du sous-sol.

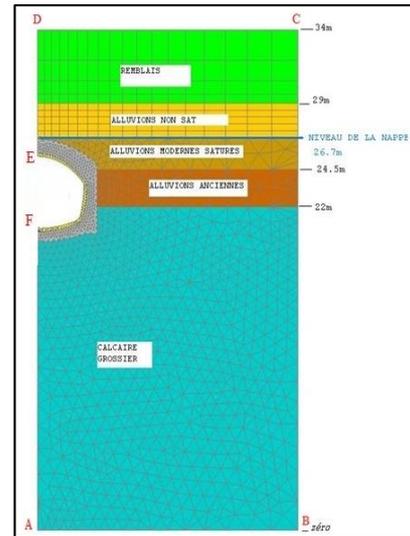


**Figure 5.** Localisation de la gare d'Austerlitz et tracé des lignes de métro au voisinage de la Seine

### 3.1.1. Le sol et ses propriétés

C'est le constituant structurant du modèle, il est identifié par ses caractéristiques géologiques et hydrodynamiques.

Cinq couches géologiques superposées sont retenues dans ce secteur d'étude. Chaque couche est considérée comme homogène est isotrope et est caractérisée par sa valeur de perméabilité verticale et horizontale. D'après la carte géologique, le secteur d'étude est constitué d'une couche de remblais superficiels de 3 à 5 m d'épaisseur, d'une couche d'alluvions modernes argileuses de 2.5 à 5 m d'épaisseur, d'une couche d'alluvions grossières d'une épaisseur de 1 à 3 m et d'une couche de calcaires grossiers de 22 m d'épaisseur. Le substratum géologique est situé en dessous de la couche de calcaires grossiers. Un tronçon de 20 m de large est choisi pour notre étude. Généralement, la hauteur du secteur d'étude varie entre 30 à 35 m. L'illustration ci-contre montre la stratification des sols à Austerlitz ainsi que le niveau piézométrique de la nappe.

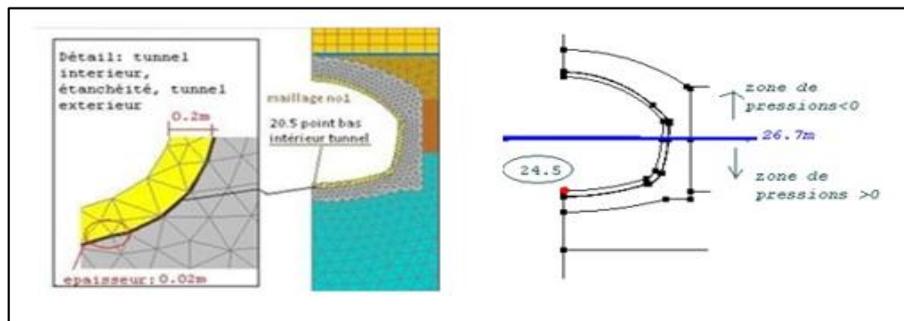


**Figure 6.** Coupe géologique du secteur d'étude (Station Austerlitz).

### 3.1.2. Le tunnel et sa géométrie

L'ouvrage souterrain comprend un tunnel de 2000 m de long. En raison de la symétrie centrale du système d'étude et afin de simplifier la géométrie, une première simplification importante consiste à considérer un axe vertical qui découpe le tunnel en symétrie. Le débit total est obtenu en multipliant le débit par deux.. La forme et la géométrie du tunnel sont récupérées à l'aide de documents graphiques de la RATP. La hauteur totale est égale à 34 m, le niveau de la nappe se trouve à 26,7 m.

L'épaisseur moyenne de tunnel est égale à 1 m. A la surface intérieure se trouve une couche d'étanchéité très mince (2 cm) qui couvre tout le périmètre du tunnel. Le rayon intérieur du tunnel fait 3,5 m et le niveau du point bas à l'intérieur du tunnel est pris à 24,5 m.



**Figure 7.** Tunnel d'Austerlitz : Coupe à deux voies et structure.

Les caractéristiques hydrauliques du tunnel et du sol sont récapitulées dans le tableau suivant :

Sol	Remblai	Alluvion moderne non saturée	Alluvion moderne saturée	Alluvion ancienne	Calcaire	Tunnel extérieur	Tunnel intérieur	Couche d'étanchéité
Perméabilité $K_s$ m/s	$4.10^{-7}$	$10^{-7}$	$10^{-7}$	$10^{-6}$	$5.10^{-8}$	$3.10^{-8}$	$3.10^{-8}$	$10^{-9}$
Porosité $\eta$	0,15	0,3	0,3	0,25	0,2	0,25	0,2	0,15

**Tableau 1.** Propriété hydraulique du secteur d'étude.

### 3.1.3. La nappe

Le niveau de la nappe est mesuré par des piézomètres (205 piézomètres installés à Paris, gérés par l'Inspection générales des carrières). En période de crue, la Seine alimente la nappe de sorte que le niveau de celle-ci s'élève et qu'elle vient s'infiltrer dans les tunnels.

Nous considérons que le niveau de la nappe correspond au niveau de la Seine puisque la gare Austerlitz est située sur le bord de Seine (rive gauche). La hauteur indiquée donc pour la nappe est celle de la Seine à l'échelle du NGF Normal. Il est donc simple de retenir comme niveau de la nappe autour de l'ouvrage, la côte de la Seine à proximité.

### 3.2. Conditions aux limites appliquées

L'application de ces conditions aux limites permet de résoudre numériquement l'équation afin d'évaluer le débit d'infiltration entrant dans le tunnel. Ces conditions sont introduites par simple remplacement de l'inconnue concernée par sa valeur.

L'axe de la Seine et le substratum forme une condition naturelle de flux nul. Sur le côté droit du terrain, une condition de Dirichlet est choisie puisque la charge appliquée est connue. En effet c'est le niveau de la nappe qui correspond à cette charge, cette condition est appliquée sur toute la hauteur de la surface verticale du côté gauche. L'intérieur du tunnel est défini comme surface de suintement. Une condition de Neumann de débit nul  $q=0$  est appliquée sur la surface. Les autres conditions appliquées pour le modèle souterrain sont les suivants :

- Segments A-B, C-D, DE, FA imperméables avec  $q=0$ ,
- Segment EF surface de suintement,
- Segment B-C charge imposée.

Les infiltrations sont dépendantes du niveau de la nappe aux alentours du réseau, les apports d'eau varient selon les périodes pluvieuses et sèches, ils sont conditionnés en effet par la hauteur du niveau de la nappe. Lors d'une précipitation soutenue survenue généralement en période hivernale le niveau de la nappe s'élève et les infiltrations peuvent apparaître en fonction du niveau de la nappe. Par contre les infiltrations sont généralement négligeables en période estivale.

La simulation des débits d'infiltration dans le tunnel du métro de la gare d'Austerlitz est effectuée avec différentes charges hydrauliques en amont. Afin de confirmer notre interprétation nous avons sélectionné deux périodes de calage, la première période correspond à la petite crue du 6 Février 2011 pour laquelle le débit des cumuls de volume d'eau entrant à travers le tunnel relevé au poste d'épuisement PEP d'Austerlitz est égale à  $5,5m^3/h$ , la charge correspondante est égale à 29,6m. La deuxième période de calage correspond la période sèche du début de juillet 2011 où le débit moyen mesuré durant cette période est égal à  $2,4m^3/h$  et la charge est égale à 26,7m.

#### 4. Résultats

L'eau transite dans les différentes couches des sols et entre dans le tunnel. En respectant la topographie, la forme et les caractéristiques des sols et du tunnel, nous avons pu simuler le débit d'infiltration entrant dans le tunnel en fonction du niveau de la nappe. En effet, les résultats de la figure 9 présentent la vitesse d'infiltration entrant à travers le tunnel selon l'axe x et y en m/s. Les vitesses simulées se situent dans la ligne de coupe au périmètre du tunnel (Ligne en rouge dans la figure 8). Le débit d'infiltration mesuré au PEP de la station d'Austerlitz est comparé aux résultats de simulation. Pour cela, il faut transformer les vitesses simulées par NSAT en débits. Dans ce cas-là, chaque vitesse modélisée est multipliée par la longueur du tronçon du maillage, la vitesse totale est la somme des vitesses de chaque tronçon de la ligne de coupe. Pour obtenir le débit il suffit de multiplier la vitesse totale par la longueur du tunnel.

La simulation du débit d'infiltration dans le tunnel du métro de la gare d'Austerlitz est effectuée avec différentes charges hydrauliques en amont. Chaque charge engendre une vitesse spécifique selon les deux axes. La figure suivante illustre la vitesse d'infiltration selon l'axe x et y de la ligne de coupe pour la charge 29,6m.

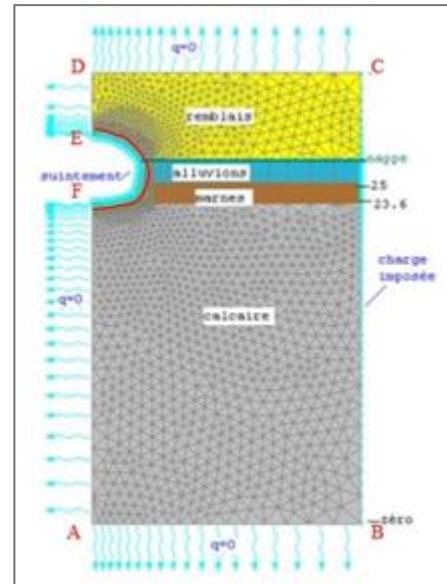


Figure 8. Ligne de coupe autour du périmètre du tunnel

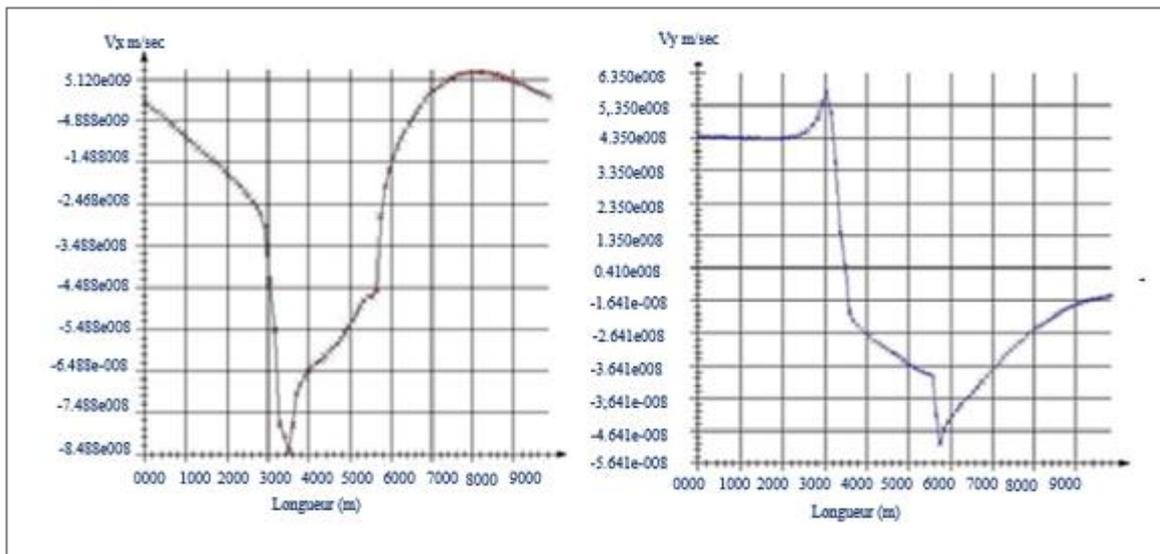


Figure 9. Vitesse d'infiltration selon l'axe x et y de la ligne de coupe pour la charge 29,6m.

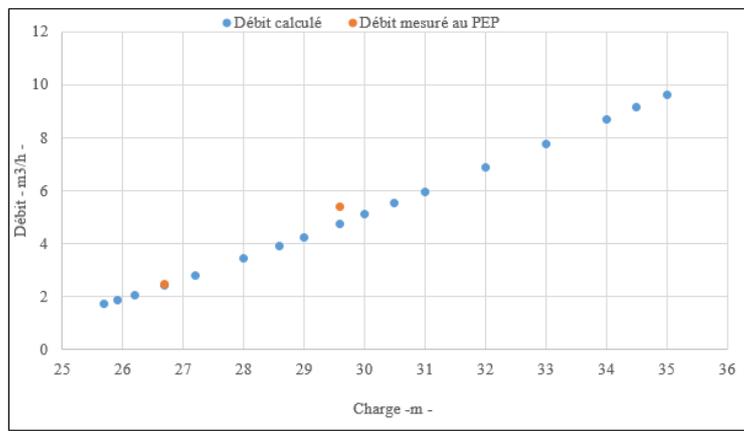
La figure 10 présente la variation du débit d'infiltration en fonction de la charge. Nous remarquons que pendant l'étiage avec une charge de 26,7m, le débit mesuré est de 2,5m<sup>3</sup>/h et coïncide presque avec le débit modélisé qui est de 2,40m<sup>3</sup>/h. Pendant la période pluvieuse et pour une charge de 29,6 m, nous constatons une légère différence entre le débit mesuré (4,75 m<sup>3</sup>/h) et le débit calculé (5,4 m<sup>3</sup>/h). Pour réduire les écarts entre les débits simulés et les débits mesurés, une correction de certains paramètres tels que la perméabilité du tunnel et celle des alluvions est nécessaire.

#### 5. Correction de la perméabilité

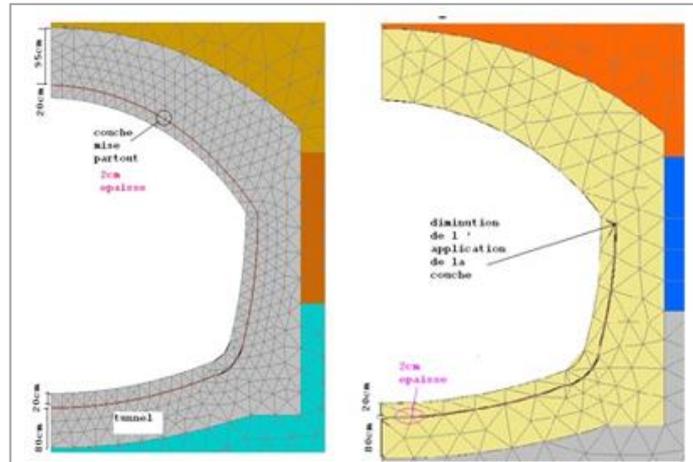
Une étape de correction des données est mise en œuvre afin de réduire les écarts entre les résultats obtenus par modélisation et les mesures du terrain.

##### 5.1. Prise en compte de l'emplacement de la couche d'étanchéité (un substrat anthropique)

Afin d'éviter toute venue d'eau intempestive à travers les tunnels de la RATP, un double rouleau a été placé autour du périmètre des tunnels, il s'agit d'un joint d'étanchéité stable de 2 cm d'épaisseur à une distance de 20 cm de la paroi intérieure du tunnel. Selon le test de carottage effectué par la RATP, le coefficient de perméabilité de cette couche varie entre 10<sup>-9</sup> et 10<sup>-10</sup> (Figure 11).



**Figure 10.** Courbe de débit d'infiltration en fonction de la charge.



**Figure 11.** Couche d'étanchéité placée autour du tunnel et à sa moitié.

Différentes modélisations sont examinées par rapport à la position du double rouleau. Nous avons constaté que dans le cas où l'étanchéité est appliquée uniquement à la moitié du périmètre du tunnel, les résultats obtenus par le NSAT sont proches des débits mesurés. Ces derniers sont récapitulés dans le tableau suivant :

	Débit Période sèche	Débit Période hivernale
Débit mesuré au PEP	2,5 m³/h	5,4 m³/h
Débit simulé sans double rouleau	2,90 m³/h	6,25 m³/h
Rouleau entourant la moitié du périmètre du tunnel	2,47 m³/h	4,93 m³/h
Rouleau entourant tout le périmètre du tunnel	2,4 m³/h	4,75 m³/h

**Tableau 2.** Débits d'écoulement en fonction de l'emplacement de la couche de protection double rouleau d'un  $k=10^{-9}$

## 5.2. Perméabilité des alluvions modernes

L'alluvion moderne est considérée comme la couche névralgique qui peut influencer les infiltrations. En effet la couche qui peut alimenter le tunnel en eau est la couche d'alluvions modernes.

Cette couche est de structure lenticulaire appartient à la catégorie des terrains de recouvrement, La composition des alluvions modernes est complexe formée de limons, de sables fins, d'argile, de vase et même de tourbe et de limons tourbeux.

La couche des alluvions modernes est scindée en deux, une partie se situe dans une zone saturée et l'autre dans une zone non saturée. C'est cette stratification qui va donner des résultats pour savoir comment le modèle se comporte par rapport au niveau d'eau. En plus, l'épaisseur de cette couche est plus grande que celle de l'alluvion ancienne. Il n'est pas évident de définir avec précision les valeurs de perméabilités de ce type de couches. Selon la littérature, ces valeurs sont assez variables et le coefficient de perméabilité varie entre  $10^{-6}$  et  $10^{-9}$ . [ROB 97].

Nous avons testé les différentes valeurs de perméabilité des alluvions modernes pour calculer le débit. La valeur de perméabilité retenue est celle qui donne des débits simulés proches des débits observés.

La valeur de K a été prise initialement égale à  $10^{-7}$ . Nous avons fait varier cette valeur pour étudier l'effet que cela produirait sur les débits simulés. Nous avons constaté qu'une perméabilité de  $8.10^{-8}$  produit des débits plus proches de ceux mesurés.

## 6. Conclusion

L'approche numérique a conduit à des résultats cohérents avec les mesures effectués sur site. Le modèle calé pour le domaine d'étude permet de simuler les infiltrations de n'importe quelle crue en faisant varier le niveau piézométrique, et de corriger certains paramètres tels que l'emplacement de la couche d'étanchéité dans le tunnel et les caractéristiques du sol.

Cette application a prouvé que le modèle retenu est adapté à la modélisation des infiltrations à travers un tunnel de métro, même si le calcul exige beaucoup de données, particulièrement sur les couches du sol et le niveau de la nappe. La modélisation n'est pas spécifique, à condition de réunir assez de données. Elle peut être généralisée au reste du réseau où les infiltrations sont importantes, que ce soit pour une crue centennale ou pour des petites crues.

## Bibliographie

- [ATW 96] ATWA, M., Analyse numérique des écoulements d'eau et de la consolidation des sols autour des tunnels creusés dans l'argile. Thèse de doctorat à l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1996. p. 475.
- [BEA 79] BEAR, J., Hydraulics of Groundwater. [éd.] Technion Israel Institute of Technology. Department of civil and Environmental Engineering, 1979. P569.
- [BEL 95] Belhadj, N., Joannis, C., Raimbault, G., «Modelling of rainfall induced infiltration into separate sewerage». *Water Science and Technology*, 1995. P 161-168.
- [BER 99] BERTHIER, E., Contribution à une modélisation hydrologique à base physique en milieu urbain. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, 1999. p. 196.
- [BOI 48] BOIS A., L'épuisement des eaux au Chemin de fer Métropolitain de Paris. Paris : Chemin de Fer Métropolitain de Paris, 1948. p. 218.
- [BRO 10] BROCHET J., GUILLOIS R. «Crue centennale, la position d'un maître d'ouvrage particulièrement exposé : La RATP. Paris», *Colloque SHF : Risques inondations en Ile de France*, 2010. pp. 177-185.
- [KRA 11] KRAPP C., KREBS P., «Quantification of groundwater infiltration and surface water inflows in urban sewer networks based on a multiple model approach». *Water Research*, 2011. Vol. 45. P3129-3136.

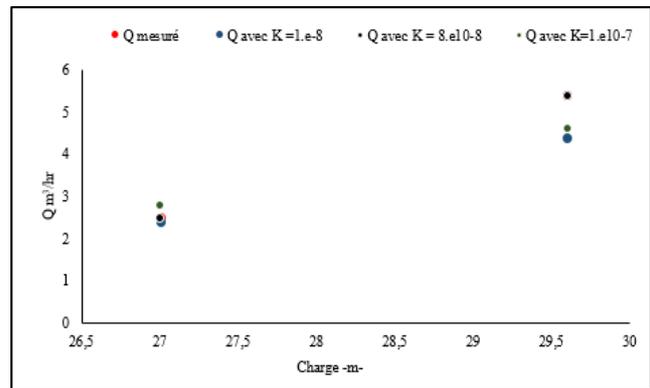


Figure 12. Choix de coefficient de perméabilité pour les alluvions

[PIC 10] Picard A., Chemin de Fer Métropolitain De Paris. s.l. : Rapprt général de Picard, 1910. p. 87.

[POL 02] POLIGOT-PITSCH S., Modélisation des échanges entre nappe et rivière. Application au Val d'Avary. Thèse de doctorat. Université Technologique de Compiègne UTC, 2002. p. 182.

[POL 03] Poligot-Pitsch S., Sergent P., Dhatt G., «Modélisation tridimensionnelle des remontées de nappe et inondations au Val d'Avary», *L'hydraulique numérique*. 2003. P267 - 295,

[ROB 97] ROBITAILLE V., TREMBLAY D., Mécanique des sols. Théorie et Pratique. s.l. : Modulo. P641, 1997.

[ROD 04] RODRIGUEZ F., MORENA F., ANDRIEU H., «Development of a Distributed Hydrological Model Based on Urban Databanks», *Conference on Urban Drainage Modelling*. 2004. P 561 - 570 (Dresden).

[SOU 07] SOUTTER M., MERMOUD A., MUSY A. 2007. INGENIEURE DES EAUX ET DU SOL. PROCESSUS ET AMÉNAGEMENT. PRESSES POLYTECHNIQUES ET UNIVERSITAIRES ROMANDES, 2007. P. 294.