

## Modélisation des infiltrations dans les ouvrages souterrains par la méthode des éléments finis : Application sur un tunnel de métro parisien

### [ Modeling infiltrations in underground structures using a finite elements method : A subway tunnel application in Paris ]

Walid Bouchenafa<sup>1</sup>, Nassima Mouhous-Voyneau<sup>1</sup>, Philippe Sergent<sup>2</sup>, Rodolphe Guillois<sup>3</sup>, and Marianna Chatzipetrou<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Equipe AVENUES, département du Génie des Systèmes Urbains, Université de Technologie de Compiègne (UTC), France

<sup>2</sup>Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement (CEREMA), France

<sup>3</sup>Régie Autonome des Transports Parisiens RATP, Cellule PPRI, France

---

Copyright © 2018 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the *Creative Commons Attribution License*, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

**ABSTRACT:** This work is devoted to flow modeling in the urban underground. This article presents a methodology for estimating infiltration discharge entering a tunnel as a function of groundwater table. Discharge entering the tunnels by groundwater infiltration is modeled and detailed by a numerical approach based on underground flows simulation model. It is about mathematically solving a flow problem in an unsaturated porous medium. This problem until now is not yet well understood in underground flows field in subway tunnels. Finally, an application example and validation performed on one of Paris subway tunnel is presented.

**KEYWORDS:** Seepage, permeability, infiltration, flooding by groundwater, subway, NSAT-CESAR.

**RÉSUMÉ:** Cet article présente une méthodologie permettant d'estimer le débit d'infiltration entrant dans un tunnel en fonction de la charge de la nappe phréatique. Le flux d'eau entrant dans les tunnels par infiltration liée à la nappe phréatique est modélisé et détaillé par une approche numérique basée sur un modèle de simulation des écoulements souterrains. Il s'agit de résoudre mathématiquement un problème d'écoulement en milieu poreux non saturé. Ce problème jusqu'à présent, n'est pas encore bien cerné dans le domaine des écoulements souterrains dans les tunnels de métro. Enfin, un exemple d'application et de validation réalisé sur un des tronçons de tunnel du métro parisien est présenté.

**MOTS-CLEFS:** Suintement, perméabilité, infiltration, inondation par remontée de nappe, métro, NSAT-CESAR.

## 1 INTRODUCTION

La protection du réseau du métro parisien géré par la Régie Autonome des Transports Parisiens (RATP) contre le risque d'inondations nécessite une meilleure connaissance sur l'origine des écoulements susceptible d'inonder le réseau. En effet, le réseau souterrain de la RATP est doublement menacé. Il l'est d'abord par les eaux de surface qui transitent à travers les émergences. Et si 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. Lors de la crue centennale en 1910, les infiltrations ont été l'une des premières causes de l'ennoiement du réseau [1].

Ces écoulements souterrains sont susceptibles de modifier très nettement l'étendue du réseau directement inondé. En observant la carte de l'inondation de 1910 [2], 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. Elle est de par ce trafic la deuxième gare de France en termes de voyageurs. Elle s'est retrouvée inondée en 1910.

L'eau d'infiltration s'engouffre dans toutes les ouvertures, même dans les fissures ; elle s'infiltré par capillarité dans les mortiers de revêtement et bétons constitutifs des tunnels. Certaines infiltrations se manifestent au travers des parois revêtus ou non. Pour illustration, la Station *Cité* de la ligne 4 du métro parisien située à deux pas de Notre Dame en plein cœur de Paris est sujette à des suintements même en cas de petites crues (figure 1).

Mais rien de comparable avec la crue de 1910. Le 23 janvier 1910, les stations du *Châtel*, de *Saint-Michel* et d'*Odéon* étaient totalement plongées dans l'obscurité complète, l'eau s'était infiltré le long du ballast de l'actuelle ligne 4 qui traverse la Seine sous fluviale. Une carte postale montre un quai et les voies totalement submergés à la station *Odéon*, située après la station *Saint-Michel* (figure 2).



**Fig. 1. Traces infiltrations observées sur les parois du tunnel de la station "cité" en juillet 2013**



**Fig. 2. Station "Odéon" inondée par remontée de la nappe en 1910, [3]**

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 parois des tunnels et quelle est la quantité d'eau infiltrée en fonction de la charge hydraulique. La protection du réseau de transport souterrain par métro métropolitain 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 concerne la modélisation numérique des flux d'eau entrant dans les tunnels en fonction de la charge de la nappe phréatique. Pour ce faire, des données précises sur le niveau de la nappe et le débit d'infiltration pour certains tunnels sont disponibles. Le niveau de la nappe est mesuré à l'aide des 205 piézomètres installés dans Paris. Ils sont gérés par l'Inspection Générale des Carrières (IGC). Les eaux souterraines d'infiltration à l'intérieur du réseau métropolitain de la RATP sont accumulées pour des cuvettes dans lesquelles le débit d'écoulement d'infiltration est mesuré.

Les débits d'infiltration déduits de la simulation numérique seront comparés à des mesures *in-situ* pour valider le modèle mis en œuvre dans cette étude.



Fig. 3. Eau d'infiltration pompée à la station "Cité" à partir d'une cuvette en 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 [4]. Ces modèles, qui décrivent mathématiquement l'écoulement des infiltrations dans un réseau d'assainissement, sont basés sur des approches conceptuelles [5] et mécaniques [6]. Le modèle numérique retenu dans le cas de cette étude doit satisfaire les conditions aux limites proposées pour résoudre mathématiquement l'écoulement d'infiltration dans un tunnel d'un réseau de métro.

### 2.1 EQUATIONS GOUVERNANT LE PROBLÈME

Les infiltrations à travers les tunnels résultant d'inondation des sols souterrains par remontée de la nappe correspondent à des écoulements dans un milieu poreux non saturé. L'équation générale des écoulements en milieu non saturé, ou équation de Richards s'obtient en substituant la loi de Darcy dans l'équation de continuité [7], elle s'écrit :

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

$q$  ( $s^{-1}$ ) est le débit volumique par unité de volume et  $\phi$  (m) la charge hydraulique dans le sol. Cette charge est égale à la somme de la cote  $z$  du point considéré et de la pression réduite de l'eau  $h = \frac{p}{\rho g}$ . La grandeur  $p$  est la pression de l'eau au point considéré,  $\rho$  la masse volumique de l'eau et  $g$  l'accélération de la pesanteur. D'où :

$$\phi = z + h \quad (2)$$

$C$  ( $m^{-1}$ ) représente la capacité capillaire. Il est aussi appelé coefficient d'emménagement dans certains ouvrages. Il est égal à la variation de la teneur en eau massique  $\theta$  par unité de la charge due à la pression ;  $c$  est la pente de la relation  $\theta$  ( $h$ ). On a aussi :

$$C = \frac{\partial \theta}{\partial h} \quad (3)$$

Le coefficient  $k_s$  ( $ms^{-1}$ ) représente la conductivité hydraulique à saturation. Cette grandeur correspond à la résistance exercée par un sol à l'égard d'un écoulement d'eau [8]. Il doit être déterminé de façon expérimentale. Il est exprimé par :

$$k_s = \frac{k \rho g f_p}{\eta} \quad (4)$$

$k$  est la perméabilité intrinsèque du milieu du sol,  $f_p$ , la porosité et  $\eta$  la viscosité dynamique. Le coefficient  $k_s$  ( $\text{ms}^{-1}$ ) est la perméabilité du sol saturé, le coefficient  $k_r$  s'applique en cas de non saturation ( $k_r < 1$ ), il dépend de la teneur en eau  $\theta$  et de la charge hydraulique  $\varphi$ .

## 2.2 CONDITIONS AUX LIMITES

L'équation de Richards est fortement non linéaire compte tenu des variations importantes que subissent la perméabilité  $k_s$  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 [9], [10]. Sa résolution nécessite la connaissance des caractéristiques hydrodynamiques du milieu et des conditions aux limites régnant sur les frontières géométriques. En effet, la résolution numérique du problème d'écoulement d'infiltration dans les tunnels consiste à résoudre l'équation de Richards complétée par des conditions aux limites. Du point de vue mathématique, il existe trois types de conditions aux limites admissibles pour cette équation [11]. Elles sont de type Dirichlet, Neumann et Cauchy. Sur un contour de tunnel  $\Gamma$  défini du domaine d'étude, un découpage du contour  $\Gamma$  peut être opéré sur trois facettes à savoir :

- $\Gamma_h$  : Facette de la frontière soumise à la condition de **charge hydraulique 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 aux limites de Dirichlet consiste à imposer une charge piézométrique sur la partie  $\Gamma_h$ , soit une charge hydraulique imposée sur le côté du contour. Celle 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  $q = 0$ . Pour 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 d'un écoulement en milieu non saturé. Cette condition s'appelle aussi "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 [9]. 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.

La figure 4 illustre les conditions aux limites imposées sur une moitié de 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 dans un massif homogène d'un sol bordé de son côté droit d'un plan d'eau de hauteur constante.

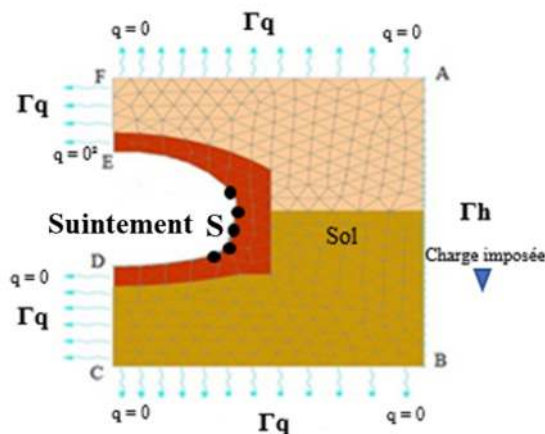


Fig. 4. Conditions aux limites imposées sur le contour du tunnel

Dans l'étude, trois conditions aux limites sont appliquées. La charge imposée sur la figure 4, 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, (voir point S sur la figure 4) ; 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. Ils se trouvent dans la zone en surface au-dessus du tunnel, dans le

substratum et 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 ( $q = 0$ ).

### 2.3 CODE UTILISÉ

Le code de calcul par éléments finis du module NSAT du logiciel CESAR-LCPC est utilisé dans ce travail pour simuler les écoulements d'infiltration dans les tunnels souterrains du métro. Il a été retenu pour sa capacité à reproduire des écoulements d'infiltration en milieu poreux, pour sa simplicité [12] et pour sa disponibilité. Il permet de résoudre les problèmes d'écoulement en milieu poreux non saturé en régime permanent ou transitoire [10].

Le choix du modèle est notamment justifié par la particularité du traitement des 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 déjà été appliquée pour estimer l'écoulement dû à la remontée de la nappe au site Val d'Avaray sur la Loire (France) [11].

## 3 MODÉLISATION DE L'INFILTRATION DANS LE TUNNEL DE MÉTRO DE LA STATION AUSTERLITZ

Le cas d'application traité concerne le tunnel de la station d'*Austerlitz*. Ce site a été retenu d'une part, parce qu'il a subi une inondation par la remontée de nappe lors de la crue de 1910 et de plus ce phénomène est encore souvent observé. Et d'autre part, parce que c'est un secteur pour lequel les données sont les plus abondantes. Ces données sont principalement des relevés ponctuels de la charge piézométrique de la nappe et des mesures de débits au niveau des postes d'épuisement [13].

### 3.1 PRÉSENTATION DU SECTEUR D'ÉTUDE

La station d'*Austerlitz* a été construite à proximité de la Seine. En effet, on aperçoit le fleuve depuis le quai. Elle est totalement inondable comme relevé lors de la crue de 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 2400 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.



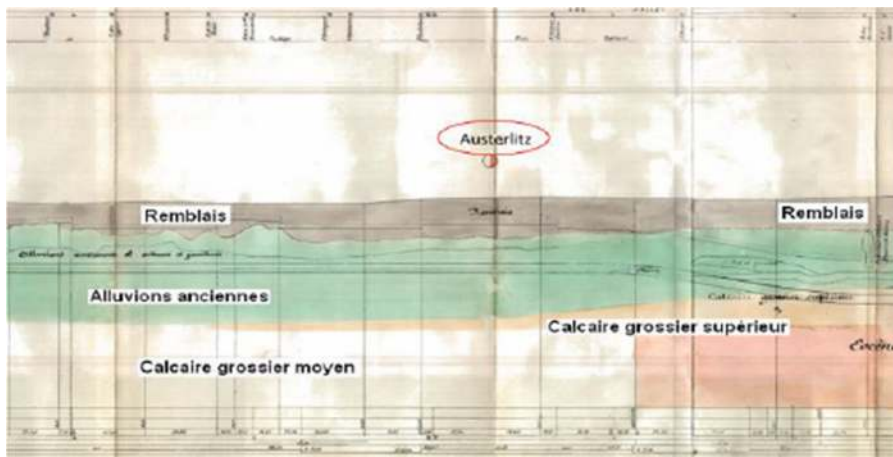
Fig. 5. Gare d'Austerlitz et tracé de ligne de métro au voisinage de la Seine

#### 3.1.1 LE SOL ENVIRONNANT

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

Cinq couches géologiques se superposant sont retenues dans le secteur étudié. Chaque couche est considérée comme un milieu homogène et isotrope. Elle est caractérisée par une 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 argileuse d'alluvions modernes argileuse de 2,5 à 5 m d'épaisseur, d'une couche d'alluvions grossiers 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 limité de 20 m de large est choisi pour l'étude. La hauteur d'étude varie entre 30 à 35 m. La stratification des sols au niveau de la station d'Austerlitz sont montrés à la figure 6.

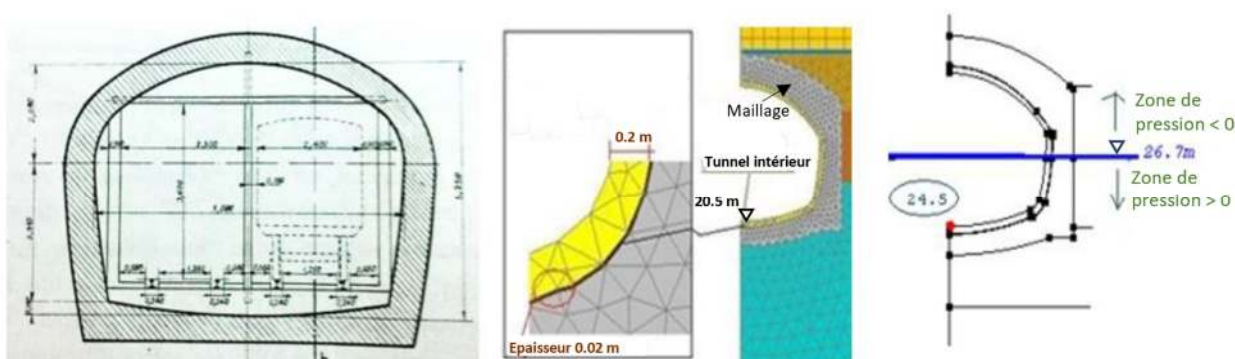


**Fig. 6. Profil géologique du secteur d'étude**

**3.1.2 GÉOMÉTRIE DU TUNNEL**

L'ouvrage souterrain considéré comprend un tunnel de 2000 m de long. En raison de la symétrie centrale du système étudié et afin de simplifier la géométrie, toute condition aux limites étant égale et respectant cette symétrie. Les résultats obtenus seront identiques pour chaque demi-tunnel. Alors le débit total est obtenu par addition des deux débits identiques relatifs à chaque demi-ouvrage. La forme et la géométrie du tunnel sont élaborées à l'aide de documents graphiques de la RATP. Un tronçon de 20 m de large est finalement choisi quant à l'environnement de l'ouvrage. La hauteur des stratifications des couches est déduite des coupes géologiques. La hauteur totale est 34 m, le niveau de la nappe se trouve à + 26,7 m.

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



**Fig. 7. Tunnel d'Austerlitz : coupe à deux voies, géométrie, environnement et maillage**

Les perméabilités et porosités du sol environnant le tunnel et des matériaux le constituant sont récapitulées dans le tableau 1.

Tableau 1. Propriétés des matériaux et d'ouvrage hydrauliques du sol environnant

Sol	Remblai	Alluvion moderne non saturée	Alluvion moderne saturée	Alluvion ancienne	Calcaire	Tunnel extérieur	Tunnel intérieur (béton)	Couche d'étanchéité intérieure
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	0,30	0,30	0,25	0,20	0,25	0,20	0,15

### 3.1.3 POSITION DE LA NAPPE PHRÉATIQUE

Le niveau de la nappe est mesuré par des piézomètres. En période de crue, la Seine alimente la nappe. L'eau du fleuve recharge la nappe, le niveau s'élève et vient s'infiltrer dans les tunnels.

Le niveau de la nappe considéré et celui qui correspond au niveau de la Seine, la station *Austerlitz* est située en bordure de la Seine, rive gauche. La hauteur indiquée pour la nappe est donc celle de la Seine à l'échelle IGN69. Le niveau de la nappe autour de l'ouvrage est la côte du niveau de la Seine à proximité de la station de mesure.

### 3.2 CONDITIONS AUX LIMITES APPLIQUÉES

L'application des conditions aux limites permet de résoudre numériquement l'équation de Richards afin d'évaluer le débit d'infiltration entrant dans le tunnel.

Le substratum forme une condition naturelle de flux nul, comme illustré dans la figure 8. Sur le côté droit du terrain, une condition de Dirichlet est choisie puisque la charge hydraulique appliquée est connue. En effet, c'est le niveau de la nappe qui correspond à cette charge. Cette condition s'applique sur toute la hauteur de la surface verticale du côté droit. L'intérieur du tunnel est défini comme une surface de suintement. Les autres conditions appliquées au modèle souterrain sont représentées dans le tableau 2.

Tableau 2. Conditions aux limites imposées pour le secteur étudié

Segment	$\overline{AB}$	$\overline{BC}$	$\overline{CD}$	$\overline{DE}$	$\overline{EF}$	$\overline{FA}$
Conditions aux limites	Neuman $q = 0$	Dirichlet Charge imposée	Neuman $q = 0$	Neuman $q = 0$	Surface de suintement	Neuman $q = 0$

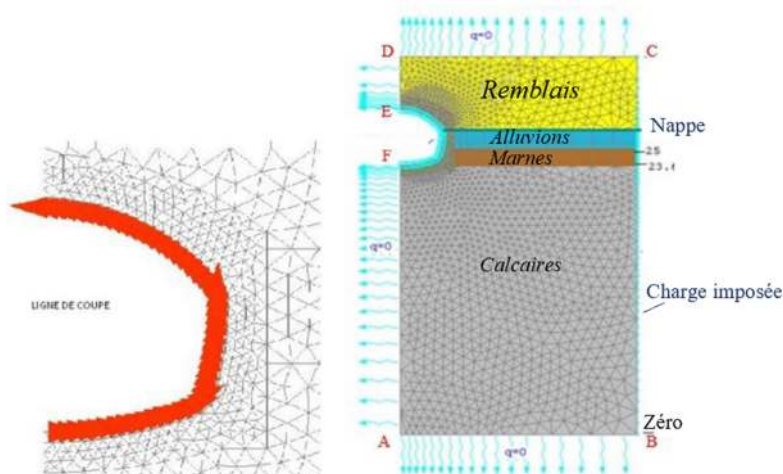
Les infiltrations sont dépendantes du niveau de la nappe aux alentours du tunnel. Les apports d'eau varient selon les périodes pluvieuses et sèches, ils conditionnent la hauteur du niveau de la nappe. Lors d'une précipitation soutenue, généralement survenue en période hivernale, le niveau de la nappe s'élève et des infiltrations peuvent apparaître. Cependant, les infiltrations sont généralement négligeables en période estivale.

La simulation des débits d'infiltration dans le tunnel du métro à la station *Austerlitz*, est effectuée pour différentes charges hydrauliques. Afin de valider l'interprétation des résultats obtenus numériquement, deux périodes de calage ont été sélectionnées. La première période correspond à une petite crue survenue date du 6 février 2011 pour laquelle le débit cumulé des volumes d'eau entrant à travers le tunnel relevé au poste d'épuisement à la station *Austerlitz* était égal à 5,5 m<sup>3</sup>/h. Le niveau de la charge hydraulique correspondait à 29,6 m. La deuxième période de calage correspondait à une période sèche en début de juillet 2011 où la valeur de l'écoulement mesurée durant cette période était égale à 2,4 m<sup>3</sup>/h. Le niveau de la charge hydraulique correspondait à 26,7 m.

## 4 APPROCHE PHÉNOMÉNOLOGIQUE DES PROCESSUS

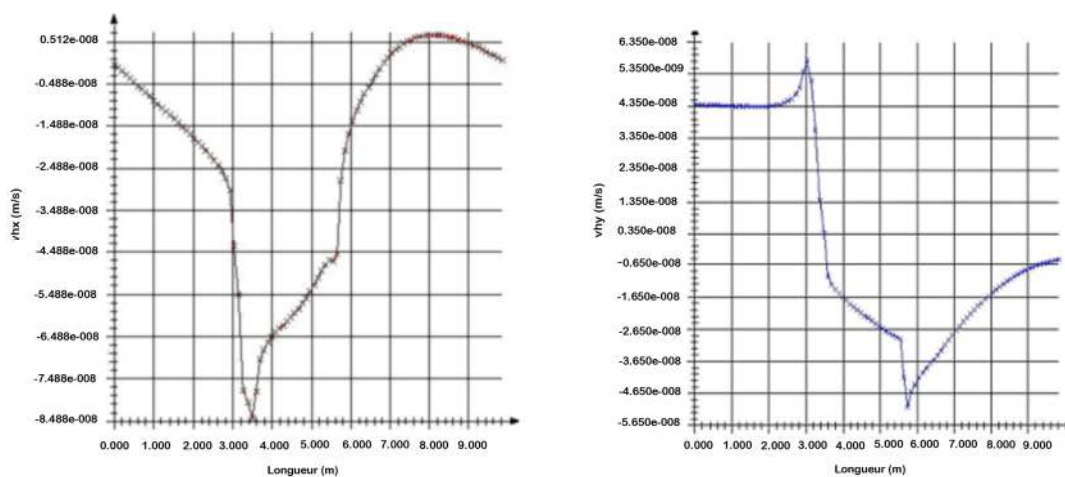
L'eau transite dans les différentes couches des sols pour s'infiltrer dans le tunnel. En respectant la topographie, la forme et les caractéristiques des sols et du tunnel, nous avons pu simuler le débit d'infiltration entrant dans le tunnel en fonction du niveau de la nappe. La figure 9 montre la vitesse d'infiltration en m/s entrant à travers le tunnel selon les coordonnées en axe x et y. Les vitesses calculées se situent dans la ligne de coupe au périmètre du tunnel comme illustré dans la figure 8. Le débit d'infiltration mesuré au poste d'épuisement à la station *Austerlitz* est comparé aux résultats issus de la simulation. Pour cela,

il faut transformer les vitesses calculées par le module NSAT en débit. Dans ce cas présent, chaque vitesse modélisée est multipliée par la longueur du tronçon du maillage, la vitesse totale est la somme des vitesses calculées au long de la ligne de coupe. Pour obtenir le débit il suffit de multiplier la vitesse totale par la longueur du tunnel. Sachant que ces résultats représentent le débit d'infiltration à travers un demi-tunnel, il suffit de doubler la valeur de débit pour obtenir le débit complet à travers tout le tunnel.



**Fig. 8. Ligne de coupe autour du périmètre du tunnel et conditions aux limites appliquées sur le domaine étudié**

La simulation du débit d'infiltration dans le tunnel du métro de la station *Austerlitz* est effectuée avec différentes charges hydrauliques. Chaque charge engendre une vitesse spécifique selon les deux axes. La figure 9 illustre la vitesse d'infiltration selon l'axe x et y de la ligne de section transversale de la paroi pour une charge de 29,6 m.



**Fig. 9. Vitesse d'infiltration simulée pour une charge hydraulique de 29,6m**

Après plusieurs calculs menés dans cette zone, une courbe de variation du débit d'infiltration en fonction de la charge est obtenue (voir figure 10).

Nous remarquons que pendant l'étiage avec une charge de 26,7m, le débit mesuré est de 2,5m<sup>3</sup>/h coïncide correctement avec le débit modélisé qui est de 2,40 m<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 qui égale à 5,4 m<sup>3</sup>/h. Pour réduire cet écart, une correction de certains paramètres tels que la perméabilité du tunnel et celle des alluvions est nécessaire.



## 5 CORRECTION ET VALIDATION

Une étape de correction des données est donc mise en œuvre pour minimiser les écarts entre les résultats numériques et les mesures du terrain.

### 5.1 PRISE EN COMPTE DE L'EMPLACEMENT DE LA COUCHE D'ÉTANCHÉITÉ (UN SUBSTRATUM ANTHROPIQUE)

Afin d'éviter toute venue d'eau intempestive à travers les tunnels du réseau métropolitain, une double épaisseur de matériau étanche a été placée à la périphérie des tunnels. Il s'agit d'un joint d'étanchéité élastomère de 2 cm d'épaisseur positionnée à une distance de 20 cm de la paroi intérieure du tunnel. A partir d'un test de carottage effectué par la RATP, le coefficient de perméabilité de ce joint varie entre  $10^{-9}$  et  $10^{-10}$ .

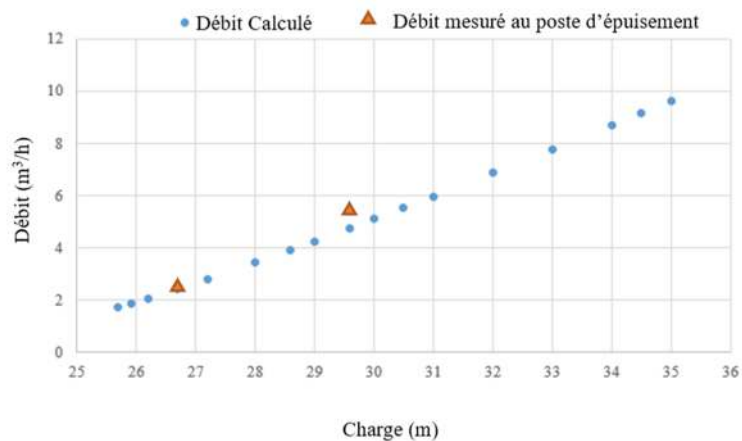


Fig. 10. Courbe de débit d'infiltration en fonction de la charge

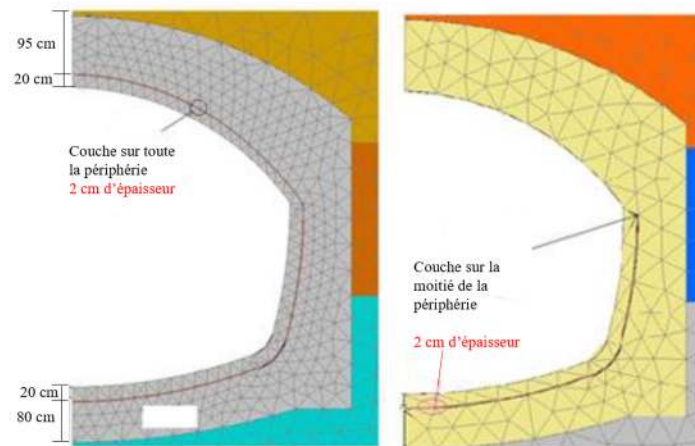


Fig. 11. Position de la couche d'étanchéité à la périphérie

Différentes simulations ont été examinées en fonction de la position de la couche d'étanchéité. Nous avons constaté que dans le cas où l'étanchéité est appliquée à la moitié, les résultats numériques sont proches des résultats mesurés. Les résultats des débits sont récapitulés dans le tableau 3.

Tableau 3. Débits d'écoulement calculés en fonction de l'emplacement de la couche d'étanchéité pour un coefficient de perméabilité  $k = 10^{-9}$  m/s

	Débit en période sèche	Débit en période hivernale
Débit mesuré au poste d'épuisement (m <sup>3</sup> /h)	2,50	5,40
Débit simulé sans étanchéité (m <sup>3</sup> /h)	2,90	6,25
Joint en périphérie sur la moitié de périmètre (m <sup>3</sup> /h)	2,47	4,93
Joint en périphérie (m <sup>3</sup> /h)	2,40	4,75

## 5.2 PERMÉABILITÉ DES ALLUVIONS MODERNES

L'alluvion moderne est considérée comme la couche névralgique qui peut fortement influencer les infiltrations. En effet, la couche qui peut alimenter le tunnel en eau, est la couche d'alluvions modernes. Cette couche de structure lenticulaire appartient à la catégorie de terrains de recouvrement. La composition des alluvions modernes est complexe puisqu'elle est formée de limons, de sable fins, d'argile, de vase et de tourbe. Cette couche est scindée en deux, une partie se situe dans une zone saturée et l'autre dans une zone non saturée. Cette stratification va gouverner les résultats du modèle vis-à-vis le niveau d'eau. De plus, l'épaisseur de cette couche est plus grande que celle des alluvions anciennes. Il n'est pas évident à définir avec précision, a fortiori les valeurs des perméabilités. Selon la littérature, ces valeurs sont assez variables et le coefficient de perméabilité de cette couche peut varier entre  $10^{-6}$  et  $10^{-9}$  m/s [14].

Nous avons testé différentes valeurs de perméabilité pour la couche d'alluvions modernes et calculer les débits par la suite. Le choix de la valeur de perméabilité correspond aux résultats les plus proches des résultats mesurés.

En revanche, nous avons choisi un coefficient  $k$  d'une valeur de  $10^{-7}$  m/s comme valeur initiale à tester dans les simulations. En ajustant cette valeur, nous avons constaté qu'une perméabilité de  $8.10^{-8}$  m/s engendre un débit plus proche aux résultats mesurés.

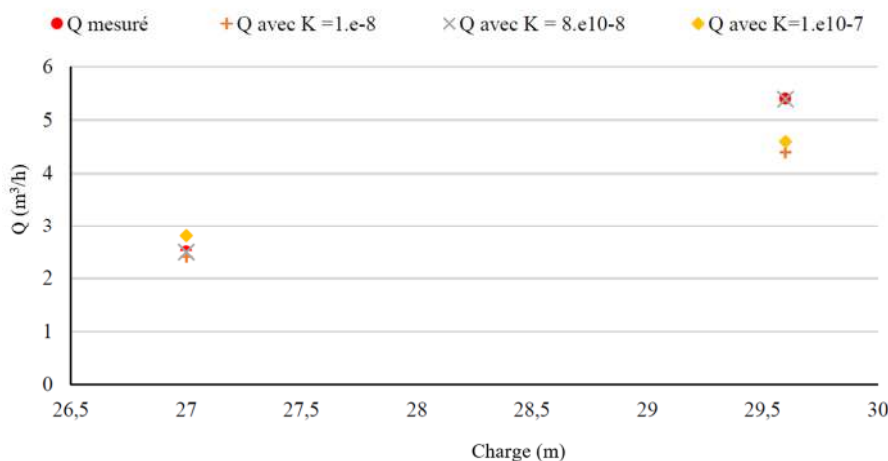


Fig. 12. Choix de coefficient de perméabilité pour les alluvions

La correction permet d'élaborer un outil numérique capable de reproduire le plus fidèlement possible la réalité. Celui-ci permettra de simuler les infiltrations quel que soit le niveau de la nappe de la crue. Le modèle peut être appliquée sur toute la longueur du tunnel en faisant varier d'autres paramètres à savoir : le niveau de la nappe, la longueur du tunnel, et la stratification du sol correspondant au secteur d'étude.

## 6 CONCLUSION

L'approche numérique a conduit à des résultats cohérents avec les mesures effectuées 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 aussi prouvé que la modélisation des infiltrations est applicable à d'autres tunnels de métro, tout en sachant que le calcul exige des données précises, particulièrement pour les couches du sol et le niveau de la nappe. La modélisation n'est pas spécifique, à condition de réunir un nombre de données suffisants. Elle peut être généralisée à d'autres tronçons du réseau où les infiltrations sont importantes, que ce soit pour une crue centennale ou pour des petites crues.

## RÉFÉRENCES

- [1] J. Brochet and R. Guillois, "Crue centennale, la position d'un maître d'ouvrage particulièrement exposé: La RATP", Colloque SHF: "Risques inondations en Ile de France", Paris, pp. 177-185, 2010.
- [2] A. Picard, "Chemin de Fer Métropolitain De Paris", Rapport général de Picard, p. 87, 1910.
- [3] A. Bois, "L'épuisement des eaux au Chemin de fer Métropolitain de Paris", p. 218, 1948.
- [4] C. Krapf and P. Krebs, "Quantification of groundwater infiltration and surface water inflows in urban sewer networks based on a multiple model approach", *Water Research*, vol. 45, pp.3129-3136, 2011.
- [5] N. Belhadj, C. Joannis, G. Raimbault, "Modelling of rainfall induced infiltration into separate sewerage". *Water Science and Technology*, v 32, pp. 161-168, 1995.
- [6] F. Rodriguez, F. Morena, H. Andrieu, "Development of a Distributed Hydrological Model Based on Urban Databanks - Production Processes of URBS", *Water Science and Technology*, vol 52(5) :241-8, 2005.
- [7] M. Soutter, A. Mermoud and A. Musy, "Ingénierie des eaux et du sol. Processus et aménagement". Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, p.294, 2007.
- [8] J. Bear, "Hydraulics of groundwater", p.569, 1979.
- [9] S. Poligot-Pitsch, "Modélisation des échanges entre nappe et rivière. Application au Val d'Avaray", Thèse de doctorat. Université de Technologie de Compiègne UTC, p.182, 2002.
- [10] M. Atwa, "Analyse numériques 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, p. 475, 1996.
- [11] S. Poligot-Pitsch, P. Sergent, and G. Dhatt, "Modélisation tridimensionnelle des remontées de nappe et inondations au Val d'Avaray", *L'hydraulique numérique*, pp.267- 295, 2003.
- [12] E. Berthier, "Contribution à une modélisation hydrologique à base physique en milieu urbain", Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, p.196, 1999.
- [13] W. Bouchenafa, "Modélisation des inondations en tunnel en cas de crue de la Seine pour le Plan de Protection des Risques Inondations de la RATP (PPRI)", Thèse de doctorat, Université de Technologie de Compiègne UTC, p. 270, 2017. [Online] Available: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01586507>.
- [14] V. Robitaille and D. Tremblay, "Mécanique des sols. Théorie et Pratique". Modulo, p.641, 1997.