

# **L16 lot 1 du Grand Paris Express, Modélisations hydrogéologiques associées aux tests d'exhaure pour l'optimisation des travaux d'injection et la maîtrise des risques – Recommandations concernant les essais préalables de pompage**

## ***Grand Paris Express L16 Lot 1, Hydrogeological modelling associated with drawdown tests for grouting optimization and risk control – Recommendations for Preliminary Pumping Tests***

Pascal CHALIVAT, *EIFFAGE Infrastructure, Vélizy-Villacoublay, France*

Thierry GAILLARD, *CPGF-HORIZON, Avon, France*

Alexandre CHEVALIER, *ANTEA GROUP, Olivet, France*

### **Résumé**

Plusieurs nappes superposées sont en interaction avec les ouvrages souterrains du lot 1 de la Ligne 16 du Grand Paris Express. Certains ouvrages ont donné lieu à des modélisations hydrogéologiques 3D associées aux tests d'exhaure. Cette démarche a été rendue nécessaire par des enjeux de planning ou de maîtrise des risques tels que :

- optimisation de travaux d'injection (jupes ou bouchons injectés),
- limitation des prélèvements dans les différents aquifères,
- faible rabattement hors ouvrage afin de limiter les tassements potentiels.

Les cas des gares du Stade de France et de La Courneuve sont présentés pour illustrer l'intérêt de ces approches hydrogéologiques.

Les retours d'expériences permettent de formuler quelques recommandations sur la bonne conduite des essais de pompage réalisés dans le cadre des études préliminaires et sur les pratiques d'interprétation.

### **Abstract**

Several aquifers are in interaction with the underground works of lot 1 of Line 16 of the Grand Paris Express. A number of civil engineering structures have required 3D hydrogeological modelling associated with drawdown tests. This approach was necessary to address planning or risk management issues such as:

- optimisation of grouting work (grouted curtains),
- limitation of water withdrawals from the different aquifers,
- low off-site drawdowns in order to avoid detrimental settlements.

The cases of Stade de France and La Courneuve stations are presented to illustrate the interest of these hydrogeological approaches.

Feedbacks makes it possible to formulate some recommendations on the proper ways to conduct the pumping tests carried out as part of the preliminary studies and on interpretation practices.

# L16 lot 1 du Grand Paris Express, Modélisations hydrogéologiques associées aux tests d'exhaure pour l'optimisation des travaux d'injection et la maîtrise des risques – Recommandations concernant les essais préalables de pompage

## *Grand Paris Express L16 Lot 1, Hydrogeological modelling associated with drawdown tests for grouting optimization and risk control – Recommendations for Preliminary Pumping Tests*

Pascal CHALIVAT, EIFFAGE Infrastructure, Vélizy-Villacoublay, France

Thierry GAILLARD, CPGF-HORIZON, Avon, France

Alexandre CHEVALIER, ANTEA GROUP, Olivet, France

### 1 Introduction

Les problématiques hydrogéologiques rencontrées au droit de certains ouvrages de la Ligne 16 lot 1 du Grand Paris Express ont conduit à réaliser des investigations in situ spécifiques couplées à la mise en œuvre d'outils de modélisation numériques 3D au stade des études d'exécution (EXE).

Cet article illustre la méthodologie utilisée en présentant les cas des gares du Stade de France (SDF) et de La Courneuve (LCO). La Figure 1 précise la localisation de ces deux gares.

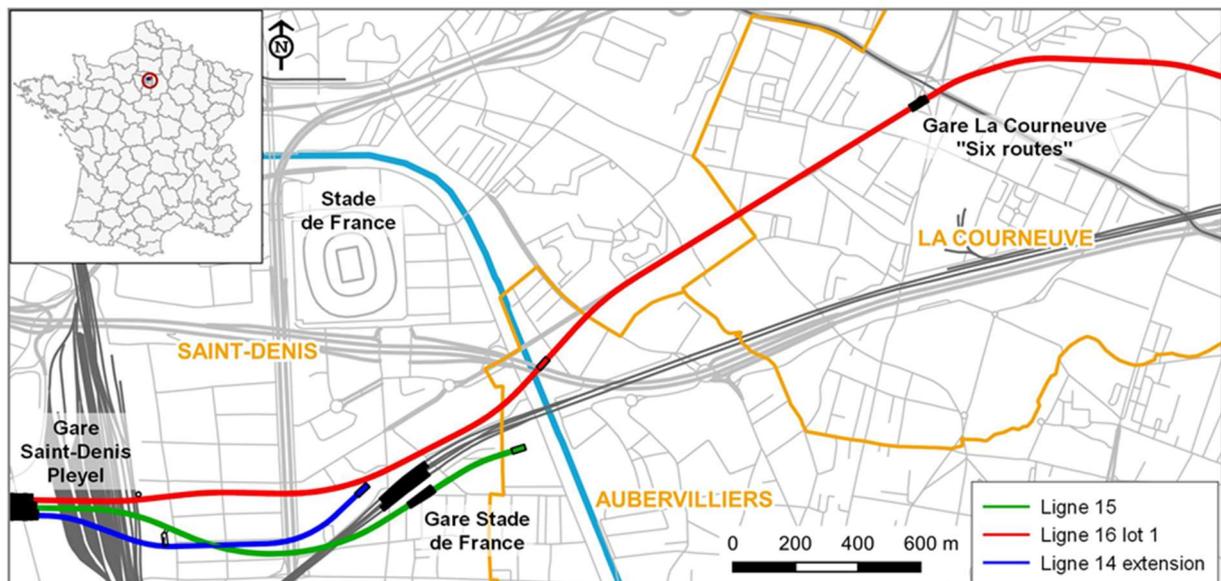


Figure 1. Localisation du projet

## 2 Contexte et problématique des ouvrages de la L16 lot 1

### 2.1 Contexte géologique et hydrogéologique

Le projet est implanté dans les formations tertiaires du Bassin Parisien :

- Le Calcaire de Saint Ouen (CSO) est principalement constitué d'un faciès carbonaté à dominance de calcaire marneux ;
- Les Sables de Beauchamp (SB) se composent d'un sable fin limoneux, cohésif et compact, parfois grésifié ou complètement lâche et pulvérulent. Ils comportent un niveau médian discontinu de moindre perméabilité ;
- Les Marnes et Caillasses (MC) sont essentiellement un calcaire marneux, tendre à semi-rocheux. Dans sa partie inférieure, on retrouve majoritairement des bancs rocheux fracturés ;

- Le Calcaire Grossier (CG) est constitué dans sa partie supérieure d'un calcaire dur, faisant apparaître des bancs coquilliers. La partie inférieure est souvent plus altérée, avec présence de glauconie. Un banc altéré d'épaisseur métrique est parfois identifié au contact avec les MC.

D'un point de vue hydrogéologique, ces formations forment un aquifère multicouches. Lorsqu'un horizon peu perméable est présent, cela permet l'individualisation de nappes. Deux nappes superposées sont en interaction avec les ouvrages souterrains au droit de l'ensemble du projet ; la nappe du Bartonien qui baigne les formations au-dessus de l'écran médian des SB et la nappe du Lutétien dans le CG, les MC et la partie inférieure des SB. La quasi intégralité des creusements se font sous nappe avec une charge hydraulique qui peut dépasser 0.4 MPa.

Le tracé traverse des secteurs identifiés comme à risque vis-à-vis de la dissolution du gypse qui affecte les formations des MC, des SB et du CSO. La Figure 2 présente le profil en long géologique simplifié au droit du projet.

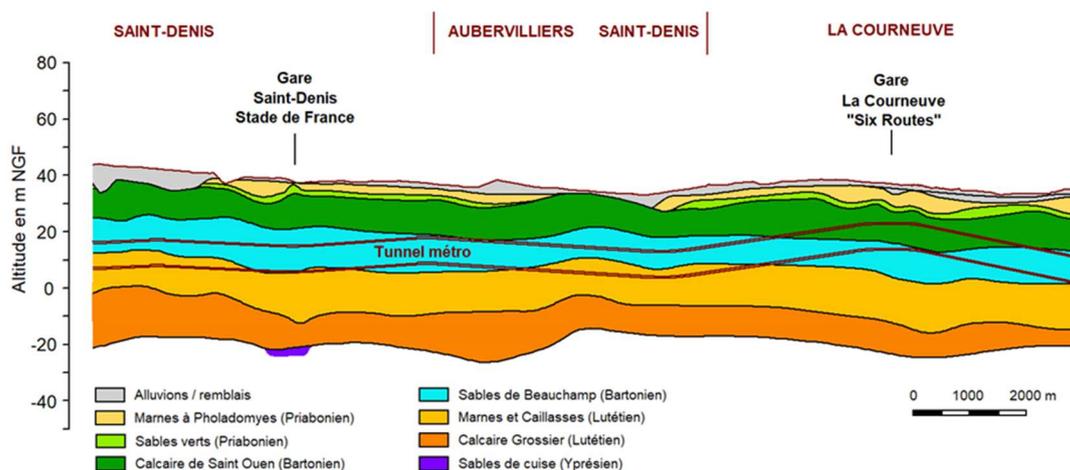


Figure 2. Profil en long simplifié

## 2.2 Particularités du projet

Les enjeux identifiés portaient sur la réalisation de travaux d'injection (jupe/bouchon) pour limiter les débits de pompage et les volumes de prélèvement pendant les phases de rabattement de nappe au droit de certaines gares. La présence de gypse massif et de zones décomprimées issues de leur dissolution faisait craindre une dégradation des conditions naturelles d'équilibre pendant les travaux.

Pour la gare du Stade de France (SDF), la conception initiale prévoyait la réalisation d'un bouchon injecté dans les MC entre les parois moulées périphériques descendues dans le CG, réputé peu perméable. Les injections du bouchon étaient prévues selon un phasage complexe en deux étapes ; la première en partie centrale devait être exécutée avant le passage du TBM en boîte pleine et la seconde pour les parties latérales après sortie du dispositif de la boîte gare.

Pour la gare de La Courneuve (LCO), les parois moulées étaient faiblement ancrées dans les MC ; la réalisation d'une jupe injectée périphérique descendue dans le CG était conditionnée par les résultats du test d'exhaure mis en œuvre à l'intérieur de l'enceinte.

Pour les deux sites, la présence d'avoisinants et de réseaux sensibles aux tassements contigus aux parois moulées rendait impératif la limitation des rabattements dans la nappe superficielle.

## 3 Gare du Stade de France (SDF)

### 3.1 Description de l'ouvrage dans son environnement géologique

La gare du Stade de France (SDF) comporte une boîte profonde de forme rectangulaire de 109 m de long pour 22 à 31 m de largeur, avec une profondeur de 25 m. Des parois moulées d'épaisseur variable entre 1,20 m et 1,50 m constituent le soutènement de l'enceinte ; en complément, 22 barrettes reprennent les charges verticales.

Les parois moulées sont ancrées dans le CG à des profondeurs variant entre 50 et 62.5 m de profondeur ; un fort pendage de direction Nord-Est / Sud-Ouest affecte en effet le toit de cette formation (Figure 2).

### 3.2 Objectif du modèle et stratégie de modélisation

Les niveaux d'eau de chantier ont préalablement été estimés à 36 m NGF pour l'aquifère multicouches constitué des formations superficielles et 31,6 m NGF pour l'aquifère multicouches inférieur (CSO/SB/MC/CG). Les terrassements nécessitaient un rabattement de 25 m.

Avant le démarrage des travaux, des incertitudes sur l'évaluation des débits de rabattement étaient identifiées. D'une part, la présence d'un niveau de calcaire grossier apparaissant très altéré en carottage, localisé au niveau de l'interface avec les MC, laissait supposer la présence d'un faciès très perméable, imparfaitement recoupé par la fiche hydraulique. D'autre part, le champ d'anisotropie,  $K_v/K_h$ , particulièrement dans le CG et les MC était un point clé de la bonne estimation des débits de rabattement.

Pour limiter les risques d'un sous-dimensionnement du dispositif de rabattement de nappe, le phasage de la modélisation numérique était fondé sur un recalage des champs de conductivités hydrauliques verticales ( $K_v$ ) et horizontales ( $K_x=K_y=K_h$ ) suite à des essais à l'intérieur de l'enceinte des parois moulées. Le phasage suivant a été mis en œuvre :

- Etape 1 : construction d'un modèle géologique avec les données de base ;
- Etape 2 : construction de modèles numériques à partir des valeurs initiales de conductivités hydrauliques prenant en compte les faciès sains et altérés du CG ;
- Etape 3 : réalisation d'essais de pompage dans l'enceinte et de diagraphie en forage pour préciser la stratigraphie ;
- Etape 4 : recalage des modèles en pseudo-transitoire (reproduction des pompages).

### 3.3 Données de terrain acquises

Une campagne d'investigation hydrogéologique complémentaire a été lancée. Les pompages devaient permettre de quantifier la drainance depuis les CSO, d'évaluer les apports du CG grossier, d'évaluer l'hétérogénéité des MC au sein de l'ouvrage et de mesurer in-situ la conductivité hydraulique des CSO et du CG. Pour le chantier, il s'agissait d'optimiser le dispositif de rabattement de nappe et de confirmer la pertinence du bouchon injecté.

Le dispositif déployé comprenait 2 puits de pompage crépinés dans les MC et 4 piézomètres sélectifs dans l'enceinte pour mesurer les niveaux piézométriques au CSO, MC et CG ; certains de ces piézomètres, forés et équipés en gros diamètre ont également donné lieu à des tests de pompage (CG). Il comportait également deux doublets de piézomètres au CSO et MC, à l'extérieur de l'enceinte, en amont et en aval hydraulique. Des essais au micromoulinet ont également été réalisés dans certains forages.

Les essais de pompage ont permis de mettre en évidence l'effet de limite étanche des parois moulées après environ 1 heure de pompage. Les conductivités hydrauliques in-situ ont été calculées à partir d'essais de pompage d'une dizaine d'heure et d'un pompage à débit constant d'une durée de 5 jours. La méthode de Jacob a été utilisée (Cooper et Jacob, 1946). La plage d'interprétation reste courte puisque l'équation de Cooper-Jacob n'est valide qu'après l'effet de capacité et avant l'effet de limite étanche (intervalle entre 5 et 50 minutes). Le Tableau 1 présente les valeurs ainsi obtenues et les compare aux données initiales. L'écart le plus significative apparaît pour les MC ( $K_h = 5,6 \cdot 10^{-6}$  m/s contre  $2,5 \cdot 10^{-4}$  m/s selon les données initiales).

**Tableau 1. Résultats des essais de pompage**

Formatio n	Données initiales		Données issues de l'essai de pompage (Phase EXE)		
	$K_h=K_x=K_y$ (m/s)	$K_v$ (m/s)	Transmissivité ( $m^2/s$ )	Epaisseur saturée (m)	$K_v$ (m/s)
CSO	$1,5 \cdot 10^{-4}$	$6,0 \cdot 10^{-5}$	$2,3 \cdot 10^{-4}$	9	$2,6 \cdot 10^{-5}$
MC	$2,5 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$7,3 \cdot 10^{-5}$	13	$5,6 \cdot 10^{-6}$
CG altéré	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$6,0 \cdot 10^{-5}$	-	-	-
CG sain	$2,1 \cdot 10^{-5}$	$8,4 \cdot 10^{-7}$	$7,8 \cdot 10^{-5}$	5	$1,6 \cdot 10^{-5}$

Les diagraphies de type Gamma Ray (GRN) réalisées dans les forages ont permis de recalibrer finement la stratigraphie. Le banc de gypse massif dans les SB a été retrouvé ainsi que la base marneuse du CSO. Aucun décalage altimétrique n'a été identifié entre les extrémités Est et Ouest de l'enceinte (Figure 3). Deux séquences de dépôts sont identifiées dans les SB.

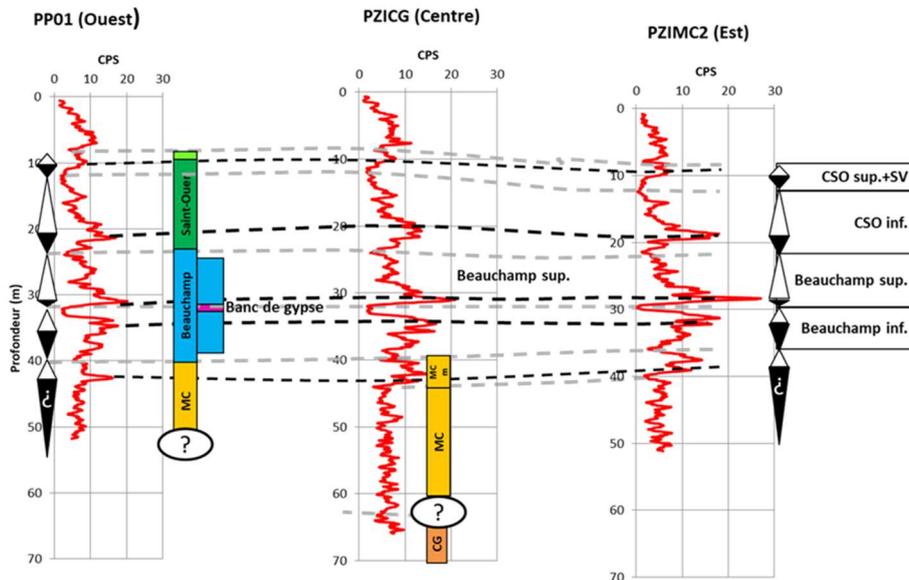


Figure 3. Corrélation des diagraphies GRN et définition des séquences de dépôts

### 3.4 Résultats du modèle

Le modèle a permis d'évaluer l'anisotropie de l'ensemble des formations. En effet, les équations analytiques ne permettent pas de calculer une conductivité hydraulique verticale dans les schémas de Theis (1935) ou d'Hantush-Jacob (1955), la nappe surincombante étant supposée à charge constante. Un modèle numérique 3D (Figure 4) permet en revanche d'estimer ces valeurs en calant par exemple les rabattements mesurés aux CSO quand le pompage s'effectue aux MC. Par itérations et calage sur les différents tests de rabattements, un nouveau champ d'anisotropie a été fixé (Tableau 2).

Tableau 2. Champ d'anisotropie du modèle recalé (avec CG altéré)

Modèle conceptuel	Kh (m/s)	Kv (m/s)	Anisotropie Kh/Kv
R	$1.10^{-5}$	$4.10^{-6}$	2,5
MPH - SV	$6,6.10^{-6}$	$9,8.10^{-7}$	6,7
CSO	$2,6.10^{-5}$	$2,6.10^{-5}$	1
SB	$1,2.10^{-4}$	$1,6.10^{-5}$	7,5
MC	$5,6.10^{-6}$	$4,0.10^{-6}$	1,4
CG altéré	$1,6.10^{-5}$	$6,0.10^{-7}$	26

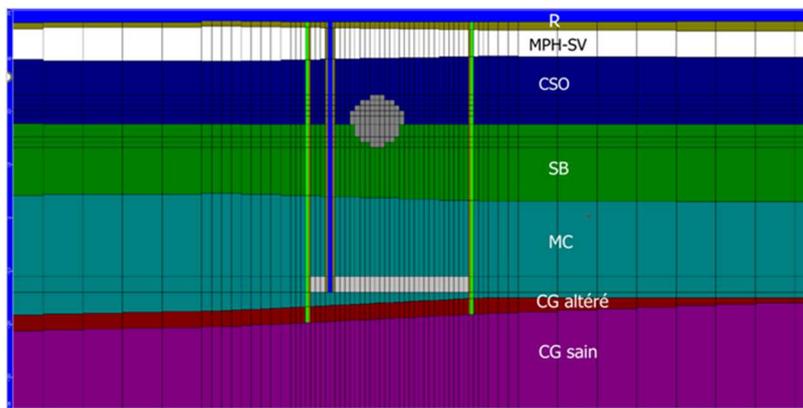


Figure 4. Coupe extraite du modèle numérique 3D (MODFLOW)

## 4 Gare de La Courneuve « Six Routes » (LCO)

### 4.1 Description de l'ouvrage dans son environnement géologique

La future gare de la Courneuve « Six Routes » (LCO), de forme rectangulaire, présente une surface de 1300 m<sup>2</sup> pour une profondeur de 23 m. Les soutènements sont réalisés en parois moulées de 1.2 m d'épaisseur, ancrées dans les MC.

La coupe stratigraphique au droit de la gare est indiquée sur le profil en long de la Figure 2. A noter qu'à l'échelle de l'ouvrage, le profil des différentes couches géologiques est pseudo-tabulaire avec des variations d'épaisseur d'amplitude métrique. Le niveau des eaux de chantier (EC) impliquait un rabattement de 23 m.

### 4.2 Objectif du modèle et stratégie de modélisation

Les données initiales indiquaient une forte incertitude sur la perméabilité des MC ainsi que sur le modèle conceptuel hydrogéologique. En effet, il supposait la présence d'un aquifère multicouches constitué par les formations CSO/SB/MC/CG et l'absence d'horizon médian des SB pouvant séparer deux masses d'eau.

Une jupe injectée était envisagée pour descendre la fiche hydraulique dans le CG afin de limiter, si nécessaire, les apports d'eau en provenance des MC. Sa mise en œuvre était liée aux résultats du test d'exhaure à réaliser après l'exécution des PM. Les études initiales faisaient également apparaître un risque significatif de tassement lié au rabattement de nappe ; ce risque impactait un ensemble de réseaux superficiels bordant l'enceinte.

Un modèle numérique 3D en régime permanent a d'abord été construit sur la base des données existantes pour évaluer le débit d'exhaure et dimensionner le dispositif de rabattement. Ce premier modèle a été construit sur la base d'une approche majorante (modèle bi-couches). Celui-ci a ensuite été retravaillé en tenant compte des résultats des essais in situ exécutés en phase EXE pour :

1. affiner la gamme de débit et le dimensionnement du dispositif de rabattement,
2. évaluer les incidences du rabattement sur la nappe du Bartonien par des simulations en régime transitoire correspondant à la durée du rabattement.

### 4.3 Données acquises en phase EXE

Avant réalisation des parois moulées, le programme d'investigations hydrogéologiques a consisté en la réalisation de pompages d'essai, de diagaphies gamma-ray (Figure 5) et de micromoulinets.

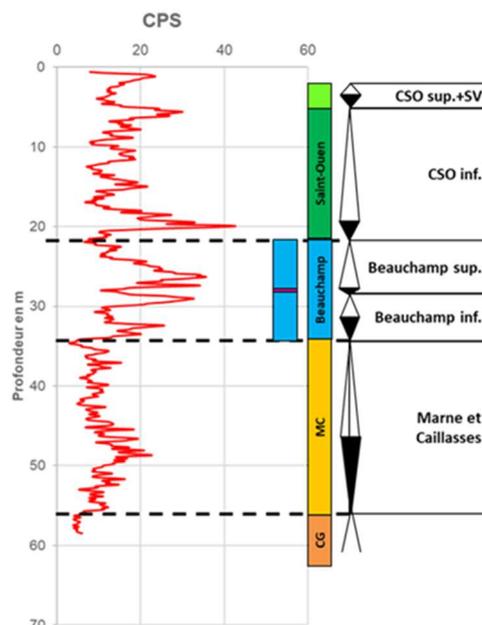


Figure 5. Résultat de la diagaphie gamma-ray

L'analyse des résultats a permis de revoir le schéma conceptuel au droit de la gare et d'identifier deux nappes séparées par un aquitard semi-perméable formé par les SB médians. Cet aquitard a été mis en évidence par la légère différence de charge entre les piézomètres recoupant uniquement les MC et ceux recoupant les CSO et les SB, par le phénomène de drainance lors des pompages et par le résultat des diagraphies GRN qui montre la présence de l'horizon médian argileux dans les SB.

Le test d'exhaure, entre le 20/09/2019 et le 16/10/2019, a été mis en œuvre à partir de 6 puits de pompage réalisés à l'intérieur de l'enceinte. A noter que la géométrie du projet couplée aux impératifs de stabilité hydraulique imposait de descendre les puits de pompage sous la fiche des PM.

Pour évaluer l'incidence du rabattement de nappe, des piézomètres ont été créés dans la nappe du Bartonien et du Lutétien à l'intérieur et à l'extérieur de la boîte. Le pompage a mis en évidence une très faible incidence sur la nappe du Bartonien et une incidence de plusieurs mètres sur la nappe du Lutétien.

#### 4.4 Résultats du modèle transitoire

Le modèle a été complété et modifié en intégrant 4 couches correspondant aux ensembles CSO/SB supérieur, SB médian, SB inférieur et aux MC. La base des MC ne présentait pas d'arrivée d'eau d'après le résultat des micromoulinets. Ce constat a permis de justifier à l'absence de réalimentation majeure depuis le CG et de considérer le mur des MC comme la base du modèle.

Le calage du modèle (conductivité hydraulique horizontale, verticale et l'emmagasinement) a été validé sur la base des enregistrements automatiques obtenus dans les piézomètres de suivi. Le résultat du calage permet de représenter parfaitement l'évolution des niveaux d'eau dans les nappes du Bartonien et du Lutétien à l'intérieur et à l'extérieur de l'ouvrage (Figure 6)

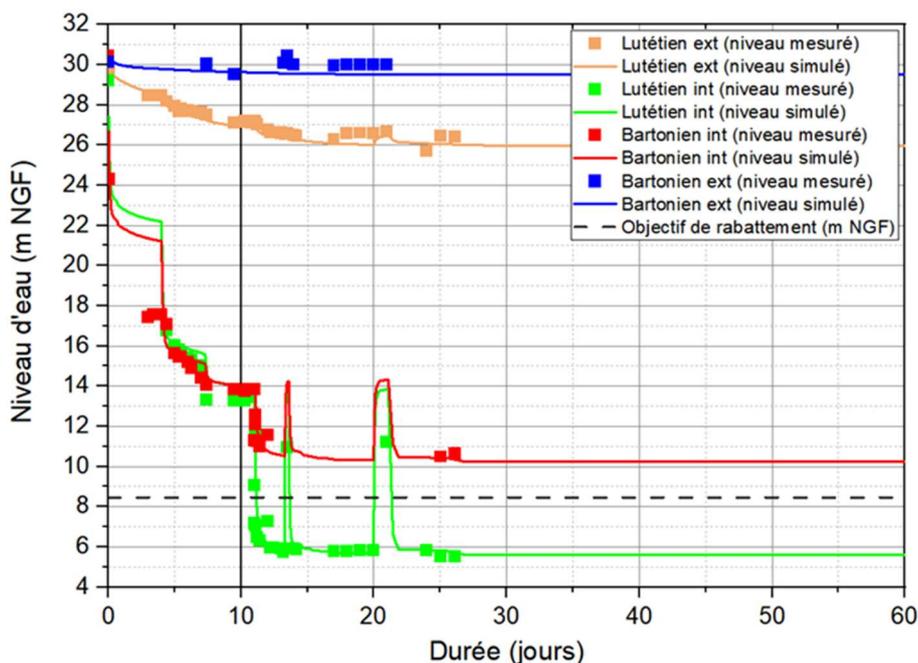


Figure 6. Evolution des niveaux d'eau simulés par le modèle vs observés pendant le pompage

Les perméabilités obtenues sont synthétisées dans le Tableau 3. Nous remarquons que l'anisotropie des MC est environ 5 fois plus forte que celle initialement préconisée.

La simulation du rabattement sur une durée de 13 mois indique un impact sur la nappe du Bartonien inférieur à 1 m et un débit d'exhaure de l'ordre de 54 m<sup>3</sup>/h pour rabattre la nappe du Lutétien sous le fond de fouille. Ce débit était 2 fois inférieur à celui évalué à partir du modèle en régime permanent, basé sur l'absence d'horizon médian argileux dans les SB.

Le très faible rabattement dans le Bartonien a permis une réévaluation de l'impact des tassements sur les réseaux superficiels qui se sont avérés non préjudiciables.

Sur la base des résultats du modèle en régime transitoire, la décision a été prise, en phase travaux, de ne pas réaliser la jupe injectée. Pendant les 10 mois correspondant à la durée du rabattement dans l'enceinte, le débit moyen a été d'environ de 38 m<sup>3</sup>/h. Le dispositif d'auscultation a confirmé les

prévisions de rabattement de la nappe du Bartonien et l'absence de dépassement des seuils de déformations sur les réseaux.

**Tableau 3. Perméabilité et anisotropie du modèle transitoire**

Formation	Kh (m/s)	Kv (m/s)	Anisotropie Kh/Kv	Emmagasinement
CSO / SB supérieur	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$6,0 \cdot 10^{-4}$	2,5	$5,0 \cdot 10^{-3}$
SB médian	$2,0 \cdot 10^{-6}$	$2,5 \cdot 10^{-7}$	8	$1,0 \cdot 10^{-4}$
SB inférieur	$1,2 \cdot 10^{-5}$	$1,0 \cdot 10^{-5}$	1,2	$5,0 \cdot 10^{-3}$
MC extérieur de la boîte	$2,5 \cdot 10^{-5}$	$2,2 \cdot 10^{-6}$	11,4	$1,0 \cdot 10^{-4}$
MC intérieur de la boîte	$5,0 \cdot 10^{-5}$	$4,0 \cdot 10^{-6}$	12,5	$1,0 \cdot 10^{-4}$

## 5 Bilan et recommandations pour les essais préliminaires de pompage

Les deux gares présentées ont fait l'objet d'essais de pompage et d'une caractérisation de la stratigraphie par gamma-ray. A chaque fois, une modélisation hydrodynamique a permis d'affiner les débits d'épuisement et de fournir des données fiables pour les calculs géotechniques et la définition des dispositions constructives vis-à-vis des nappes. Ces programmes d'acquisition coûteux peuvent cependant être largement rentabilisés lorsqu'ils sont réalisés au moment des phases de conception.

La question de l'intérêt d'un modèle numérique est souvent posée. Dans le contexte d'aquifère multicouches avec drainance, la caractérisation de la conductivité verticale (Kv) est un enjeu majeur. Or les essais classiques (Lefranc ou pompage), ne permettent pas de calculer ce paramètre. La seule équation analytique fondée sur le rabattement de l'aquifère pompé et de l'aquifère drainé est d'une utilisation délicate au vu du grand nombre de variables (Neuman et Witherspoon, 1969). Une modélisation est donc préférable pour reproduire les essais de pompage et estimer Kv en fonction des rabattements mesurés sur des piézomètres sélectifs captant chaque formation. Pour bien définir la géométrie des ouvrages de captage, il est nécessaire d'avoir une très bonne connaissance de la stratigraphie (à +/- 1 m). Les diagraphies gamma naturel sont alors d'une précieuse aide. Le repérage des séquences de dépôts apporte de plus une robustesse à l'interprétation. A partir de cette caractérisation stratigraphique, le nombre de piézomètres dans chaque formation, les tests de pompage et de micromoulinet peuvent être proposés en fonction des connaissances à acquérir.

L'autre question débattue concerne aussi l'intérêt des essais de pompage par rapport aux essais ponctuels de perméabilité. Les modèles de rabattements de nappe présentent la particularité de nécessiter des mailles fines (de l'ordre du m) pour que la résolution numérique soit consistante au vu des contrastes de conductivité hydraulique parois/aquifères et de la géométrie des ouvrages. Malheureusement, les mesures de conductivité hydraulique à cette échelle (essai Lefranc ; Slug Test) ne permettent pas de prendre en compte l'effet d'échelle. Cet effet peut se définir comme l'augmentation d'une propriété hydraulique (K) en fonction de l'échelle d'observation (Kiralı, 1975 ; Rovey et Cherkauer, 1995). Seuls des essais de pompage permettent de calculer la conductivité hydraulique à l'échelle des projets décrits dans le présent article, et éventuellement de définir le volume élémentaire représentatif à partir duquel le paramètre K sera constant.

La figure 7 illustre le principe de phasage que nous avons utilisé en phase EXE sur les gares de SDF et LCO mais qu'il serait intéressant d'appliquer dès les phases de conception pour peu que les enjeux hydrogéologiques liés aux rabattements de nappe soient bien identifiés. Il se résume ainsi :

- Etape 1 : bonne caractérisation de la stratigraphie (+/- 1 m) et des aquifères ;
- Etape 2 : réalisation d'essais de pompage avec un nombre de piézomètres sélectifs suffisant pour caractériser la réaction des différents aquifères dans chacune des couches géologiques impactées (à minima 2 piézomètres par couche) ; la mise en œuvre de diagraphie en forage de type GRN et d'essais au micromoulinet constituent un vrai bonus pour l'interprétation ;
- Etape 3 : modélisation 3D de l'essai de pompage comportant des régimes transitoires pour déterminer les anisotropies de perméabilité.

Dans cet objectif de caractérisation, le puits de pompage et les piézomètres doivent absolument capter un seul aquifère. La durée du pompage est aussi à adapter. En effet, la présence de cours d'eau, de structure géologique particulière ou de variation de faciès peuvent nécessiter des durées de pompage plus importantes que celles usuellement utilisées (4 à 6 jours contre 2 à 3 jours).

Nous rappelons ici l'importance du programme de nettoyage et de développement des puits. Cette phase est trop souvent négligée et entraîne des difficultés d'interprétation, voire rend certains essais inexploitable.

Les apports de l'hydrogéologue dans le processus de conception sont essentiels pour la définition des investigations jusqu'à la détermination des paramètres hydrodynamiques qui seront utilisés pour le dimensionnement des ouvrages géotechniques.

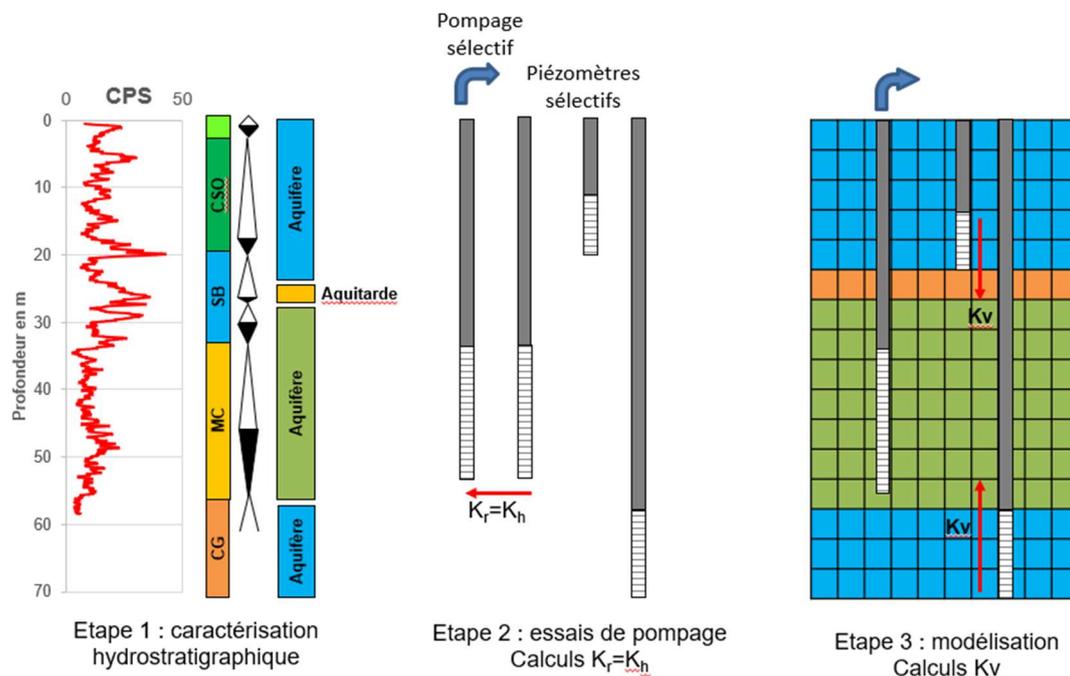


Figure 7. Principe pour la détermination des paramètres hydrodynamiques

## 6 Conclusion

La réalisation d'essais de pompage associés à des modèles numériques pendant la phase EXE a permis d'optimiser certains travaux d'injection et de sécuriser les dispositions constructives vis-à-vis des rabattements de nappe dans un contexte géologique sensible aux phénomènes de dissolution du gypse.

L'intérêt d'une telle démarche au cours des phases de conception apparaît et serait réalisable sous réserve de mettre à contribution l'expertise d'hydrogéologues.

## 7 Références

- Cooper, H.H. et C.E. Jacob, 1946. A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well field history, *Am. Geophys. Union Trans.*, 27, pp. 526-534
- Hantush, M.S. and C.E. Jacob, 1955. Non-steady radial flow in an infinite leaky aquifer, *Am. Geophys. Union Trans.*, 36, pp. 95-100.
- Kiraly L., 1975. Rapport sur l'état actuel des connaissances dans le domaine des caractères physiques des roches karstiques. In: Burger A. and Dubertret L. (Eds), *Hydrogeology of karstic terrains*, Int. Union of Geol. Sciences, B, 3, 53- 67.
- Anderson M.P., Woessner W.W., 1992, *Applied Groundwater Modeling, Simulation of Flow and Advective Transport*, Academic press, pp 194 – 207
- Neuman, S.P. and P.A. Witherspoon, 1969. Theory of flow in a confined two aquifer system, *Water Resources Research.*, 5 (4), pp. 803-816
- Rovey II C. W., Cherkauer D. S., 1995. Scale Dependency of Hydraulic Conductivity Measurements. *Groundwater journal*, 33 (5). 769–780.
- Theis, C.V., 1935. The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage, *Am. Geophys. Union Trans.*, 16, pp. 519-524