

DOSSIER D'ENQUÊTE PRÉALABLE À LA DÉCLARATION D'UTILITÉ PUBLIQUE
TRONÇON PONT-DE-SÈVRES < > NOISY – CHAMPS (LIGNE ROUGE - 15 SUD)

PIÈCE **G.6.4**

Étude d'impact

Tronçon Pont-de-Sèvres < > Noisy – Champs

Annexe : Rapport de synthèse relatif aux enjeux géologiques, hydrogéologiques et géotechniques du projet

Sommaire

▼

1.	Introduction	5
2.	Description de la conception du tronçon Pont de Sèvres – Noisy-Champs.....	5
2.1	<i>Les grands axes de conception</i>	5
2.2	<i>Prise en compte du bâti, des infrastructures et des réseaux pour le tronçon Noisy champs – Pont de Sèvres</i>	8
2.3	<i>Prise en compte des premiers résultats des investigations de la campagne de reconnaissance géotechnique G11.....</i>	9
3.	Principaux enjeux géologiques, hydrogéologiques et géotechniques du projet	18
3.1	<i>Enjeux particuliers liés à la présence d’anciennes carrières.....</i>	19
3.2	<i>Nappes et circulations souterraines</i>	23
3.3	<i>Dissolution du gypse</i>	33
3.4	<i>Retrait et gonflement des argiles</i>	36
4.	Glossaire	38

1. Introduction

Le présent rapport vient en complément de la pièce G (étude d'impact) du dossier d'enquête préalable à la déclaration d'utilité publique.

Il vise plusieurs objectifs :

Dans une première partie, il s'attache à décrire le tronçon d'ouest en est, tant du point de vue de l'intégration des contraintes (contraintes liées au bâti, aux infrastructures et aux réseaux existants, contraintes géologiques, hydrogéologiques et géotechniques) que des méthodes constructives. Cette partie fait également état des investigations géotechniques entreprises par la Société du Grand Paris ; celles-ci viennent confirmer les hypothèses prises en compte dans l'étude bibliographique sur laquelle s'appuie le présent dossier et notamment la pièce G.

Dans une seconde partie, il énumère les principaux enjeux du projet sur le tronçon Pont de Sèvres – Noisy-Champs liés aux domaines de la géologie, de l'hydrogéologie et de la géotechnique, ainsi que les mesures de contrôle et de réduction adoptées. Cette partie se décompose de la façon suivante :

- rappel des enjeux et phénomènes associés spécifiques au tronçon, détaillés dans l'état initial (rapport 1/3 de l'étude « tronçon » dans la pièce G) : description des impacts potentiels et localisation des zones à enjeux.
- prise en compte de ces enjeux dans le projet présenté à l'enquête et intégration des mesures à mettre en œuvre en phase de réalisation du projet.
- localisation des zones d'incidence potentielle, description des mesures d'évitement ou de réduction de ces impacts, estimation de leur coût, et présentation des méthodes de suivi des effets de ces mesures.

2. Description de la conception du tronçon Pont de Sèvres – Noisy-Champs

2.1 Les grands axes de conception

Dès les premières phases de conception du projet de tronçon Pont de Sèvres – Noisy-Champs, entièrement en souterrain, la Société du Grand Paris s'est attachée à recenser l'ensemble des contraintes susceptibles d'interférer avec le projet : recherche des réseaux enterrés ou infrastructures, établissement d'un diagnostic des zones traversées tant du point de vue du sous-sol (caractérisation de la géologie, de l'hydrogéologie et de la géotechnique) que du point de vue de l'état du bâti (y compris réseaux enterrés et infrastructures).

Dans ce titre est expliqué, pour chacune des deux grandes thématiques (Sous-sol et Bâti), comment se déroule la recherche des données d'entrée au cours des différentes phases d'études et comment celles-ci sont prises en compte.

2.1.1 Le bâti, les réseaux enterrés et les infrastructures

- *Quels types d'ouvrages peut-on rencontrer à proximité du projet ?*

Le projet Pont de Sèvres – Noisy-Champs a potentiellement une influence sur différents types d'ouvrages :

- **Bâti** - tous les types de bâtiments sont présents. Leur tolérance aux déformations du sol qui pourraient être provoquées par l'exécution d'un projet de métro souterrain dépend du type de construction et du type de fondations du bâtiment.
 - **Réseaux enterrés** - seuls les réseaux de taille importante, ne pouvant être déviés, représentent un véritable enjeu pour le projet. Sont notamment concernés :
 - les canalisations d'assainissement du SIAAP,
 - les canalisations de transport de gaz,
 - les canalisations de transport de pétrole,
 - les canalisations de chauffage urbain.
 - **Infrastructures** - sont notamment concernés :
 - les infrastructures ferroviaires,
 - les infrastructures routières,
 - les ouvrages d'art.
- *Quels sont les enjeux liés à la présence de bâti, de réseaux et d'infrastructures ?*

Lors de la réalisation du métro souterrain, les ouvrages existants (bâti, infrastructures, réseaux) sont susceptibles d'être impactés de la manière suivante :

- déformations induites au niveau des ouvrages existants en phase chantier.
- endommagement de l'ouvrage existant en phase chantier : par exemple, le percement d'une canalisation ou l'injection involontaire de coulis dans un sous-sol. Il s'agit en général d'accidents dus à la méconnaissance des avoisinants souterrains ou à une maîtrise insuffisante des techniques d'exécution, mais non liés à la conception du projet à proprement parler.

Concrètement, les effets sur les ouvrages existants et leurs conséquences négatives sur la population et l'environnement peuvent être très variables selon l'ouvrage concerné : atteinte au fonctionnement normal des installations (par exemple création d'un point bas d'une canalisation d'eau), dégradation des ouvrages (par exemple fissuration de la façade d'un immeuble).

La sensibilité du bâti, des infrastructures et des réseaux existants aux travaux de réalisation du projet est également fonction de la nature et de la qualité des terrains rencontrés et des éventuelles contraintes que sont la nature du sous-sol, la présence de vides dans le sol etc..., ainsi que de la profondeur du tunnel.

- *Comment les études sur le bâti, les réseaux enterrés et les infrastructures s'organisent-elles ?*

Dès les phases amont (premières études réalisées conduites par le Maître d'ouvrage), les réseaux structurants (non déviables) ont fait l'objet d'un recensement bibliographique en partenariat avec les différents concessionnaires concernés (RATP, SNCF, SIAAP, EDF-GDF, Trampil, etc...).

De même, concernant le bâti, sont recensés les bâtiments susceptibles d'interférer avec le projet : immeubles de grande hauteur, bâtiments dans des zones de vides anthropiques ou naturels qui potentiellement peuvent être construits sur des fondations profondes, ou toutes infrastructures souterraines (par exemple parkings sur plusieurs niveaux de sous-sols).

Le but est de fiabiliser, dès les premiers tracés, le profil en long et en plan du projet, afin de ne pas interférer avec ces grands réseaux et ces infrastructures enterrées.

Les études de maîtrise d'œuvre vont permettre d'affiner les connaissances sur ce bâti. Dans ce cadre, les objectifs de ces études sont multiples :

- éviter les réseaux ne pouvant être déviés ou entreprendre des travaux de confortement adaptés quand le projet se situe à proximité de ces grands réseaux,
- entreprendre des déviations de réseaux en amont des travaux de génie civil pour les réseaux déviables,
- caractériser le bâti dans la zone d'interférence du projet, dans le but de déterminer sa sensibilité.

Les mesures suivantes vont ainsi être mises en place par le Maître d'ouvrage :

Recensement systématique des réseaux présents sur le tracé :

Ce recensement porte sur l'exhaustivité des réseaux (déviables et non déviables). Il permettra notamment de caractériser les réseaux tant :

- géométriquement : localisation en plan et en profondeur,
- que qualitativement : nature des réseaux (maçonnerie, structures en béton armé, etc...) et fonctionnement des réseaux (gravitaire, sous-pression, etc...).

Une enquête sur le bâti et les infrastructures couplée à une étude de sensibilité :

Cette enquête et cette étude de sensibilité seront réalisées dans la zone d'influence géotechnique du projet (zone dans laquelle les travaux peuvent avoir une influence sur le sol).

Elle aura un double objectif : reconnaître le bâti au sens large mais également déterminer sa vulnérabilité aux travaux envisagés, afin de mettre en place des méthodes constructives adaptées et garantir ainsi un niveau de sécurité optimal.

Ces dispositions doivent permettre de :

- caractériser le bâti dans un premier temps, tant d'un point de vue géométrique que structurel (niveau des fondations, système de poutraison, etc...) ;
- déterminer à partir de ces éléments leur tolérance aux déformations du sol : sur la base de cette analyse, il conviendra, dans certaines zones définies par l'étude de sensibilité, d'adapter le dimensionnement des ouvrages du métro et/ou les méthodes constructives de manière à respecter les tolérances des ouvrages existants pour supprimer le risque (par

exemple renforcer le dimensionnement des parois de soutènement d'une gare pour éviter les désordres induits sur les bâtiments voisins lors de sa réalisation, ou adapter la vitesse du tunnelier dans des zones sensibles).

Si le risque ne peut être totalement supprimé de cette manière, des méthodes de protection des ouvrages existants seront mises en place. Ces zones sensibles seront identifiées afin de définir les méthodes particulières à utiliser pour les protéger.

Dans le but d'organiser un double regard sur l'analyse du bâti réalisée par le Maître d'œuvre, la Société du Grand Paris s'est adjoint les conseils d'un Assistant à Maîtrise d'Ouvrage en expertise du bâtiment, le but étant d'avoir un regard partagé sur l'interprétation des données afin de concevoir un projet adapté au contexte de sensibilité du bâti présent dans la zone d'influence géotechnique.

- *Quelles sont les dispositions mises en place en phase travaux ?*

De plus, afin de vérifier que les mesures retenues lors des différentes études réalisées permettent bien de supprimer les risques d'impact sur le bâti, les infrastructures et les réseaux existants, une auscultation du bâti sera mise en place le long du tracé dans les zones sensibles :

- cette auscultation sera mise en place en amont des travaux, afin de mesurer la respiration naturelle des ouvrages liée notamment aux variations thermiques.
- en phase chantier, la surveillance de l'existant par auscultation aura pour but de surveiller en temps réel les déformations éventuelles et de les comparer aux estimations faites lors des études de maîtrise d'œuvre, afin de pouvoir adapter les méthodes constructives immédiatement en cas de déplacement jugé anormal.

2.1.2 La géologie, l'hydrogéologie et la géotechnique

- Comment les études géotechniques s'organisent-elles ?

Un projet de transport en souterrain est par essence en forte interaction avec le sous-sol, de ce fait, afin de réaliser des études de qualité, la connaissance parfaite du sous-sol au sens large est nécessaire.

Les études géotechniques sont régies par la norme NF P 94-500 relative aux missions géotechniques. Cette dernière détermine selon la phase d'étude les niveaux d'investigations et les objectifs pour tenir compte des aléas géologiques. Ces missions sont mises en regard des phases d'études de conception définies par la loi relative à la Maîtrise d'Ouvrage Publique (« loi MOP »). Le tableau ci-après récapitule les caractéristiques de chacune des phases :

Phases d'études Loi MOP	Phases d'études géotechniques (NF P 94-500)	Natures de la donnée	Dossier à remettre
Etudes de Faisabilité	Mission G11 Phase 1	Bibliographique	Premier modèle géologique, hydrogéologique.
Etudes Préliminaires	Mission G11 Phase 2	Reconnaitances sur site	Première identification des risques.
<i>Production du dossier d'enquête publique</i>			
Phase d'Avant-Projet	Mission G12	Reconnaitances sur site	Identification des aléas majeurs et principes généraux pour en limiter les conséquences
Phase Projet	Mission G2	Reconnaitances sur site	Identifications des aléas importants et dispositions pour en réduire les conséquences

Chaque nouvelle étape est l'objet de sondages complémentaires : au fur et à mesure de l'avancement des études, le maillage entre les points de sondages s'affine, et le modèle géologique et hydrogéologique s'enrichit et se précise.

Dans le but d'organiser un double regard sur l'analyse du sous-sol réalisée par le Maître d'œuvre, la Société du Grand Paris s'est adjoint les conseils d'un Assistant à Maîtrise d'Ouvrage spécialisé en géotechnique, afin d'avoir un regard partagé sur l'interprétation des données et concevoir un projet adapté au contexte géologique, hydrogéologique et géotechnique.

Actuellement, la campagne de reconnaissances G11 phase 2 a été réalisée, les résultats sont détaillés au titre 2.3 ci-après.

- Quel est le but des investigations géotechniques entreprises ?

Les investigations géotechniques entreprises dès la phase d'études préliminaires permettent donc :

- *D'établir le modèle géologique du projet.* Les investigations permettent tout au long du tracé de fournir la coupe géologique au droit de chaque sondage ; le travail de l'ingénieur géologue/géotechnicien a consisté à établir une coupe linéaire par corrélation entre ces points de sondages.
- *D'établir un modèle hydrogéologique.* Les investigations doivent permettre de caractériser le ou les aquifères en présence, tant d'un point de vue piézométrique (niveau de la ou des nappes) que d'un point de vue perméabilité (paramètre permettant d'estimer les venues d'eau).
- *De caractériser les couches rencontrées* tant d'un point de vue mécanique (paramètres permettant de dimensionner les ouvrages de génie civil) qu'environnemental (paramètres permettant de déterminer la destination d'évacuation des déblais).

Chaque nouvelle phase d'études est l'objet de reconnaissances complémentaires qui viennent compléter et préciser les données, et donc permettre de fiabiliser les hypothèses prises à la phase précédente.

Le but final est de localiser et caractériser des zones dites « homogènes » afin d'adapter les méthodes constructives à chacune d'entre elles. Des zones singulières peuvent également être identifiées (exemple zone de dissolution de gypse), qui feront l'objet de reconnaissances spécifiques au regard de la singularité rencontrée, permettant ainsi de mettre en place les méthodes constructives et les confortements adaptés.

- Quelles sont les dispositions mises en place en phase travaux ?

La norme NF P 94-500 régit également la phase de réalisation, et impose la réalisation de deux missions G3 et G4 :

- La mission G3 est une mission d'études et de suivi géotechnique des travaux portée par l'entreprise qui réalise les travaux.
- La mission G4 est une mission de supervision géotechnique d'exécution portée par le Maître d'ouvrage, et déléguée à son Maître d'œuvre.

Ces deux missions se décomposent en deux phases :

- La première est une phase d'études lors de laquelle l'entrepreneur valide les hypothèses géotechniques, et dimensionne les ouvrages géotechniques. Le Maître d'œuvre fournit un avis sur ces études d'exécution.
- La deuxième est une phase de suivi qui permet à l'entrepreneur de vérifier que les hypothèses établies pendant les études correspondent bien à ce qui est effectivement rencontré sur site. Le Maître d'œuvre organise des validations ponctuelles sur le chantier dans le même but.

La confrontation de ces deux missions G3 et G4 (double regard) est un gage de sécurité, et entre dans le cadre de la maîtrise des risques.

2.2 Prise en compte du bâti, des infrastructures et des réseaux pour le tronçon Noisy champs – Pont de Sèvres

2.2.1 Prise en compte des enjeux dès la conception

Le projet de réalisation du tronçon Pont de Sèvres – Noisy-Champs du Grand Paris Express s'inscrit dans une zone densément urbanisée.

La manière la plus efficace de limiter les risques sur les ouvrages existants est d'en éloigner au maximum le projet, dans la mesure du possible. Dès le stade des études préliminaires qui ont servi de support à l'étude d'impact, le recensement des bâtis, des infrastructures et des réseaux existants sensibles a été pris en compte dans la conception du projet. Les précautions suivantes ont été prises pour limiter les impacts potentiels recensés au titre précédent :

- La profondeur du tunnel est telle qu'il se situe largement sous les fondations superficielles des ouvrages.
- La profondeur des fondations des immeubles de grande hauteur ou bâtis sur fondations profondes a été recensée ou estimée afin de cartographier le bâti et d'identifier les zones à éviter.
- Le tracé en plan du tunnel évite au maximum ces obstacles profonds.
- En revanche, pour la majorité des ouvrages à ciel ouvert (tranchées et gares en particulier), la réalisation de fouilles de grande profondeur en milieu urbain est souvent nécessaire. La technique retenue des parois moulées permet de limiter les impacts potentiels de la réalisation de ces ouvrages sur le bâti existant.

2.2.2 Localisation des zones d'incidence potentielle

- *Bâti*

Le tracé du tunnel est conçu de façon à éviter plusieurs zones de bâti particulièrement sensibles. Ainsi, le tunnel évite notamment de passer à l'aplomb de l'institut Gustave Roussy sur la commune de Villejuif, sous le CHU Henri Mondor à Créteil ou encore sous les bâtiments de la Cité Descartes sur la commune de Champs-sur-Marne.

En présence de bâti en surface, l'impact potentiel des travaux sur ce dernier est localisé sur la base de plusieurs critères :

- Profondeur du tunnel : plus la couverture au-dessus du tunnel est importante, ou plus le tunnel est profond par rapport au bâti et ses fondations, moins le projet de métro a d'impact sur le bâti.
- Nature des terrains situés en couverture : en effet, certains terrains ont des caractéristiques mécaniques médiocres. A l'échelle du projet, on trouve notamment des alluvions, des remblais ou des éboulis, en surface, sur certaines sections de tracé. Inversement, certains terrains sont considérés comme solides. Ils contribuent à la stabilité du bâti en surface, notamment lorsqu'ils se trouvent au-dessus du tunnel. A l'échelle du projet, on trouve notamment le Calcaire Grossier ou le Calcaire de Champigny.
- Etat du bâti (potentiel de vulnérabilité face aux travaux à entreprendre).
- Etat des sols : carrières, vides de dissolution, etc.

Au regard de ces différents critères, plusieurs sections du projet n'ayant pu éviter ces zones d'incidence potentielle ont nécessité une attention particulière :

- Les deux sections de tunnel en entrée et en sortie de la gare Issy RER sont situées à faible profondeur, dans la craie altérée, sous une couche d'alluvions.
- En sortant de la gare de Châtillon-Montrouge, la ligne passe sous l'avenue Marx Dormoy. Cette dernière est bordée au nord par des ouvrages de grande hauteur, bâtis sur fondations profondes. Par ailleurs, le tunnel est surplombé par des zones de carrières souterraines dans cette zone.
- Dans le secteur de la gare de Bagneux, le tracé reste en profondeur afin d'éviter les fondations de grandes barres d'immeubles (8 à 15 étages).
- En extrémité est de la vallée de la Bièvre, sur la commune de Cachan, le tunnel passe à faible profondeur sous une couche de remblai et d'alluvions modernes.
- En sortant de la gare de Vitry Centre, le tunnel se situe à faible profondeur, sous une couche d'éboulis.
- Les deux sections de tunnel en entrée et en sortie de la gare de Créteil L'Echat sont situées à faible profondeur, sous une couche d'alluvions.
- Les deux sections de tunnel en entrée et en sortie de la gare de Champigny Centre sont situées à faible profondeur, sous une couche d'alluvions.
- A l'approche de la gare de Bry-Villiers-Champigny, le tunnel se situe à faible profondeur, sous les Marnes supra-gypseuses.
- Entre Noisy-Champs et Bry-Villiers-Champigny, le tunnel passe au-dessus de la couche protectrice du Calcaire de Champigny pour s'insérer à faible profondeur dans les Marnes d'Argenteuil, sous les Argiles Vertes.

La réalisation des études de maîtrise d'œuvre permettra de préciser les mesures qui seront prises pour éviter les incidences du projet sur le bâti, les réseaux et les infrastructures.

- *Réseaux*

Assainissement : le projet rencontre en deux endroits différents l'émissaire sud 2^{ème} branche (SIAAP). Une première fois au niveau de la gare Issy RER : le génie civil de la gare est conçu de façon à éviter d'impacter ce collecteur. Une deuxième fois sur la commune de Cachan : le tunnel longe alors l'émissaire, qui passe sous l'avenue Carnot.

Lors de son passage sous la vallée de la Bièvre, le tunnel s'approfondit afin d'éviter plusieurs collecteurs d'assainissement.

Entre les gares de Villejuif Louis Aragon et de Vitry Centre, le tunnel longe l'émissaire de Villejuif sans l'impacter.

Sur le territoire de la commune de Vitry-sur-Seine, le tunnel vient se placer le long de la RD5, côté ouest, afin d'éviter toute interférence avec le collecteur d'assainissement VL10, situé côté est de la RD5.

Sur le territoire de la commune d'Alfortville, le tunnel se trouve à une profondeur importante afin d'éviter toute interférence avec le futur tunnel du collecteur SIAAP VL9.

Canalisations de transport de gaz : le projet est notamment concerné par des canalisations de transport de gaz sur les communes de Boulogne-Billancourt (face à l'île Seguin), Issy-les-Moulineaux (au niveau du pont de Billancourt), Montrouge, Champigny, Créteil, Maisons-Alfort et Vitry-sur-Seine.

Le repérage de ces canalisations a été fait en collaboration avec GRT gaz.

Canalisation de pétrole : le projet de métro est concerné par une seule canalisation TRAPIL, à Vitry-sur-Seine. Cette dernière est toutefois évitée et ne représente pas d'enjeu particulier vis-à-vis du projet.

Canalisations de chauffage urbain : les canalisations de chauffage urbain de la compagnie parisienne CPCU ne concernent le projet de métro, qu'à Boulogne-Billancourt et à Vitry-sur-Seine. Le projet de la gare de Créteil L'Échat interfère avec une canalisation de la Société de Chauffage Urbain de Créteil, qu'il sera nécessaire de dévier.

- *Infrastructures*

De façon générale, le tracé du tunnel évite les infrastructures existantes. Cependant, le projet passe à proximité d'un certain nombre d'ouvrages :

- le Pont de Sèvres et l'échangeur routier,
- la ligne 9 du métro (souterraine), à proximité immédiate de la gare de Pont de Sèvres,
- le faisceau ferroviaire en viaduc de la ligne C du RER, à Issy-les-Moulineaux,
- le faisceau ferroviaire en viaduc de la ligne 13 du métro parisien et des trains en provenance de la gare Montparnasse,
- les quais du RER B, construits en viaduc sur fondations profondes, à Arcueil - Cachan,
- la vallée de la Bièvre canalisée à Cachan,
- l'autoroute A6,
- la ligne 7 du métro (souterraine) au niveau de la gare de Villejuif Louis Aragon,
- le faisceau ferré emprunté par le RER C aux Ardoines,
- l'autoroute A86,
- le faisceau de voies ferrées du RER D à la gare de Vert de Maisons,
- les voies ferrées de fret près de la future gare Bry - Villiers - Champigny,
- les voies ferrées empruntées par le RER E à hauteur de la future gare Bry - Villiers - Champigny,
- les voies du RER A à Saint-Maur - Créteil et Noisy-Champs.

Plusieurs prolongements de lignes souterraines de métro à venir ont été pris en compte dans les études préliminaires :

- prolongement du métro L12 à Issy RER,

- prolongement du métro L4 à Bagneux,
- liaisons Saint-Denis Pleyel - Rosny Bois-Perrier - Champigny Centre et Rosny Bois-Perrier - Noisy-Champs du réseau complémentaire structurant, en connexion avec le projet de tronçon Pont de Sèvres - Noisy-Champs à Champigny Centre et à Noisy-Champs.

2.3 Prise en compte des premiers résultats des investigations de la campagne de reconnaissance géotechnique G11

2.3.1 Présentation des investigations

En fonction des premiers éléments issus de la phase documentation et du profil en long préliminaire de projet, une campagne de reconnaissances géotechniques de type G11 au sens de la norme NF P 94-500 sur les missions d'investigations géotechniques (cf. titre 2.1.2) a été définie et réalisée en 2012.

L'étude bibliographique a permis de distinguer deux portions du tracé différentes :

- une portion où la problématique principale est liée à l'eau : Villejuif IGR - Noisy-Champs ;
- une portion où la problématique principale est la présence de carrières : Pont de Sèvres - Villejuif IGR.

Chacune de ces problématiques a dicté le type de reconnaissances à effectuer.

Sur la portion **Villejuif IGR - Noisy-Champs**, 123 sondages ont été réalisés, se divisant en :

- 64 sondages carottés de 25 à 92 m de longueur dans lesquels ont été prélevés environ 290 échantillons intacts pour la réalisation d'essais en laboratoire (essais d'identification et mécaniques) ;
- 57 sondages pressiométriques de 25 à 63 m de longueur avec un essai pressiométrique tous les 1,5 m ;
- 2 forages destructifs de 92 et 95 m de longueur avec enregistrement des paramètres de forage.

L'espacement moyen entre sondages s'établit à environ 270 m.

Au droit de chacune des 9 gares situées sur cette portion, le programme a prévu, lorsque le contexte urbain le permettait, la réalisation de 3 sondages carottés et 2 sondages pressiométriques.

La quasi-totalité des sondages carottés et le quart des sondages pressiométriques ont été équipés en piézomètres, conduisant ainsi à un total d'environ 80 piézomètres répartis le long du tracé pour reconnaître et suivre les différentes nappes concernées par le projet. Un relevé mensuel de l'ensemble de ces piézomètres est prévu pendant toute la durée des études et du projet.

Sur la portion **Pont de Sèvres - Villejuif IGR**, 67 sondages ont été réalisés, se divisant en :

- 36 sondages carottés de 35 à 100 m de longueur dans lesquels ont été prélevés environ 145 échantillons intacts et remaniés pour la réalisation d'essais en laboratoire (essais d'identification et mécaniques), généralement équipés en piézomètres ;

Rapport de synthèse relatif aux enjeux géologiques, hydrogéologiques et géotechniques du projet

- 24 sondages pressiométriques de 35 à 75 m de longueur, avec un essai pressiométrique tous les 1,5 m ;
- 7 forages destructifs de 30 à 90 m de longueur avec enregistrement des paramètres de forage.

L'espacement moyen entre sondages s'établit à environ 240 m. *Le maillage des sondages est plus serré sur cette portion, car celle-ci se situe dans une zone de carrières importante : les reconnaissances prennent en compte ce risque et ont donc été adaptées.*

Au droit de chacune des sept gares situées sur cette portion, le programme a prévu, lorsque le contexte urbain le permettait, la réalisation de trois sondages carottés et deux sondages pressiométriques.

La quasi-totalité des sondages carottés et le quart des sondages pressiométriques ont été équipés en piézomètres, conduisant ainsi à un total d'environ 50 piézomètres répartis le long du tracé, permettant de reconnaître et de suivre les différentes nappes concernées par le projet. Un relevé mensuel de l'ensemble de ces piézomètres est prévu pendant la durée des études.

En récapitulatif, sur l'ensemble du linéaire des 33 km entre Pont de Sèvres et Noisy-Champs, ont donc été réalisés :

- 100 sondages carottés allant de 25 à 100 m de profondeur ;
- 435 échantillons intacts ou remaniés pour essais en laboratoire ;
- 81 sondages pressiométriques allant de 25 à 75 m de profondeur, avec un essai pressiométrique tous les 1,5 m ;
- 9 forages destructifs allant de 30 à 95 m de profondeur ;
- 130 piézomètres posés dans les différentes nappes présentes et qui seront suivis mensuellement durant toute la phase d'études du projet.

Les reconnaissances engagées par la Société du Grand Paris sont en quantité importante au regard de la phase d'études à laquelle se situe le projet.

L'eurocode 7 EN 1997-2 de septembre 2007 « Calcul géotechnique » (annexe B relative aux ouvrages linéaires) préconise des sondages espacés de 20 à 200 m pour la phase finale de conception, soit la phase projet (correspondant à une mission « G2 » au sens de la norme NF P 94-500). Or, à ce stade, le tronçon Pont de Sèvres - Noisy-Champs est en phase d'études préliminaires et l'espacement entre sondages correspond déjà approximativement au minimum demandé par l'eurocode alors qu'il y a encore à venir deux phases d'études d'approfondissement de la conception (avant-projet et projet) avec les campagnes complémentaires associées.

Rappelons que pour les ouvrages gares, le nombre de sondages est de 5 en phase G11 phase 2 pour un ouvrage de 120 m de long, ce qui est également très important.

Le but de ces reconnaissances conséquentes, menées dès la phase G11 phase 2, est de permettre dès la phase d'études d'avant-projet de stabiliser le modèle géologique, hydrogéologique et géotechnique le long du tracé afin de finaliser les méthodes constructives.

2.3.2 Comparaison des premiers résultats de la reconnaissance G11 avec l'enquête bibliographique initiale

Ce paragraphe détaille les caractéristiques géotechniques des sols telles qu'elles découlent de la campagne de sondages. Il identifie les singularités et les écarts par rapport au modèle géologique ayant servi de base aux études préliminaires.

La synthèse figure au titre 2.3.3 du présent document.

Portion Pont de Sèvres - Villejuif IGR

Cette portion est constituée côté ouest par l'extrémité nord du plateau de la Beauce et côté est par le nord-ouest du plateau du Hurepoix. Ces deux plateaux sont profondément entaillés par la vallée de la Seine et son petit affluent la Bièvre. Au point de vue tectonique, cette portion se situe sur le flanc sud-ouest de l'anticlinal de Meudon.

D'un point de vue géologique, cette portion de tronçon peut être divisée en six sous-tronçons géologiquement homogènes :

Sous-tronçon Boulogne / Vallée de la Seine

Ce sous-tronçon couvre **la gare du Pont de Sèvres et l'intergare Pont de Sèvres - Issy RER C.**

➤ **Comparaison Série stratigraphique issue de l'analyse bibliographique – Premiers résultats de la campagne G11 :**

Dans la vallée de la Seine, la série stratigraphique prévisionnelle est la suivante :

- des remblais et des Alluvions Modernes peu compactes sur 4 à 7 m d'épaisseur ;
- Alluvions Anciennes sablo-graveleuses compactes jusqu'à 15 à 17 m de profondeur (base cote 15 à 16) ;
- la craie du Campanien altérée et fracturée jusqu'à des cotes de 0 à -2 /-3 quai Georges Gorse à proximité de la passerelle, puis craie saine.

Les résultats des sondages de la campagne G11 réalisés sur ce sous-tronçon montrent que la série stratigraphique est conforme aux prévisions. Les écarts par rapport aux prévisions en termes de cotes du toit des formations sont relativement faibles. Les écarts constatés sur l'épaisseur globale des remblais et Alluvions Modernes sont de l'ordre de 2 m environ. En revanche, les cotes du toit de la Craie du Campanien sont conformes aux prévisions.

Du point de vue hydrogéologique, les piézomètres posés confirment que la nappe de la Craie à Boulogne et Issy-les-Moulineaux est en équilibre avec la nappe des Alluvions de la Seine et communique par un réseau de fractures. Les relevés de la nappe des Alluvions à Boulogne se situent autour de la cote 26,50 en octobre 2012 et la nappe de la Craie, également.

Les coupes géologiques bibliographiques de l'intergare Fort d'Issy - Pont de Sèvres, tout comme de la gare Pont de Sèvres, sont confirmées par les sondages, les piézomètres posés confirment également le système hydrogéologique de la zone.

Sous-tronçon île Saint-Germain - Fort d'Issy

Ce tronçon représente le début de l'intergare Issy RER C – Fort d'Issy - Vanves - Clamart, de la vallée de la Seine au sommet du plateau (Fort d'Issy).

➤ **Comparaison Série stratigraphique issue de l'analyse bibliographique – Premiers résultats de la campagne G11 :**

Dans la partie basse d'Issy-les-Moulineaux, à proximité de la Seine, les alluvions de la Seine sur 13 à 18 m d'épaisseur recouvrent directement la Craie altérée. Au droit de l'île Saint-Germain, l'épaisseur des alluvions est d'environ 13 m.

Au droit de la gare Issy RER C, en aval du viaduc de la ligne C du RER, une épaisseur de 7 à 8 m de remblais et d'éboulis recouvre les Alluvions présentes jusqu'à 16 à plus de 18 m de profondeur (cote \geq 17 à 18), la Craie à silex représentant le substratum.

La réalisation de la gare est prévue en tranchée ouverte. Dans l'étude bibliographique, la gare se situait quasi intégralement dans la Craie. Cette différence engendrera juste une conséquence sur la profondeur de la paroi moulée. La méthode constructive retenue est donc parfaitement adaptée au contexte géologique.

Au droit du coteau sous le fort d'Issy, d'importantes coulées d'éboulis de Marnes et Caillasses et de Calcaire Grossier recouvrent, sur environ 20 m, le terrain en place constitué par des terrains de l'Yprésien surmontant les Marnes et Calcaires de Meudon (cote du toit aux environs de la cote 46) puis la Craie (cote du toit 36 à 38).

En étude bibliographique, le tunnel au niveau de la gare de Fort d'Issy - Vanves - Clamart se situait dans l'Yprésien pour plonger vers la Seine dans la Craie. Les sondages le confirment.

En fin de sous-tronçon, la série stratigraphique prévisionnelle à partir du terrain naturel (cote 85 à 89) est constituée par :

- la base des Marnes et Caillasses
- Calcaire Grossier (les cotes du toit sont comprises entre 74 et 77 et la base entre 56 et 57/58) : celui-ci a fait l'objet d'exploitation souterraine de l'étage supérieur entre les cotes 73/75 et 71/72 dans le secteur de la rue de l'Egalité et de la rue d'Erevan ;
- Argile Plastique d'épaisseur variable entre des cotes comprises entre 57 et 50 environ ;
- Marnes et calcaires de Meudon à partir d'une cote comprise entre 50 et 53 ;
- Craie à partir de cotes comprises entre 38 et 43 : il s'agit d'une craie moyennement compacte fracturée. Elle a été exploitée sous la zone du boulevard Rodin sur deux niveaux (ciel 1^{er} niveau vers 38 à 43 et ciel 2^{ème} niveau vers 32 à 33) ; ces carrières ont subi des effondrements importants et ont été en principe traitées par injections, des investigations en phase avant-projet seront effectuées pour le vérifier.

A signaler que le coteau est recouvert d'éboulis et qu'en extrémité du coteau, des bancs de Calcaire Grossier fracturés ont glissé sur l'Argile Plastique.

A la base du coteau, des éboulis recouvrent les Marnes et Calcaires de Meudon puis la craie.

Les résultats des sondages de la campagne G11 réalisés sur ce sous-tronçon montrent que la série stratigraphique est conforme aux prévisions. Les écarts par rapport aux prévisions en termes de cotes du toit des formations sont relativement faibles. On notera cependant que les Calcaires et Marnes de Meudon ont été rencontrés vers les cotes 48 à 50, soit légèrement plus bas que prévu.

➤ **Singularités :**

Sur ce sous-tronçon, il faut noter les singularités suivantes :

- La bibliographie indique la présence d'exploitations souterraines de craie et de Calcaire Grossier sur la partie haute et sur toute la partie en pente (ZAC des Epinettes et côté Boulevard Rodin) d'Issy-les-Moulineaux. Des immeubles ont subi des désordres dus aux dégradations des carrières (effondrements et tassements) et à des phénomènes de glissement du Calcaire Grossier sur l'Argile plastique, et ont dû être repris en sous-œuvre par micropieux. De plus, il existe des écoulements superficiels de petites nappes perchées retenues par des horizons argileux.
- Dans le bas d'Issy-les-Moulineaux, compte tenu de la présence d'alluvions modernes peu compactes en surface, les fondations de nombreux immeubles ou d'ouvrages d'art sont constituées par des pieux descendus dans les alluvions anciennes, les Marnes de Meudon ou la craie compacte avec éventuellement des reprises en sous-œuvre par micropieux.
- Certaines piles du viaduc de la ligne RER C sont confortées par des massifs de consolidation dans les carrières de craie ; les carrières dans ce secteur semblent avoir fait l'objet de bourrages ou d'injections de remplissage.

Ces singularités seront traitées conformément aux principes édictés au titre 3 du présent document.

Sous-tronçon Plateau de Malakoff, Châtillon, Bagneux, et Arcueil-Cachan

Ce sous-tronçon correspond aux gares Fort d'Issy - Vanves - Clamart, Châtillon-Montrouge, Bagneux, Arcueil-Cachan, et aux intergares correspondantes.

➤ **Comparaison Série stratigraphique issue de l'analyse bibliographique – Premiers résultats de la campagne G11 :**

Au droit des communes de Bagneux et de Châtillon, la série stratigraphique prévisionnelle sous ce plateau est constituée par :

- le Calcaire de St Ouen ;
- les Sables de Beauchamp ;
- les Marnes et Caillasses (toit entre les cotes 68 à 70 à Bagneux côté cimetière, 71 à 72 côté Châtillon-Montrouge, et au fort d'Issy il remonte vers la cote 82) ;
- le Calcaire Grossier (toit entre les cotes de 60 à 62 côté Cachan, de 67 à 70 côté Châtillon-Montrouge, au fort d'Issy il remonte aux environs des cotes 74/75) ;

- les terrains de l'Yprésien (Argile Plastique) : toit vers la cote 57 dans la zone du fort d'Issy ;
- le Calcaire Montien et les Marnes de Meudon.

Vers les communes de Malakoff et Vanves, des terrasses d'alluvions recouvrent directement les Marnes et Caillasses.

Les résultats des sondages de la campagne G11 réalisés sur ce sous-tronçon montrent que la série stratigraphique est sensiblement conforme aux prévisions. Les formations supérieures (Calcaire de St Ouen et Sables de Beauchamp) n'ont été rencontrées que localement, principalement dans les portions est et centrale de la zone, du fait de la remontée des formations vers l'ouest suivant l'anticlinal de Meudon.

On constate quelques écarts par rapport aux prévisions sur les cotes de toit des formations. Ainsi, le toit des Marnes et Caillasses a été rencontré vers les cotes 68 à 70 à la gare Bagneux côté cimetière, de 73 à 74 côté Châtillon-Montrouge et vers la cote 77/78, au fort de Vanves. Celui du Calcaire Grossier se situe vers les cotes de 59 à 62 côté Cachan, 65/66 côté Châtillon-Montrouge, 69/70 au fort de Vanves et 71/72 à Malakoff. Le toit de l'Yprésien (Argile Plastique) est rencontré vers les cotes 35 à 37 à Arcueil-Cachan, 43/45 à Châtillon-Montrouge et 53/55 à la gare de Clamart.

Globalement sur ce sous-tronçon, la géologie est conforme à l'étude bibliographique, le tunnel est bien inséré dans les horizons prévus au stade des études préliminaires, les méthodes constructives envisagées sont donc bien adaptées.

➤ **Singularités :**

Sur ce tronçon, les sondages ont apporté des précisions quant à la répartition spatiale des carrières tant en planimétrie qu'en verticalité. Ils ont notamment permis de répondre à l'indétermination qui subsistait en étude bibliographique sur l'exploitation d'un éventuel troisième niveau. Les observations confirment les altitudes et extensions des exploitations telles qu'imaginées à l'issue de l'étude documentaire.

Une synthèse de ce qui a été reconnu en sondages et lors de visites de carrières réalisées à proximité immédiate du tracé (dans les endroits accessibles) est présentée ci-après.

- La grande étendue des anciennes exploitations souterraines du Calcaire Grossier est confirmée : celles-ci recouvrent, au droit du tracé, les communes de Châtillon et le sud de Malakoff, Bagneux, Cachan (en partie). Selon les documents de l'Inspection générale des carrières (IGC), les exploitations ont été intensives au droit des communes de Châtillon, Montrouge, Bagneux et Cachan. Ces exploitations sont très souvent sur deux niveaux et se situent de 15 à 27 m de profondeur, avec exploitation des étages supérieurs et moyens et souvent des étages inférieurs. Selon les visites qui ont été missionnées par la Société du Grand Paris sous le cimetière de Bagneux et sous les ateliers SNCF de Châtillon-Montrouge où ces carrières souterraines sont visitables, on relève les points suivants :
 - Les hauteurs d'exploitation de chaque étage sont de 1,30 m à 1,50 / 1,60 m environ, mais les étages supérieurs et moyens peuvent avoir été exploités en même temps avec abattage du banc calcaire de séparation.
 - Ces carrières sont remblayées derrière les hagues (cf. figure 1, titre 3.1.1 ci-après) avec les débris d'exploitation (fragments de blocs et sable calcaire).
 - L'étage inférieur était exploité avec support du ciel d'exploitation du type « piliers à bras ».

- Au fort d'Issy, les sols d'exploitation se situent vers 17 à 18 m de profondeur.
- A Vanves, les exploitations sont plus rares et un peu moins profondes.
- A Malakoff, les exploitations peuvent atteindre la profondeur de 15 à 20 m avec un sol d'exploitation de l'étage supérieur à 64/65 NGF et de l'étage moyen à 61/62 NGF, côté ouest. A signaler des exploitations à ciel ouvert remblayées sur 5 à 6 m de profondeur au droit de la rue Drouet-Peupion (sol vers la cote 70 NGF) et sur 16 m au clos Montholon avec quelques exploitations souterraines d'Argile Plastique dans le même secteur.
- A noter qu'au fort de Vanves, les exploitations souterraines sur deux niveaux descendent jusqu'à 24/25 m de profondeur (sol d'exploitation à la cote 60/62).
- Au droit de la gare de Clamart, côté gare SNCF, il faut signaler l'existence d'anciennes exploitations à ciel ouvert de Calcaire grossier remblayées jusqu'à des profondeurs variant de 11 à 16 m.
- La gare de Châtillon-Montrouge, prévue en partie sous l'avenue Marx Dormoy, se situe en limite et sous d'anciennes exploitations souterraines de Calcaire Grossier exploitées sur 2 et parfois 3 étages, en grande partie remblayées sauf au droit des galeries ou ayant fait localement l'objet d'injections. A signaler que le Calcaire Grossier, localement sous l'avenue Marx Dormoy, n'a pas fait l'objet d'exploitation.
- La gare de Bagneux se situe au droit d'anciennes exploitations souterraines (deux étages exploités) dont le sol du dernier niveau se situe à 28/29 m de profondeur (cote 53 NGF environ) dont certaines parties ont fait l'objet d'injection.
- La gare d'Arcueil Cachan, positionnée en partie sous la ligne RER B, se situe sous d'anciennes exploitations à ciel ouvert du Calcaire Grossier remblayées, dont la profondeur par rapport au terrain naturel est de 19 à 21 m environ.

Ces singularités seront traitées conformément aux principes édictés au titre 3 du présent document.

Sous-tronçon Passage sous la vallée de la Bièvre

Ce sous-tronçon correspond sensiblement à l'intergare Arcueil Cachan – Villejuif IGR.

➤ **Comparaison Série stratigraphique issue de l'analyse bibliographique – Premiers résultats de la campagne G11 :**

La série stratigraphique prévisionnelle dans le fond de la vallée (cote de la surface 42 à 45), dans la zone de l'avenue Cousin de Méricourt, est la suivante :

- Des remblais de comblement ;
- Alluvions Modernes de la Bièvre ;
- Alluvions Anciennes jusqu'à une profondeur moyenne de 8 à 10 m, mais qui peut être localement plus importante ;
- Des reliquats des Marnes et Caillasses et des bancs de Calcaire Grossier (toit aux environs des cotes 32 à 34) qui semblent avoir glissé sur le coteau dans le fond de la vallée ;
- Fausses Glaises et Argile Plastique (toit aux environs des cotes 23 à 24) ;

- Calcaires et Marnes de Meudon.

Les résultats des sondages de la campagne G11 réalisés sur ce sous-tronçon montrent que la série stratigraphique est sensiblement conforme aux prévisions. Sur le coteau coté Villejuif, les terrains en place sont recouverts d'une couche d'éboulis et de colluvions d'épaisseur variable. On notera que sur le flanc de la vallée coté est, le Calcaire de St Ouen est le premier terrain en place et surmonte les Marnes et Caillasses puis le Calcaire Grossier. Par ailleurs, les Calcaires et Marnes de Meudon n'ont été atteints par aucun des sondages réalisés dans la zone.

Les sondages ont permis de reconnaître, à flanc de coteau, des éboulis de pente jusqu'à des profondeurs pouvant atteindre 16 à 19 m environ. Le toit du Calcaire Grossier a été rencontré aux environs des cotes 25 à 26 au droit du tracé, alors qu'il est aux environs des cotes 34/35 plus au nord. De même, le toit de l'Argile Plastique a été rencontré aux environs des cotes 3 à 4 sur le tracé et des cotes 11 à 12 à quelques centaines de mètres au nord du tracé. Ces décalages pourraient être le signe de la présence de failles.

D'après l'étude bibliographique, le tunnel s'insérerait sur un front mixte Calcaire Grossier – Yprésien. Les sondages ont montré une descente générale de la série, le front de taille du tunnel se situant maintenant dans les Marnes et Caillasses et le Calcaire Grossier pour la partie à flanc de coteau, ce qui n'impacte pas le fonctionnement du tunnelier. Plus bas, sous la vallée de la Bièvre, deux configurations seront rencontrées d'est en ouest : un front mixte éboulis/Calcaire Grossier, puis Calcaire Grossier/Argile Plastique.

➤ **Singularités :**

Sur ce tronçon, il faut noter les singularités suivantes :

- *A l'ouest* : d'anciennes exploitations de Calcaire Grossier existent dans ce secteur, soit à ciel ouvert et remblayées, soit en souterrain, qui sont mentionnées sur les cartes de l'IGC.
- *Dans la vallée de la Bièvre* : présence d'une importante épaisseur d'Alluvions surmontant des éboulis puis le Calcaire Grossier. Les différences de cote du toit du Calcaire Grossier et des terrains de l'Yprésien à faible distance peuvent être l'indice d'une zone de faille.
- *Depuis la vallée de la Bièvre à l'est* : La bibliographie (cartes de l'IGC) indique que des exploitations à ciel ouvert des niveaux inférieurs du Calcaire Grossier ainsi que des exploitations à ciel ouvert de l'Argile Plastique (cote du fond 30 à 38 NGF) existent dans ce secteur. De nombreux bâtiments modernes sont fondés sur pieux ou puits, d'autres sont situés au droit de massifs de consolidation d'anciennes exploitations atteignant les niveaux inférieurs du Calcaire Grossier ; quelques bâtiments sont également fondés sur des radiers nervurés mobilisant l'Argile Plastique. En outre certains bâtiments ont pu faire l'objet de reprises en sous-œuvre par micropieux, dans la vallée de la Bièvre.

Ces singularités seront traitées conformément aux principes édictés au titre 3 du présent document.

Sous-tronçon Villejuif IGR

Ce sous-tronçon comprend principalement la **gare de Villejuif IGR**.

➤ **Comparaison Série stratigraphique issue de l'analyse bibliographique – Premiers résultats de la campagne G11 :**

Pour cette première partie du tracé qui se situe au droit du plateau de Villejuif, la série stratigraphique prévisionnelle est la suivante :

- Sables de Fontainebleau constitué de sables fins légèrement argileux à la base, sa base se situant vers les cotes 106 à 107 ;
- Marnes à huitres ;
- Calcaire de Brie constitué de marne beige avec des niveaux ou des blocs de calcaire dur, de meulière, son épaisseur est de l'ordre de 5 à 6 m ;
- Argile verte très plastique (toit aux environs des cotes 100 à 101), son épaisseur en place est de l'ordre de 5 m ;
- Marnes Supragypseuses (toit entre les cotes 93 et 96), constituées par les Marnes de Pantin puis les Marnes d'Argenteuil sur environ 13 à 14 m d'épaisseur ;
- Masses et Marnes du Gypse (toit entre les cotes 79 et 83) constituées de masses de gypse saccharoïde et d'inter-bancs marneux ;
- Marnes Infragypseuses ;
- Calcaire de St Ouen ;
- Sables de Beauchamp (toit entre les cotes 55 et 56) ;
- Marnes et Caillasses ;
- Calcaire Grossier.

Les résultats des sondages de la campagne G11 réalisés sur ce sous-tronçon montrent que la série stratigraphique est conforme aux prévisions. On notera cependant qu'aucun des sondages réalisés sur le site de la gare Villejuif IGR n'a atteint le Calcaire Grossier. D'une manière générale, les différentes formations de la série ont été reconnues à des profondeurs plus importantes que prévues surtout pour les plus profondes.

Ainsi, la base des Sables de Fontainebleau a été reconnue aux environs des cotes 102 à 104. L'épaisseur du Calcaire de Brie est légèrement plus faible que prévue, de l'ordre de 4 à 5 m. L'Argile Verte a été reconnue à partir d'une cote de l'ordre de 96 à 98 sur une épaisseur d'environ 6 à 7 m soit un peu plus importante que prévue. Le décalage par rapport aux prévisions des toits des couches s'accroît avec la profondeur, situant ainsi le toit des Marnes Supragypseuses aux environs des cotes 88 à 91, celui des Masses et Marnes du Gypse aux environs de 72 à 75, celui des Sables de Beauchamp entre 40 et 41 environ et celui des Marnes et Caillasses, dernière formation reconnue, vers les cotes 37 à 38 environ.

La gare de Villejuif IGR est prévue en méthode mixte (puits central circulaire et partie en méthode souterraine traditionnelle). Pour le puits, la descente de la série impacte très peu le dimensionnement de ce dernier. Pour la partie en méthode souterraine traditionnelle, l'étude bibliographique prévoyait une voûte (située aux alentours de 45-50 m de profondeur) dans les

Masses et Marnes du gypse. Avec la descente de la série, elle devrait se situer dans les Marnes d'Argenteuil, horizon qui est assez proche de celui des Masses et Marnes du Gypse et ne modifie donc pas les méthodes constructives envisagées.

➤ **Singularités :**

Sur ce tronçon, il faut noter les singularités suivantes :

- *Sur le plateau de Villejuif* : Les sondages ont confirmé la présence des anciennes exploitations à ciel ouvert des Sables de Fontainebleau, remblayées sur 5 à 16 m d'épaisseur, du côté de l'IGR et des réservoirs du SEDIF (rue Edouard Vaillant). Il existe dans ce secteur des ouvrages semi-enterrés ainsi que 9 réservoirs en élévation fondés sur pieux ancrés dans les Marnes d'Argenteuil.
- *Au nord-est du tracé* : quelques exploitations souterraines de gypse sont présentes, impliquant des risques de dissolution et de fontis, selon les indications des cartes de l'IGC.

Ces singularités seront traitées conformément aux principes édictés au titre 3 du présent document.

Portion Villejuif IGR – Noisy-Champs

Cette portion est constituée côté ouest par le nord-est du plateau du Hurepoix et côté est par l'extrémité nord-ouest du plateau de la Brie, ils sont profondément entaillés par la vallée de la Seine et son petit affluent la Bièvre. Au point de vue tectonique, la région se situe sur le flanc sud-ouest de l'anticlinal de Meudon.

D'un point de vue géologique, ce tronçon peut être divisé en quatre sous-tronçons.

Sous-tronçon vallée de la Seine – Villejuif IGR (gare non comprise)

Ce sous-tronçon comprend les gares de Villejuif Louis Aragon et Vitry Centre, ainsi que l'intergare correspondante, et l'intergare entre la gare de Villejuif IGR et Villejuif Louis Aragon.

➤ **Comparaison Série stratigraphique issue de l'analyse bibliographique – Premiers résultats de la campagne G11 :**

Pour cette partie du tracé qui se situe principalement sous le plateau de Villejuif, la série stratigraphique prévisionnelle à partir du TN (cote de 48 à 120), telle qu'elle ressort de l'analyse documentaire, est la suivante :

- Remblais d'épaisseur variable ;
- Limon des plateaux ;
- Sables de Fontainebleau constitués de sable fin légèrement argileux à la base, sa base se situant vers les cotes 106 à 107 ;
- Marnes à huitres ;

- Calcaire de Brie constitué de marne beige avec des niveaux ou des blocs de calcaire dur, de meulière, son épaisseur est de l'ordre de 5 à 6 m ;
- Argile verte très plastique (toit entre les cotes 87 et 101) : son épaisseur en place est de l'ordre de 5 m ;
- Marnes de Pantin (toit entre les cotes 80 et 96) sur 4 à 5 m d'épaisseur ;
- Marnes d'Argenteuil (toit entre les cotes 76 et 91) sur une dizaine de mètres d'épaisseur ;
- Masses et Marnes du Gypse (toit entre les cotes 62 et 82) constituées de masses de gypse saccharoïde et d'inter-bancs marneux ;
- Marnes Infragypseuses ;
- Calcaire de St Ouen (toit entre les cotes 25 et 58) ;
- Sables de Beauchamp ;
- Marnes et Caillasses ;
- Calcaire Grossier.

Les résultats de la campagne G11 disponibles sur le site de la gare de Villejuif Louis Aragon et l'intergare avec la gare de Villejuif IGR montrent que la série stratigraphique est conforme aux prévisions, le toit du Calcaire Grossier ayant été atteint par au moins un sondage.

Gare de Vitry Centre : les méthodes constructives envisagées sont une méthode mixte (puits central en parois moulées et une partie en méthode souterraine traditionnelle). L'étude bibliographique prévoyait un radier dans le Calcaire de Saint-Ouen et une voûte dans les éboulis de pente ou les Masses et Marnes du gypse.

L'analyse des premiers sondages réalisés au droit de cette gare confirme cette configuration avec toutefois, par rapport aux prévisions, une remontée des toits des Masses et Marnes du Gypse et du Calcaire de Saint-Ouen dont l'épaisseur est également un peu plus importante qu'attendue (de l'ordre de 5 m supplémentaire). Les sables de Beauchamp ne présentent pas de variation d'épaisseur significative par rapport au profil en long prévisionnel et se retrouvent globalement à la cote attendue, de même que la formation des Marnes et Caillasses sous-jacente. La configuration reconnue pourrait s'avérer un peu plus favorable pour la réalisation des parties en méthode souterraine traditionnelle.

Dans l'intergare Vitry-Centre – Villejuif Louis Aragon, le profil remonte la série stratigraphique en traversant les Masses et Marnes du Gypse pour arriver dans les Marnes d'Argenteuil aux abords de la gare Villejuif Louis Aragon dans les Marnes d'Argenteuil. Un sondage carotté a mis en évidence une surépaisseur de colluvions importante par rapport aux prévisions de l'étude bibliographique. Les cartes des carrières ne mentionnent cependant pas l'existence de carrière à proximité immédiate du tracé dans cette zone. La surépaisseur de colluvions s'accompagne d'un approfondissement, de l'ordre de 6 m environ, des formations situées sous les Masses et Marnes du Gypse. La voûte du tunnel pourrait néanmoins rester au sein des Masses et Marnes du Gypse sans pénétrer dans les colluvions. Cette configuration devra toutefois être confirmée par de nouveaux sondages.

Gare de Villejuif Louis Aragon : Cette gare est prévue en méthode mixte (puits central en parois moulées et partie en méthode souterraine traditionnelle), d'après l'étude bibliographique le radier se trouve au niveau de l'interface Marnes d'Argenteuil – Masses et Marnes du gypse, avec pour la partie en méthode souterraine traditionnelle une voûte dans les Marnes de Pantin. Au niveau de la gare Villejuif Louis Aragon, les écarts constatés par rapport aux prévisions sur le toit des différentes

formations ne dépassent pas 2 à 3 m en positif ou en négatif sur l'ensemble de la série jusqu'au Calcaire Grossier, confirmant ainsi la coupe bibliographique. La position de la voûte et du radier sont sensiblement conformes vis-à-vis des formations positionnées à l'issue de l'étude documentaire (la voûte se situera dans les Marnes d'Argenteuil et le radier, dans les Masses et Marnes du Gypse).

Intergare Villejuif Louis Aragon – Villejuif IGR : on note une augmentation des écarts sur le toit des formations par rapport aux prévisions allant jusqu'à plus de 5 m lorsque l'on se rapproche de la gare de Villejuif IGR indiquant ainsi un décalage spatial dans la remontée des couches telle que prévue par l'étude bibliographique

Les premiers relevés piézométriques effectués à proximité de la gare de Villejuif IGR font état de niveaux de nappe compris entre 98,5 et 99 dans les Marnes de Pantin.

➤ **Singularités :**

Sur ce sous-tronçon, il faut noter les singularités suivantes :

Au nord-est du tracé : quelques exploitations souterraines de gypse sont présentes, impliquant des risques de dissolution et de fontis mais sont situées en dehors de la zone d'influence de l'ouvrage.

Cette singularité sera traitée conformément aux principes édictés au titre 3 du présent document.

Sous-tronçon Passage sous la plaine alluviale de la Seine

Ce sous-tronçon comprend les gares des Ardoines, le Vert de Maisons et Créteil L'Echat, les intergares correspondantes ainsi que le SMI de Vitry et son tunnel de raccordement.

➤ **Comparaison Série stratigraphique issue de l'analyse bibliographique – Premiers résultats de la campagne G11 :**

La série stratigraphique prévisionnelle à partir du TN (cote de 34 à 48) dans la plaine alluviale de la Seine, telle qu'elle ressort de l'analyse documentaire, est la suivante :

- Des remblais de comblement ;
- Alluvions Modernes, qui peuvent être localement absentes ;
- Alluvions Anciennes jusqu'à une profondeur moyenne de 11 à 12 m mais qui peut être localement plus importante ;
- Calcaire de St Ouen (toit entre les cotes 22 et 40) sur une épaisseur variable de 3 à 10 m environ ;
- Sables de Beauchamp (toit entre les cotes 10 et 37) sur une épaisseur de 2 à 4 m environ ;
- Marnes et Caillasses (toit entre les cotes 6 et 35) avec une épaisseur moyenne de l'ordre de 10 à 15 m
- Calcaire Grossier (toit entre les cotes -10 et 33) sur une épaisseur qui peut dépasser 25 m ;
- Yprésien sur lequel l'analyse documentaire n'a fourni des informations qu'en début de sous-tronçon et sur le site du SMI de Vitry. Sur la majeure partie du tracé, il est suffisamment profond pour ne pas concerner directement l'ouvrage.

- En pied de coteau coté Villejuif, les terrains en place sont recouverts d'une couche d'éboulis et de colluvions d'épaisseur variable. On notera également la possibilité de rencontrer localement les Marnes Infragypseuses.

Les résultats de la campagne G11 disponibles sur ce sous-tronçon portent essentiellement sur la portion de tracé comprise entre le passage sous la Seine et le site du SMI de Vitry en incluant la gare les Ardoines. Ces résultats montrent que la série stratigraphique est conforme aux prévisions, le toit du Calcaire Grossier ayant été reconnu par plusieurs sondages.

Intergare entre la Marne et la gare de Créteil L'Echat : d'après l'étude bibliographique le tunnel quitte progressivement l'Yprésien pour remonter la série jusqu'au Calcaire de St Ouen au niveau de la gare de Créteil L'Echat après avoir traversé le Calcaire Grossier, Les Marnes et Caillasses et les Sables de Beauchamp. Cette zone, qui voit la réapparition progressive des formations du Lutétien et du Bartonien inférieur, a été reconnue par 3 sondages G11 (un carotté et deux pressiomètres). Ces sondages permettent de préciser la position du toit de l'Yprésien, présent directement sous les Alluvions Anciennes en bord de Marne, et les épaisseurs des formations Lutétiennes. La base de ces formations étant plus basse que prévu, la longueur de tunnel à réaliser dans l'Yprésien devrait être plus faible que prévu initialement, ce qui est plutôt favorable.

Gare de Créteil L'Echat : cette gare est prévue en méthode à ciel ouvert, avec un radier situé dans les Marnes et Caillasses d'après l'étude bibliographique. Cette configuration est confirmée par les sondages G11 qui ont reconnu le toit des Marnes et Caillasses sensiblement à la cote prévue avec toutefois un pendage moins prononcé que prévu. Les écarts les plus importants par rapport aux prévisions portent sur le Calcaire de Saint Ouen qui, comme le laisse prévoir la carte géologique, n'est pas présent sur la totalité de l'emprise de la gare, et les Alluvions Anciennes qui ont été reconnues jusqu'à 12 m de profondeur environ. Les épaisseurs importantes (de 9 à 11 m environ) de remblais rencontrés sur les sondages pourraient indiquer que la gare est implantée au niveau d'anciennes exploitations à ciel ouvert (ballastières).

Intergare de Créteil L'Echat à Vert de Maisons : Au droit d'un des sondages, le toit des principales formations (Sables de Beauchamp, Marnes et Caillasses et Calcaire Grossier) est plus haut que prévu d'environ 4 à 5 m. Le Calcaire de Saint-Ouen est de faible épaisseur (de l'ordre de 1 à 2 m) avec une cote de toit conforme aux prévisions (25). L'épaisseur de formations superficielles (Remblais + Alluvions anciennes) est conforme aux prévisions avec, cependant, une épaisseur de remblai très importante (de l'ordre de 10 m) qui pourrait indiquer la présence d'une ballastière remblayée.

L'étude bibliographique prévoyait une insertion du tunnel dans les Sables de Beauchamp et les Marnes et Caillasses avec une incursion du radier dans le Calcaire Grossier, insertion également indiquée par un sondage mais qui reste à confirmer.

Gare de Vert de Maisons : Cette gare est prévue en méthode mixte (puits central, en paroi moulée et méthode souterraine traditionnelle), d'après l'étude bibliographique le radier se situe dans le Calcaire Grossier, et la voûte pour la partie en traditionnel dans les Marnes et Caillasses. Si les sondages réalisés au droit de cette gare confirment bien la position du toit du Calcaire de Saint-Ouen, l'épaisseur de celui-ci est en revanche plus importante que prévu, conduisant à un approfondissement du toit des différentes couches sous-jacentes. En particulier, le toit des Marnes et Caillasses a été rencontré de 2 à 6 m plus bas que prévu ce qui pourrait situer la voûte de la partie réalisée en traditionnel dans les Sables de Beauchamp. Le radier de la station, quant à lui, se situerait pour partie dans le Calcaire Grossier et pour partie dans les Marnes et Caillasses. Des investigations complémentaires devront préciser ces éléments.

SMI de Vitry et son tunnel de raccordement (y compris le tracé entre la Seine et la gare les Ardoines incluse) : Avec des valeurs comprises entre 22 et 25, la cote du toit du Calcaire de Saint Ouen est sensiblement conforme aux prévisions. Les écarts les plus importants sont observés au sud du SMI où les prévisions d'abaissement de ce toit ne sont pas confirmées. Pour les autres

formations (Sables de Beauchamp, Marnes et Caillasses et Calcaire Grossier), les écarts avec les prévisions sur leur cote de toit ne dépassent pas 2 à 3 m.

D'après l'étude bibliographique, le tunnel de raccordement s'insère sur un front mixte Calcaire de Saint-Ouen - Sables de Beauchamp puis remonte avec la clef dans les alluvions avant de déboucher sur la tranchée couverte puis ouverte, configurations confirmées par les sondages.

Gare des Ardoines : cette gare est prévue d'être réalisée en tranchée couverte. L'étude bibliographique prévoyait un radier dans les Sables de Beauchamp et un plafond à l'interface Alluvions anciennes/ Calcaire de Saint-Ouen, configuration confirmée par les sondages réalisés.

Intergare les Ardoines - Vitry-Centre : d'après l'étude bibliographique, le tunnel plonge depuis un front mixte St Ouen - Beauchamp jusqu'à une insertion complète dans le Calcaire Grossier pour remonter ensuite jusqu'à retrouver un front mixte Masse et Marnes du Gypse - St Ouen front de taille majoritairement dans les Marnes et Caillasses.

Les premiers relevés piézométriques effectués principalement entre la Seine et le site du SMI de Vitry font état de niveaux de nappe compris entre 29,8 et 30,8 dans les alluvions, entre 28,6 et 30,7 dans le Beauchamp et entre 29,5 et 30,2 dans le Lutétien, ces nappes ont été correctement identifiées dans les études préliminaires.

➤ **Singularités :**

Sur ce sous-tronçon, il faut noter les singularités suivantes :

- *Dans la traversée de Vitry* : d'anciennes carrières souterraines de gypse sont présentes au sud-ouest du tracé le long de la D5 (cartes IGC 32-64 à 32-66 et 33-66), carrières situées toutefois en dehors de la zone d'investigation.
- *Dans la vallée de la Seine* : de nombreux bâtiments sont susceptibles d'être fondés sur des pieux traversant les alluvions de faibles caractéristiques mécaniques. En bord de Seine, le tracé passe sous une structure de quai implantée en rivière et vraisemblablement fondée sur pieux.
- *Dans le secteur de Créteil* : présence de ballastières remblayées en matériaux mal compactés. Un des sondages réalisés dans cette zone a reconnu une épaisseur de remblais sur près de 10 m, qui pourrait correspondre au remblaiement d'une telle ballastière.

Ces singularités seront traitées conformément aux principes édictés au titre 3 du présent document.

Sous-tronçon : Passage sous la plaine alluviale de la Marne

Ce sous-tronçon comprend les gares de Saint-Maur-Créteil et de Champigny-centre ainsi que l'intergare correspondante.

➤ **Comparaison Série stratigraphique issue de l'analyse bibliographique – Premiers résultats de la campagne G11 :**

La série stratigraphique prévisionnelle à partir du terrain naturel (cote de 34 à 52) dans la plaine alluviale de la Marne, telle qu'elle ressort de l'analyse documentaire, est la suivante :

- Des remblais de comblement ;

- Les Alluvions Anciennes jusqu'à une profondeur moyenne de 7 à 8 m mais qui peut être localement plus importante ;
- Le Calcaire Grossier (toit entre les cotes 27 et 39) ;
- Les Sables Supérieurs (toit entre les cotes 18 et 29) ;
- Fausses Glaises ;
- Argile Plastique d'épaisseur variable avec des cotes de toit comprises entre 12 et 28 m environ ;
- Calcaire et Marnes de Meudon à partir d'une cote comprise entre -8 et 6 ;
- Craie à partir d'une cote comprise entre -16 et -6 ;
- Le Calcaire Grossier, dont le toit est situé nettement plus haut que sous la plaine alluviale de la Seine (cotes de 25 à 39 au lieu de 0 à 15 sous la Seine), est vraisemblablement fortement érodé et peut être absent localement. Des contacts Alluvions Anciennes/Sables Supérieurs, voire Alluvions Anciennes /Argiles Plastiques, sont constatés dans les sondages. De même, les Sables Supérieurs n'ont pas été reconnus partout.

Les résultats de la campagne G11 disponibles sur ce sous-tronçon portent essentiellement sur les sites des gares de Saint-Maur-Créteil et de Champigny-centre ainsi que partiellement sur l'intergare entre ces deux gares. Ces résultats montrent que la série stratigraphique est sensiblement conforme aux prévisions, la craie ayant été atteinte par plusieurs sondages. Les écarts stratigraphiques les plus notables portent sur la caractérisation de l'Yprésien et plus particulièrement des niveaux supérieurs (Sables Supérieurs, Fausses Glaises et Sables d'Auteuil) dont la continuité mérite vérification et qui sera investigué en campagne G12 (logs de Gamma-Ray).

Gare de Saint-Maur-Créteil : les écarts relevés par rapport aux prévisions concernant le toit du Marno-Calcaire de Meudon sont inférieurs au mètre, par contre son épaisseur est nettement plus faible que prévue (seulement de 2 à 5 m au lieu des 10 m prévus) ce qui conduit à un toit de la Craie plus haut d'environ 5 à 8 m (aux environs de la cote 0) que prévu. L'Yprésien est ici représenté par les Sables d'Auteuil surmontant l'Argile Plastique, le toit de la formation étant légèrement plus haut que prévu (de 2 à 3 m). Les sondages confirment l'absence locale du Calcaire Grossier comme le laissaient prévoir les résultats de l'analyse documentaire.

La réalisation de cette gare est mixte (puits central en parois moulées et une partie en méthode souterraine traditionnelle). Le fait que le toit de l'Yprésien soit plus haut qu'initialement prévu dans l'étude bibliographique est favorable à la méthode constructive envisagée. La voûte s'inscrit donc comme prévu dans l'Yprésien mais alors que, dans l'étude bibliographique, il était surtout prévu des alluvions anciennes (terrains non cohérents qui auraient nécessité des traitements importants), ces alluvions sont partiellement remplacées par de l'Yprésien sableux.

Gare de Champigny-centre : l'épaisseur de Remblais + Alluvions Anciennes reconnues par les sondages G11 serait plutôt plus faible que prévu d'environ 1 à 3 m, le Calcaire Grossier, avec une épaisseur qui atteint 10 m est plutôt plus épais que prévu. Les sondages réalisés sur le site de la gare ont permis de préciser la nature de l'Yprésien (Fausses Glaises puis Argile Plastique) et de reconnaître, pour l'un d'entre eux, le toit du Marno-Calcaire de Meudon, ce que l'analyse documentaire n'avait pas permis de faire.

La réalisation de cette gare est prévue en tranchée couverte. La position du Calcaire Grossier à la cote prévue par les sondages confirme les méthodes constructives envisagées.

Intergare de Saint-Maur-Créteil à Champigny-centre :

Les deux sondages disponibles sur cette intergare conduisent à des résultats cohérents avec ceux obtenus au droit des deux gares. Hormis pour le toit de l'Yprésien qui peut, localement, être

nettement plus bas que prévu (de 7 à 8 m) les écarts sur la position du toit des formations par rapport aux prévisions ne dépassent guère 2 à 3 m. Ces sondages confirment que le tunnel est situé majoritairement dans l'Yprésien avec une voûte qui peut pénétrer localement dans le Calcaire Grossier et dans le Calcaire et Marnes de Meudon pour le radier, confirmant l'étude bibliographique.

➤ **Singularités :**

Sur ce sous-tronçon, il faut noter les singularités suivantes :

- Sur Champigny, en début de sous-tronçon : le tracé passe sous un pont ferroviaire.
- Dans la traversée de Saint-Maur-des-Fossés : présence d'anciennes carrières à ciel ouvert de Calcaire Grossier (cartes IGC 43-56, 43-57 et 44-57). Aucun des sondages réalisés n'a détecté la présence de telles exploitations, mais tous sont implantés de leurs emprises connues. Le tunnel, qui transverse cette zone sous une couverture notable d'Yprésien, ne devrait toutefois pas être affecté leur présence.
- Sur Créteil, en fin de sous-tronçon : présence d'anciennes carrières, à ciel ouvert ou souterraines remblayées, de Calcaire Grossier (cartes IGC 39-60, 40-59 et 41-59) non reconnues par les sondages réalisés.

Ces singularités seront traitées conformément aux principes édictés au titre 3 du présent document.

Sous-tronçon : Noisy-Champs - vallée de la Marne

Ce sous-tronçon comprend les gares de Bry-Villiers-Champigny et de Noisy-Champs, avec l'intergare correspondante ainsi que le SMR de Champigny et son tunnel de raccordement.

➤ **Comparaison Série stratigraphique issue de l'analyse bibliographique – Premiers résultats de la campagne G11 :**

En début de sous-tronçon, sur le plateau de la Brie, la série stratigraphique prévisionnelle à partir du TN (cote 90 à 100), telle qu'elle ressort de l'analyse documentaire, est constituée par :

- des Remblais d'épaisseur variable ;
- des Limons des plateaux ;
- le Calcaire de Brie (toit aux environs de la cote 95), son épaisseur peut atteindre 4 à 5 m mais il peut être localement absent ;
- l'Argile Verte très plastique (toit entre les cotes 90 à 97) avec des épaisseurs variant de 5 à 10 m ;
- les Marnes de Pantin (toit entre les cotes 80 et 92) dont l'épaisseur peut être de l'ordre de 3 à 5 m ;
- les Marnes d'Argenteuil (toit entre les cotes 70 et 85) sur une dizaine de mètres d'épaisseur ;
- le Calcaire de Champigny (toit entre les cotes 60 et 75) avec une épaisseur pouvant varier de 10 à plus de 20 m ;
- les Sables Verts ;

- le Calcaire de St Ouen ;
- les Sables de Beauchamp ;
- les Marnes et Caillasses ;
- le Calcaire Grossier.

Sur la deuxième moitié de ce sous-tronçon, en bordure du plateau, les formations du début de la série (Calcaire de Brie, Argile Verte, Marnes de Pantin et d'Argenteuil, Calcaire de Champigny) disparaissent progressivement au fur et à mesure de l'abaissement du terrain naturel de la cote 100 à la cote 80 puis en dessous de la cote 60 en fin de sous-tronçon. A signaler, en partie basse du coteau, la possibilité d'une présence locale des Marnes Infragypseuses.

En base de coteaux, des éboulis peuvent recouvrir les formations en place.

Les résultats de la campagne G11 disponibles sur ce sous-tronçon portent essentiellement sur le site de la gare de Noisy-Champs. Ces résultats montrent que la série stratigraphique est conforme aux prévisions sachant qu'aucun des sondages réalisés n'est descendu plus bas que le Calcaire de Champigny.

En termes de cote du toit des formations, les écarts relevés par rapport aux prévisions sont de l'ordre du mètre pour le Calcaire de Champigny, de 2 m pour les Marnes d'Argenteuil, peuvent atteindre 3 à 4 m pour les Marnes de Pantin et un peu moins pour l'Argile Verte et le Calcaire de Brie. On notera que les écarts les plus importants sont observés en bord de coteau où les formations tendent à disparaître du fait de l'érosion.

La réalisation de la gare Bry-Villiers-Champigny est prévue en tranchée couverte, la phase bibliographique prévoyait un radier dans le Calcaire de Champigny, ce que confirment les premiers sondages réalisés.

Sur l'intergare « Bry-Villiers Champigny » - « Champigny », dans l'étude bibliographique le tunnel redescend la série depuis le Calcaire de Champigny jusqu'à l'Yprésien (ce que confirment les premiers sondages réalisés) en passant par le Calcaire de St Ouen, les Sables de Beauchamp, les Marnes et Caillasses et le Calcaire Grossier.

La réalisation de la gare et arrière gare de Noisy-Champs est prévue en tranchée ouverte. La phase bibliographique prévoyait un radier dans les Marnes de Pantin au niveau de la gare proprement dite et pouvant descendre dans les Marnes d'Argenteuil en extrémité d'avant et d'arrière-gare où la base des parois moulées est susceptible d'atteindre le Calcaire de Champigny. Les sondages réalisés confirment ces dispositions. Les écarts en termes d'épaisseur des couches influenceront uniquement sur la longueur de la fiche de la paroi moulée. Sur l'intergare Noisy-Champs – Bry-Villiers-Champigny, la phase bibliographique prévoyait une insertion du tunnel majoritairement dans les Marnes d'Argenteuil. Au niveau de l'ouvrage de débranchement vers le SMR de Champigny, le tunnel s'approfondit pour pénétrer dans le Calcaire de Champigny puis le Calcaire de St Ouen avant de remonter dans le Calcaire de Champigny au niveau de la gare Bry-Villiers-Champigny.

➤ **Singularités :**

Sur ce sous-tronçon, il convient de noter, au voisinage de la gare de Champigny-Centre, la présence d'exploitations souterraines du Calcaire de Champigny, répertoriée sur les cartes de l'IGC.

Cette singularité sera traitée conformément aux principes édictés au titre 3 du présent document.

2.3.3 Synthèse des enseignements de la campagne G11

La campagne de reconnaissance G11 a permis de largement confirmer, dans son ensemble, le premier modèle géologique réalisé à partir de l'enquête documentaire, les terrains reconnus étant sensiblement ceux qui étaient prévus et aux niveaux prévus. Il convient toutefois de souligner les points suivants :

- L'épaisseur des éboulis de pente sur et en base de coteaux (vallée de la Bièvre, sous le Fort d'Issy...) est plus importante que prévu.
- Dans les secteurs d'Arcueil-Cachan, Bagneux, Montrouge, Malakoff ainsi qu'au droit de la gare de Clamart, les anciennes carrières de Calcaire Grossier (parfois jusqu'à 28/29 m de profondeur) sont d'ampleur plus importante (étendue et profondeur) que dans l'enquête documentaire.
- A la gare de Villejuif IGR, les formations géologiques sont décalées d'une dizaine de mètres vers le bas par rapport à ce à quoi l'on pouvait s'attendre (dans ce secteur, l'étude documentaire s'appuyait essentiellement sur des forages destructifs dont les interprétations sont bien moins précises que celles des sondages carottés réalisés en G11). Il faut également noter, sur le plateau de Villejuif IGR, l'importance en extension et en profondeur des exploitations à ciel ouvert de Sables de Fontainebleau.
- Le tracé sur lequel l'implantation des sondages de la campagne G11 a été réalisée pouvant être localement différent de celui utilisé pour l'établissement du premier modèle géologique lors de la phase documentaire, en particulier au niveau de la traversée de Saint-Maur-des-Fossés, il est normal d'observer dans ces zones des écarts parfois plurimétriques entre les résultats des sondages et les prévisions.

Au vu des résultats disponibles, on n'observe donc pas de modifications importantes dans la nature des formations concernées par les infrastructures par rapport aux prévisions des études préliminaires. Les écarts les plus significatifs ne se rencontrent que dans certaines intergares, mais la méthode mécanisée qu'est le tunnelier est très peu sensible à ces écarts de géologie.

Les méthodes constructives prévues dans les études préliminaires, basées sur l'étude bibliographique, ne sont pas remises en cause par les sondages réalisés, qui confirment globalement la coupe géologique initiale. Des adaptations mineures pourront être envisagées, mais il n'y a pas de modification importante en phase travaux à prévoir, aussi bien en termes de choix de méthodes constructives que d'incidence sur les nappes.

Le suivi des piézomètres, mensuel, est en cours, permettant d'analyser le battement annuel des nappes afin de comprendre le système hydrogéologique, et ainsi mettre en place des modélisations hydrogéologiques détaillées permettant de montrer le réel impact de l'infrastructure sur ces dernières.

3. Principaux enjeux géologiques, hydrogéologiques et géotechniques du projet

Le projet de réalisation du tronçon Pont de Sèvres – Noisy-Champs de la ligne rouge du réseau Grand Paris Express s'insère en souterrain ; il traverse des nappes d'eaux souterraines et des couches géologiques aux caractéristiques très diverses.

Des études préliminaires et des sondages entrepris dans ce cadre, il ressort que les principaux enjeux géologiques, hydrogéologiques et géotechniques du projet en termes d'impact sur l'environnement sont les suivants :

- prendre en compte les **cavités d'origine anthropique** (résultant des activités humaines) que sont les anciennes carrières. Le projet passe sous plusieurs anciennes carrières souterraines et à ciel ouvert. Cet enjeu représente l'une des priorités auxquelles les études de conception se sont attachées à répondre, du fait de la forte concentration de carrières dans le périmètre du projet, sur la partie ouest principalement.
- éviter au maximum tout impact sur les **nappes d'eaux souterraines**, que ce soit en termes de pollution des eaux, de modification du niveau des nappes ou de modification de la circulation des eaux. Les dispositions constructives retenues dès les premières études de conception du projet permettent d'éviter des impacts significatifs sur les nappes.
- identifier et prendre en compte les zones marquées par la présence de **sols évolutifs (horizons contenant du gypse)**, dans lesquels des phénomènes de dissolution peuvent avoir lieu. Cet enjeu est très localisé à l'échelle du projet. Il est pris en compte dans les études de conception.
- prendre en compte la **présence d'argile** sur le tracé du projet et par conséquent un phénomène éventuel de retrait ou de gonflement des argiles. Cet enjeu se révèle toutefois assez mineur et très localisé à l'échelle du projet.

3.1 Enjeux particuliers liés à la présence d'anciennes carrières

3.1.1 Description

- Quels sont les types de carrières rencontrés ?

Le secteur sud de Paris a été largement exploité pour la construction de Paris jusqu'au XIX^{ème} siècle, essentiellement à partir de carrières souterraines. On rencontre actuellement d'anciennes carrières qui ont servi à l'extraction de matières premières variées :

- pierre à bâtir : calcaire grossier en particulier,
- plâtre : gypse,
- ciment, chaux : marnes, craies,
- industrie : sables...

Les carrières à proximité du projet se divisent en deux principales familles :

- les **carrières à ciel ouvert**, remblayées après leur exploitation par du tout-venant,
- les **carrières souterraines** avec plusieurs techniques de confortement possibles (cf. figure 1) :
 - ✓ piliers à bras (poteaux montés pour soutenir le ciel de carrière),
 - ✓ par hagues et bourrages : réalisation de murs de pierres sèches (hagues) retenant les déchets non utilisés de l'exploitation de la carrière (bourrages).

Ces confortements quels qu'ils soient, et quelle qu'en soit la qualité de réalisation, laissent des vides.

Du fait de l'évolution de certaines carrières, certaines ont fait récemment l'objet de comblements notamment par injection.

- Quels sont les enjeux d'un projet de type métro souterrain liés à la présence de carrières ?

Dès la fin de leur exploitation, ces carrières ont été le siège de mouvements verticaux pouvant entraîner des cloches de décompressions dans les terrains sus-jacents, voire dans le cas extrême la formation de fontis (effondrement remontant en surface).

La présence de carrières fait l'objet de Plan de Prévention des Risques à l'échelle de l'Ile-de-France. Cela signifie que le risque est avéré dans certains secteurs, mais également qu'il est bien identifié et connu.

Les carrières à ciel ouvert sont souvent remblayées par des matériaux de mauvaise qualité et présentent donc l'inconvénient de constituer des terrains médiocres, sous-consolidés pour la réalisation d'un projet de type métro souterrain. D'une part, la traversée de ces terrains meubles peut perturber le bon avancement du tunnelier. D'autre part, le passage du tunnelier dans des terrains sous-consolidés peut engendrer des tassements en surface difficilement compatibles avec le bâti de surface. L'enjeu est donc d'autant plus fort en présence de bâtis denses ou d'ouvrages particuliers.

Les anciennes carrières souterraines constituent des ouvrages fragiles. Le passage du tunnelier ou la réalisation de travaux à proximité de ces dernières, et donc la modification du milieu en termes de contraintes dans le sol notamment, peut engendrer la remise en cause de l'équilibre précaire des carrières. Les instabilités susceptibles d'apparaître se situent principalement en ciel de

carrière (toit de la carrière) pouvant aller jusqu'à des effondrements progressifs de la voûte, voire à des fontis remontant en surface.

Ainsi, la réalisation d'un projet de type métro souterrain à proximité d'anciennes carrières souterraines est susceptible de créer des désordres sur ces dernières : engendrant ainsi des décompressions dans le sol et donc des tassements pouvant remonter en surface et impacter le bâti, les réseaux et les infrastructures situés à l'aplomb des zones concernées.

Il est important de souligner que le risque lié aux carrières sur un chantier de type métro provient essentiellement de carrières qui n'auraient pas été identifiées préalablement au chantier. Il est donc primordial de connaître parfaitement leur localisation, leur étendue et leur état.

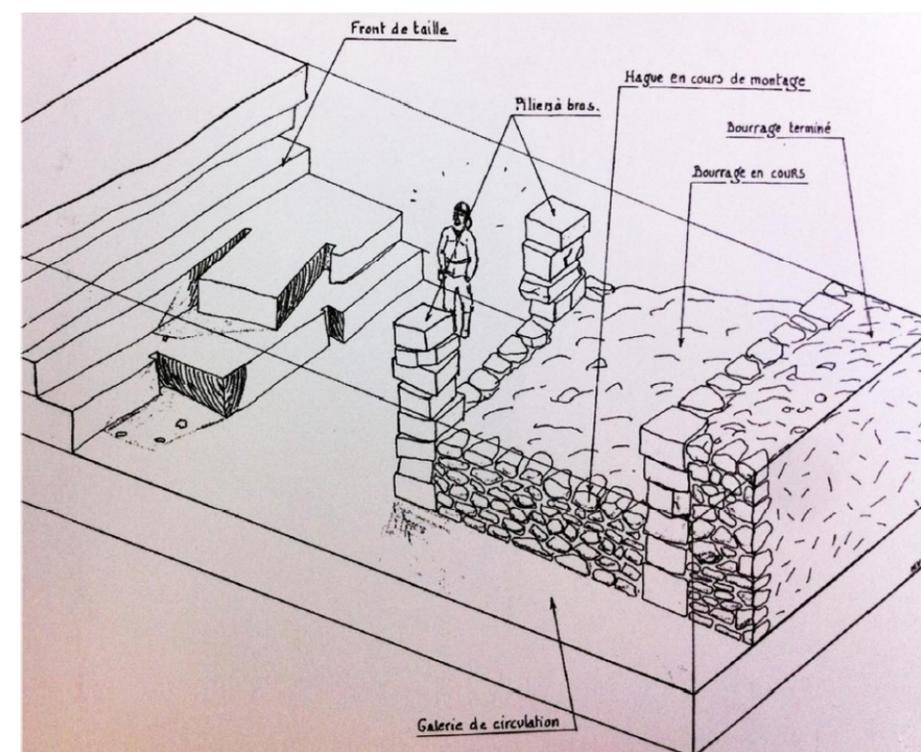


Figure 1 : Ecorché d'une carrière de type hagues et bourrages (figure extraite de « Les souterrains de Paris », édition Nord Patrimoine)



Figure 2 : Ancienne carrière souterraine dans l'ouest parisien

3.1.2 Prise en compte des enjeux dès la conception

Le meilleur moyen de supprimer les risques liés à la présence de carrières est de les contourner ou de s'en éloigner au maximum. La Société du Grand Paris a appliqué ce principe sur l'ensemble du tracé lorsque cela était compatible avec les objectifs de desserte du projet.

De façon générale, le tracé en plan du projet cherche autant que possible à éviter la traversée de zones de carrières en s'en éloignant au maximum (démarche identique pour les carrières souterraines et les carrières à ciel ouvert).

Lorsque la zone de carrière n'a pu être évitée :

- Pour les carrières à ciel ouvert remblayées, le profil en long du tunnel est adapté afin que l'épaisseur de terrain au-dessus de la voûte du tunnel soit suffisante pour que les tassements soient non significatifs pour le bâti sus-jacent. En cas de remblaiement très médiocre de la carrière à ciel ouvert, des traitements de terrains peuvent être mis en place. Les études à venir permettront d'identifier et de caractériser ces remblais afin d'adapter au mieux le passage du tunnelier dans ces zones.
- Pour les carrières souterraines, le profil en long du tunnel est ajusté afin de le faire passer en dessous. En effet, il est d'une part très difficile de passer au travers d'une carrière souterraine, du fait de son équilibre précaire, du manque d'homogénéité des terrains traversés et de leur mauvaise qualité. D'autre part, l'épaisseur de terrain n'est pas suffisante pour faire passer le tunnel au-dessus de la zone de carrières souterraines (notamment dans la partie ouest).

La distance entre la voûte du tunnel et le plancher des carrières est ajustée selon la nature du terrain, afin de conserver une épaisseur suffisante de « bon » terrain au-dessus du tunnel. Les hypothèses prises en compte en études préliminaires seront à confirmer dans les études à venir qui permettront d'affiner l'identification et la caractérisation des terrains situés en dessous des carrières afin de définir la bonne distance à retenir entre la voûte et la base de carrière.

Si la carrière s'avérait en trop mauvais état ou si la distance entre la voûte et la base de la carrière était trop faible, des traitements pourront être mis en place, afin que la stabilité

d'ensemble du massif soit préservée. Les études et les investigations à venir permettront d'identifier ces zones.

3.1.3 Localisation des zones d'incidence potentielle

L'analyse de l'ensemble des cartes de carrières éditées par l'Inspection Générale des Carrières de la zone a permis d'identifier la présence des carrières suivantes dans le fuseau du projet de métro :

Carrières à ciel ouvert (remblayées)

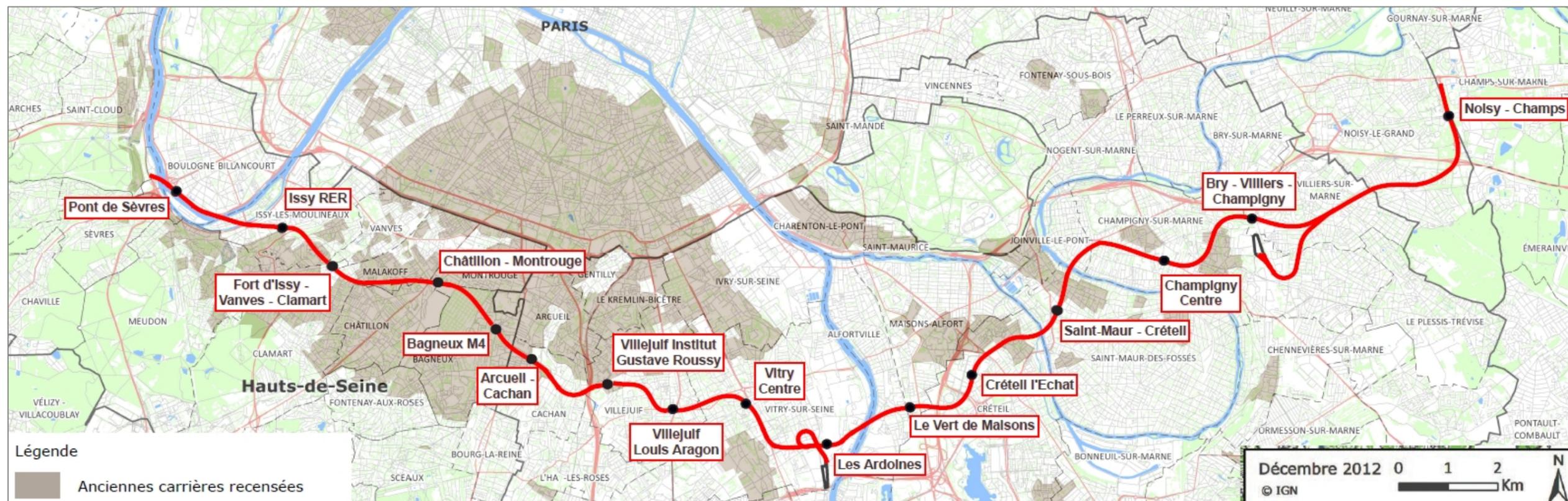
- A Villejuif, dans le parc entre la voie des sables et la rue Edouard Vaillant se trouve une ancienne exploitation à ciel ouvert des Sables de Fontainebleau.
- A Vitry, une ancienne sablière (exploitation à ciel ouvert des alluvions) se trouve au droit de l'îlot d'habitation formé par la rue A. Rondenay, la rue Balzac et la rue du Général Malleret.
- A Créteil, depuis l'autoroute A86 jusqu'à la gare de Créteil L'Echat, de nombreuses sablières sont présentes. Le projet longe également une ancienne carrière à ciel ouvert de Calcaire Grossier Supérieur au niveau de l'intersection entre la rue Joséphine et l'avenue de Laferrière. A proximité de l'intersection entre l'avenue de Laferrière et la rue Chéret, le projet traverse une ancienne sablière qui est remblayée sur une épaisseur de l'ordre de sept mètres.
- A Saint-Maur-des-Fossés, d'anciennes sablières se trouvent le long du tracé vers l'abbaye de Saint-Maur-des-Fossés, autour des avenues Godefroy Cavaignac et Mahieu.
- A Champigny-sur-Marne, le long de la rue Guy Môquet, entre la rue Alexandre Fourny et la rue de la Côte d'Or, se trouvent d'anciennes carrières à ciel ouvert de calcaire de Champigny ainsi que des sablières.

Carrières souterraines

- D'anciennes carrières se trouvent de la gare d'Issy RER à Arcueil-Cachan, soit environ sur 4,5 km (communes de Cachan, Arcueil, Bagneux, Montrouge, Châtillon, Malakoff, Vanves, Issy-les-Moulineaux), avec jusqu'à trois niveaux de carrières (par exemple au niveau de la gare de Châtillon-Montrouge).
- A Vitry, une carrière de gypse se trouve à environ 150 mètres du projet, au droit de l'avenue Rabelais et de la rue Pierre et Marie Curie.
- A Créteil, à l'intersection de l'avenue de Laferrière et de la rue du Castel se trouve une ancienne carrière de Calcaire Grossier Moyen et Supérieur (la toponymie des rues adjacentes confirme bien la présence de carrières : rue du cliquart, du nom donné au calcaire grossier utilisé comme pierre à bâtir). Le mode d'exploitation de cette carrière souterraine est par hagues et bourrages. La limite d'exploitation n'est pas véritablement connue. Cette carrière est située à 15m de profondeur.
- A Saint-Maur-des-Fossés, se trouve une ancienne carrière partiellement remblayée au Nord de l'avenue Marinville et à l'ouest de l'avenue Godefroy Cavaignac. L'épaisseur de remblai est de l'ordre de dix mètres.

Les carrières souterraines identifiées sont situées selon les cas :

- au-dessus du tunnel du métro, à une distance de 5 à 20 mètres de la voûte du tunnel,
- à côté du tunnel du métro,
- à l'emplacement des futures gares de Fort d'Issy – Vanves - Clamart, Châtillon - Montrouge, Bagneux et Arcueil – Cachan.



La carte ci-dessus localise les principales zones de carrières rencontrées sur le tracé du projet.

Le tunnel évite systématiquement le passage au-dessus d'une carrière souterraine (couverture insuffisante) ou la traversée d'une carrière souterraine.

Les risques de tassements et de désordres sur le bâti, les réseaux et les infrastructures existent pour l'ensemble des secteurs concernés par les carrières recensées. Le projet prévoit donc la mise en œuvre de différentes mesures, décrites au titre suivant.

3.1.4 Mesures mises en œuvre et coûts

Les mesures à mettre en œuvre pour supprimer le risque de désordre sur les bâtis et les ouvrages souterrains dans la zone d'influence du projet et des carrières sont les suivantes:

En phase études :

- Investigations des anciennes carrières avant le chantier (bibliographie, visites, inspections, sondages, essais, mesures in situ) afin de reconnaître leurs limites, leurs épaisseurs, la nature des remblais de comblement et de définir l'état de la carrière. Ces investigations ont pour objet de caractériser le massif et ainsi définir les zones et les volumes à traiter, ainsi que le type de traitement à mettre en place.

L'ensemble des zones répertoriées ci-dessus a déjà fait l'objet d'études et de reconnaissances, ainsi que de réunions de mise au point entre le maître d'ouvrage et l'Inspection Générale des Carrières en phase d'études préliminaires. Ces reconnaissances vont se poursuivre, les résultats obtenus seront intégrés aux études à venir et permettront ainsi de définir avec précision :

- les zones à traiter, tant en termes de surface que de volume au cas par cas,
- les techniques de comblement et/ou de confortement à mettre en œuvre,

L'Inspection Générale des Carrières sera à nouveau sollicitée lors des études à venir.

En phase travaux, pour les zones où les études ont montré la nécessité d'un traitement de carrières :

- Pour la section courante se situant en zone de carrières : des injections ou comblements des carrières (à ciel ouvert ou souterraines) nécessitant un confortement pourront être mis en

place. Plusieurs techniques sont possibles ; le traitement retenu dépendra de différents paramètres dont la distance entre le plancher de la carrière et la voûte du tunnel, le mode de stabilisation pré-existant de la carrière, l'état de la carrière, la densité du bâti en surface, la nature des terrains, etc... Deux grandes techniques existent :

- injection depuis la surface grâce à des forages afin de combler les carrières avant la réalisation du tunnel (cf. figure 4);
 - comblement à pied d'œuvre : réalisation du comblement depuis les galeries des carrières, mise en place de murs masques (cf. figure 3) et remplissage par mortier à l'arrière.
- Dans le cas de carrières situées à proximité ou dans l'emprise d'une fouille (tranchée, gare, puits...) et présentant des extensions sous des parcelles mitoyennes : ce cas se présente uniquement pour les gares de Fort d'Issy-Vanves-Clamart, Châtillon - Montrouge, Bagneux et Arcueil - Cachan. Les études à venir détermineront l'extension du périmètre à traiter, ainsi que, comme pour la section courante, le volume et le type de traitement à mettre en place.

Le coût des mesures qu'il pourra ainsi être nécessaire de mettre en œuvre en phase travaux est d'ores et déjà provisionné au projet Pont de Sèvres - Noisy-Champs. Il représente un budget d'environ 20 millions d'euros.

3.1.5 Méthodes de suivi des effets des mesures

Afin de vérifier l'efficacité du renforcement des carrières, des sondages de contrôle des traitements des carrières seront réalisés.

Par ailleurs, une méthode observationnelle sera mise en place. Elle se décompose en deux phases :

- *Etude de vulnérabilité du bâti* : elle consiste à inventorier et catégoriser le bâti, définir son état initial ainsi que les valeurs seuils de déplacements acceptables pour ce dernier. Cette étude permettra de confirmer les méthodes constructives à retenir. Elle interviendra en accompagnement des phases d'études d'avant-projet et de projet.
- *Mise en place de l'auscultation de surface* : cette auscultation dans les zones reconnues comme sensibles aux tassements sera mise en place en amont de la phase de chantier (environ une année avant le début des travaux de génie civil), afin de mesurer la respiration naturelle du bâti et des ouvrages, et sera maintenue en phase travaux. Les déplacements enregistrés seront alors comparés aux estimations des phases études (estimations faites par un logiciel de modélisation aux éléments finis). Dans le cas de dépassement des valeurs seuils, les méthodes constructives seront immédiatement adaptées.



Figure 3 : Mise en place d'un mur masque dans une ancienne carrière souterraine avant injection de la carrière

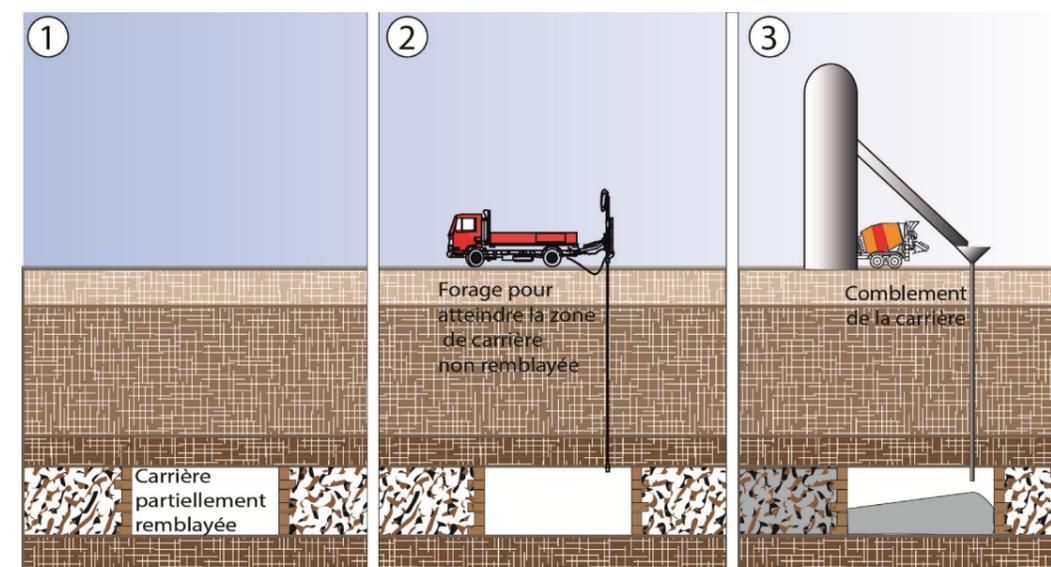


Figure 4 : Principe d'injection d'une ancienne carrière souterraine

3.2 Nappes et circulations souterraines

3.2.1 Description du milieu et des phénomènes associés

- *Qu'est-ce qu'une nappe souterraine ?*

Une nappe d'eau souterraine est une eau contenue entre les grains d'un sol ou dans les fissures d'une roche, que l'on nomme aquifère.

Aujourd'hui, les eaux souterraines du territoire français sont cartographiées et leurs états quantitatif et qualitatif sont surveillés. La connaissance hydrogéologique, en particulier la connaissance piézométrique (du niveau des nappes), permet donc une analyse générale des interférences entre le projet et les nappes. Les campagnes de reconnaissance du maître d'ouvrage, permettent de disposer d'une connaissance beaucoup plus précise et actualisée de la piézométrie, dans les territoires traversés par le projet.

- *Quels pourraient être les impacts d'un projet de type métro souterrain sur les nappes et circulations souterraines ?*

La réalisation d'un projet de type métro souterrain est susceptible de générer différents phénomènes en cas de traversée de nappe(s) :

- modification du niveau de la (des) nappe(s),
- modification des écoulements : « effet barrage »,
- pollution d'une nappe par mise en communication, du fait de la réalisation de l'infrastructure, avec une nappe polluée.



Figure 5 : Nappe d'eau souterraine affleurant lors de travaux de terrassement

Qu'est-ce qu'un effet barrage ?

Lorsqu'un ouvrage souterrain crée un obstacle à l'écoulement naturel d'une nappe d'eau souterraine, un « effet barrage » se produit.

L'effet barrage se traduit potentiellement par une montée des eaux en amont de l'ouvrage et par une baisse du niveau des eaux en aval de l'ouvrage.

L'effet barrage est d'autant plus fort que :

- l'ouvrage représente une hauteur non négligeable par rapport à l'épaisseur de l'aquifère (pourcentage d'occultation de la nappe) ;
- la grande dimension de l'ouvrage est perpendiculaire au sens d'écoulement de la nappe.

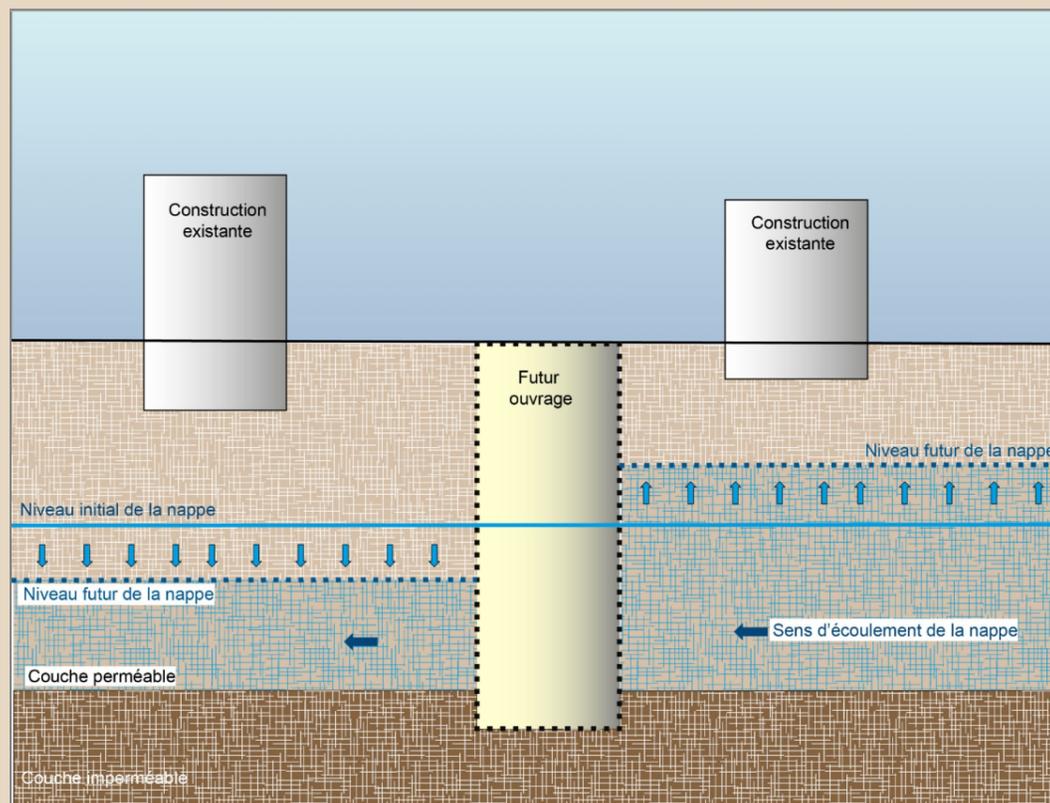


Figure 6 : Principe de l'effet barrage

- Dans le cadre d'un projet de type métro souterrain, quels pourraient être les impacts de la modification du régime d'écoulement des eaux souterraines sur l'environnement ?

Une modification du régime d'écoulement des eaux souterraines, quelle qu'en soit l'origine, pourrait avoir un certain nombre d'incidences potentielles sur l'environnement :

- **Tassements** : l'abaissement du niveau de la nappe peut générer des déformations de terrain en surface.
- **Ennoisement des structures enterrées** : la hausse du niveau de la nappe peut provoquer des ennoisements dans les sous-sols de bâti existant.
- Une modification des écoulements et de la teneur en eau des sols peut favoriser différents phénomènes naturels tels que la **dissolution du gypse** (cf. titre 3.3) ou le **retrait/gonflement des argiles** (cf. titre 3.4).
- **Modification des usages anthropiques** : l'abaissement du niveau de la nappe risque notamment de dénoyer (mettre hors d'eau) les pompes existantes (captage d'eau potable, géothermie, etc.).

- *Le projet Pont de Sèvres – Noisy-Champs de la ligne rouge du Grand Paris Express rencontre-t-il des nappes souterraines ?*

Globalement, l'analyse hydrogéologique montre que le sous-sol traversé par le projet peut être divisé en cinq grandes zones hydrogéologiques différentes (cf. carte P1.T0.V.1-7-1 de l'atlas cartographique associé à l'étude « tronçon » de la pièce G – Etude d'impact) :

- la craie et les alluvions : partie ouest de la ligne entre Ile de Monsieur / Pont de Sèvres et Issy RER ;
- la nappe de l'Eocène inférieur et moyen, principalement composée du Calcaire Grossier à cet endroit : section comprise entre Issy RER et Arcueil - Cachan ;
- la nappe de l'Eocène supérieur, composée du Marno calcaire de Saint-Ouen et des Sables de Beauchamp : section comprise entre Arcueil-Cachan et Vitry Centre ;
- de nouveau, la nappe de l'Eocène inférieur et moyen, dans le Calcaire Grossier et les Marnes et Caillasses entre Vitry Centre et Créteil L'Echat, et dans sa composante la moins aquifère – le tunnel est situé en grande partie dans l'Argile Plastique qui en constitue le mur – entre Créteil L'Echat et Champigny Centre ;
- la partie est du projet, comprise entre Champigny Centre et Noisy-Champs, est globalement hors d'eau et se trouve sous le plateau de Brie.

Ces cinq domaines hydrogéologiques ont leurs caractéristiques et leur fonctionnement propres, quoique non indépendants les uns des autres.

Le projet de métro Pont de Sèvres – Noisy-Champs est en interaction avec une nappe souterraine sur environ 90% de sa longueur.

Pour cette raison, les risques d'impact sur l'environnement liés à la traversée d'eaux souterraines ont été pris en compte dès la conception du projet de métro.

Toutefois, à l'échelle du projet de tronçon, il n'a pas été réalisé de modélisation hydrogéologique pour les raisons suivantes :

- L'hétérogénéité hydrogéologique et la présence d'aquifères fonctionnant de façons très différentes rendent une modélisation générale à l'échelle du tronçon non adaptée. La réalisation d'un tel modèle nécessiterait la prise en compte de multiples hypothèses qui rendraient les résultats incertains.
- Les données disponibles sur les aquifères (géométrie, paramètres hydrodynamiques) le sont à grande échelle.
- Les résultats d'une modélisation sont, au mieux, du même niveau de précision et d'incertitude que les données d'entrée. Certaines étapes de la modélisation conduisent à augmenter l'incertitude concernant les résultats.

En conséquence, dans les conditions présentes, une modélisation à l'échelle de l'une des zones hydrogéologiques mentionnées ci-avant n'apporterait pas beaucoup plus de précision que l'analyse qui a été faite au niveau de chaque gare.

3.2.2 Prise en compte des enjeux dès la conception

Du fait du nombre important de nappes souterraines présentes dans le bassin parisien, le projet cherche autant que possible à limiter les incidences potentielles liées à la présence de nappe.

Deux sections de tracé seront réalisées hors nappe :

- La première se situe aux abords de la gare de Bry – Villiers – Champigny,
- La seconde se situe à l'extrémité est du projet, sur les communes de Villiers-sur-Marne et de Noisy-le-Grand, incluant le terminus de Noisy – Champs.

Dans ces deux sections, le tunnel et ses ouvrages associés surplombent la nappe du calcaire de Champigny.

Pour le reste du tracé, qui se situe dans la nappe, la conception du projet a privilégié des méthodes constructives adaptées permettant de limiter au strict minimum les pompages et donc les mouvements de nappes.

Le projet prévoit :

- Pour la partie courante, une réalisation du tunnel au tunnelier : cette technique permet de créer une paroi étanche à l'avancement de l'excavation, de sorte qu'aucun pompage n'est nécessaire.
- Pour les gares, tranchées et ouvrages annexes, la méthode constructive retenue est la réalisation d'une enceinte « étanche » en parois moulées, couplée si nécessaire à la réalisation d'un bouchon étanche en fond de fouille : aucun pompage n'est donc nécessaire, seul le volume d'eau situé dans la fouille et les eaux d'infiltrations résiduelles sont à extraire.

Qu'est-ce qu'un rabattement de nappe et pourquoi la Société du Grand Paris a-t-elle écarté cette méthode pour réaliser les gares ?

Le rabattement de nappe consiste à abaisser, durablement ou temporairement, le niveau d'une nappe d'eau souterraine.

Cette technique peut être utilisée pour réaliser des travaux de génie civil hors d'eau (gares ou ouvrages annexes par exemple).

Un rabattement de nappe peut se faire par l'intermédiaire de puits de pompage répartis à l'aplomb de la zone concernée, comme schématisé ci-dessous.

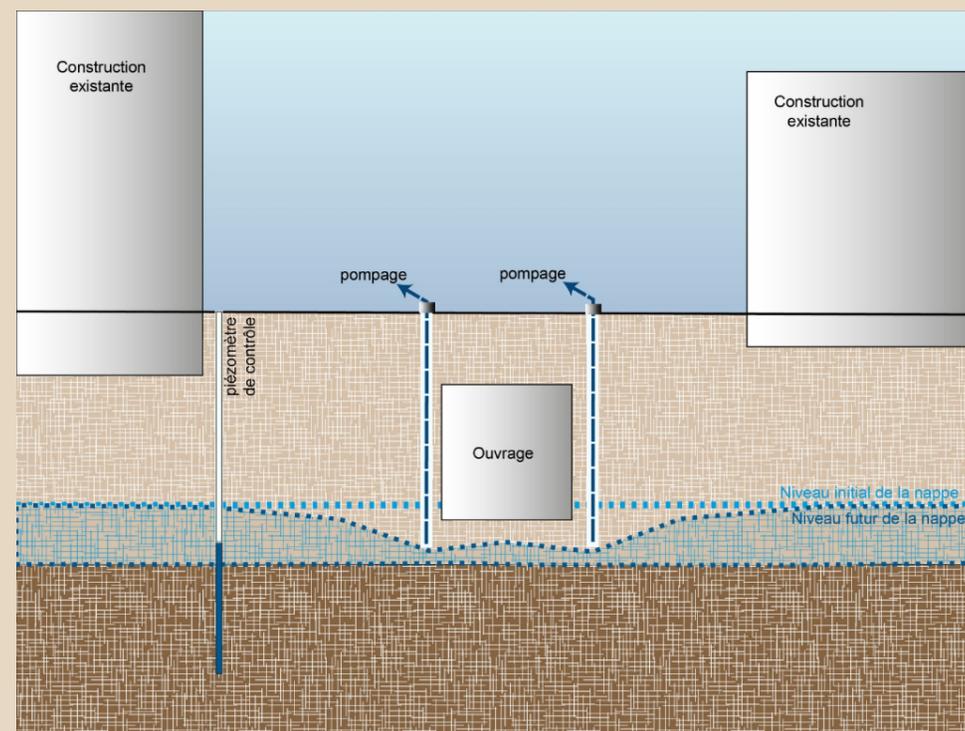


Figure 7 : Rabattement de nappe

Cette technique peut avoir des effets importants sur les eaux souterraines : modification du niveau de la nappe, modification des écoulements, pompage (et donc rejet) de gros volumes d'eau éventuellement polluée. En conséquence, **la Société du Grand Paris n'a pas retenu la technique du rabattement de nappe pour la réalisation des gares et des ouvrages annexes du projet de métro, afin de préserver l'environnement.**

Pour mettre hors d'eau les sites des futures gares et des futurs ouvrages annexes, **la Société du Grand Paris a privilégié la technique des parois moulées étanches**, associée à la réalisation d'un bouchon étanche selon la nature des sous-sols d'ancrage des parois moulées.

Ces dispositions constructives permettent de diminuer au maximum le pompage d'eaux souterraines, le volume de pompage étant limité au volume de l'ouvrage situé sous la nappe (avec un débit résiduel à prendre en compte).

Dans les zones d'eaux souterraines polluées, l'eau pompée devra faire l'objet d'un traitement avant d'être rejetée dans le réseau d'assainissement.

3.2.3 Localisation des zones d'incidence potentielle

• Le tunnel foré

Modification du niveau de la / des nappe(s)

Le tunnel n'impacte pas le niveau des eaux souterraines. En effet, la technique du tunnelier permet d'éviter tout rabattement de nappe en créant une paroi étanche à l'avancement de l'excavation.

Effet barrage

L'effet barrage induit par la réalisation du tunnel est peu significatif sur la majorité du tracé, comme cela est expliqué et visualisé sur les représentations graphiques de l'atlas cartographique (cf. point 3.1.6.2 de la pièce G rapport 2/3 incidences et mesures de réduction et de compensation).

Seule l'extrémité ouest du tunnel, entre l'arrière-gare de Pont de Sèvres et la gare d'Issy RER, est susceptible de modifier l'écoulement de la nappe en créant un potentiel effet barrage : le projet s'insère dans la nappe sur une longueur de 2,7 km environ, selon un axe perpendiculaire au sens d'écoulement de la nappe et le tunnel représente une hauteur non négligeable par rapport à celle de la nappe. Des études spécifiques à cette zone seront réalisées afin d'établir par modèle hydrogéologique le réel impact d'un ouvrage souterrain dans cette zone.

Mise en communication des nappes

La mise sous pression de la chambre d'abattage en tête de tunnelier permet d'éviter les arrivées d'eau à l'intérieur de l'ouvrage.

Par ailleurs, lors du creusement au tunnelier, le vide situé entre le terrain et les voussoirs tout autour de la paroi du tunnel (vide annulaire) est immédiatement injecté par un mortier de bourrage sous pression.

La technologie utilisée de foration au tunnelier limite donc le risque de communication entre nappes.

- **Les tranchées, les gares et les ouvrages annexes**

Modification du niveau de la / des nappe(s)

Plusieurs techniques de réalisation ont été retenues, prenant en compte la présence d'une ou plusieurs nappes.

La *première technique* consiste à réaliser les gares, tranchées et ouvrages annexes à ciel ouvert à l'abri d'une enceinte en parois moulées. Il s'agit des gares Pont de Sèvres, Issy RER, Fort d'Issy-Vanves-Clamart, Châtillon-Montrouge, Bagneux, Villejuif IGR, Les Ardoines, Créteil L'Echat et Champigny Centre, ainsi que Bry-Villiers-Champigny et Noisy-Champs, ces deux dernières gares étant toutefois situées hors nappe.

Cette disposition constructive permet en particulier de s'affranchir des venues d'eau horizontales, en créant un écran de protection imperméable, autour de la zone de terrassement.

Afin de limiter les venues d'eau verticales par le fond de fouille, deux configurations sont possibles :

- Les parois de l'ouvrage sont ancrées dans une couche de sol peu perméable. L'enceinte de la gare est alors quasiment imperméable. Hormis le pompage initial de l'eau dans le volume de la gare, la mise hors d'eau de l'ouvrage n'aura qu'un impact négligeable sur les eaux souterraines (pompage des infiltrations résiduelles). Sur le projet, quatre gares sont dans ce cas : Fort d'Issy-Vanves-Clamart, Châtillon-Montrouge, Bagneux, Villejuif IGR et Champigny Centre.
- Les parois de l'ouvrage sont ancrées dans une couche géologique perméable et baignent dans une nappe souterraine. La mise en œuvre d'un bouchon injecté permet alors de limiter les remontées d'eau dans l'enceinte de l'ouvrage. Un bouchon injecté est ainsi prévu pour la réalisation des gares de Pont de Sèvres, Issy RER, Les Ardoines et Créteil L'Echat. Il peut subsister des venues d'eau résiduelles : l'évacuation de ces dernières est toutefois non significative au regard du niveau de la nappe baignant l'ouvrage.

Concernant l'évacuation du volume d'eau retenu dans la « boîte gare » et des éventuels débits résiduels subsistants, il est prévu de traiter l'eau pompée en cas de pollution avérée, dans le but de rejeter uniquement une qualité d'eau conforme à la législation en vigueur.

La *deuxième technique* est une technique mixte associant la réalisation d'un puits en parois moulées présentant les mêmes caractéristiques que présentées ci-avant, et une partie réalisée en méthode dite traditionnelle, cette technique consistant à creuser depuis le puits central. Cette technique est utilisée lorsque des contraintes de surface ne permettent pas de réaliser la gare uniquement depuis la surface ; elle a été retenue pour les gares d'Arcueil-Cachan, Villejuif Louis Aragon, Vitry Centre, Le Vert de Maisons et Saint-Maur - Créteil.

- Pour la partie puits central, les gares d'Arcueil-Cachan et Saint-Maur - Créteil sont ancrées dans des horizons très peu perméables limitant la venue d'eau par le fond de fouille de façon naturelle. En revanche, pour les gares de Villejuif Louis Aragon, Vitry Centre et Le Vert de Maisons, un bouchon injecté en fond de fouille sera réalisé afin de limiter les venues d'eau et ainsi ne pas impacter le niveau de la nappe baignant ces ouvrages.
- Pour la partie réalisée en méthode souterraine traditionnelle, afin de limiter les venues d'eau, différentes techniques de traitement pourront être mises en place : injection d'étanchement, jet-grouting¹... Les reconnaissances en cours et les études à venir permettront de caractériser l'aquifère et donc d'adapter le traitement à mettre en place dans

le but de pouvoir réaliser cette partie hors d'eau ; le pompage sera ainsi limité au strict minimum, avec de ce fait une incidence sur le niveau piézométrique des nappes en présence également réduite au minimum.

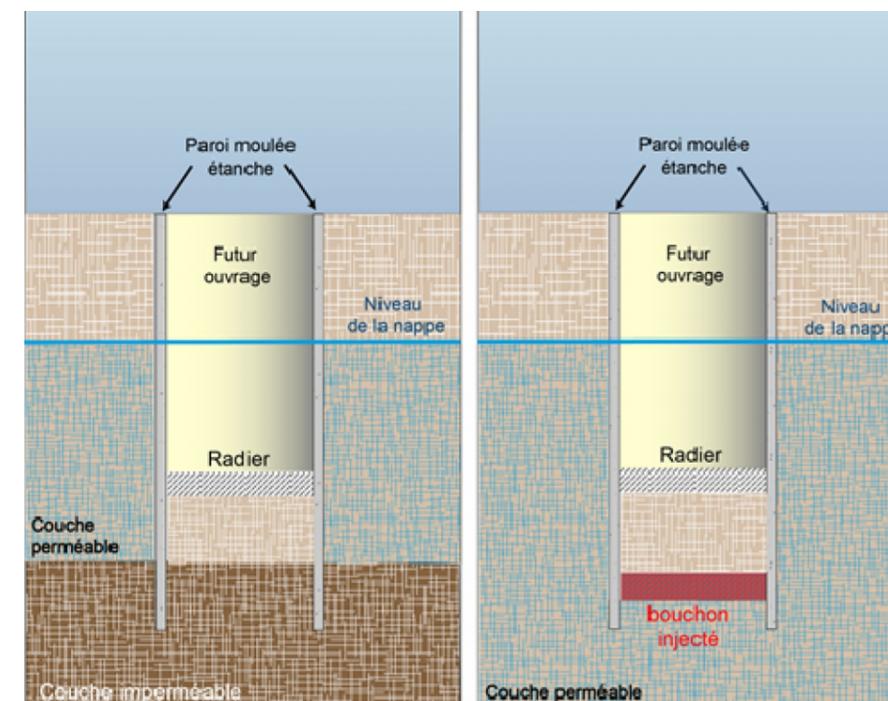


Figure 8 : Les deux configurations permettant de réaliser une enceinte de gare quasiment étanche : parois moulées ancrées dans une couche imperméable ou ajout d'un bouchon injecté

¹ Traitement de sol consistant à utiliser un jet de fluide à haute pression pour déstructurer un terrain et le mélanger avec un coulis liquide à base de ciment : cette technique s'applique aux terrains difficilement injectables par les procédés classiques.

Qu'est-ce qu'une paroi moulée ?

Une paroi moulée est un écran en béton armé directement moulé dans le sol. Son rôle est d'assurer le soutènement des terres autour de la fouille, de servir d'enceinte étanche vis-à-vis de la nappe d'eau et de reprendre, en partie ou en totalité, les descentes de charge de l'ouvrage pour en assurer les fondations.

La première étape de réalisation d'une paroi moulée consiste à exécuter des murettes-guides. Ces deux murets en béton armé permettent de guider l'outil de forage et de caler les cages d'armature.

L'excavation du sol est réalisée par panneaux de longueur limitée, variable selon le type de sol et la sensibilité des avoisinants.

La stabilité des fouilles réalisées est assurée en substituant aux terres excavées une boue bentonitique dans la tranchée, au fur et à mesure du creusement de celle-ci. Ce fluide permet d'appliquer une pression hydrostatique aux parois, et ainsi d'en empêcher l'éboulement.

Une fois l'excavation d'un panneau achevée, la cage d'armatures est mise en place dans la tranchée remplie de boue. Le bétonnage est ensuite effectué à partir du fond à l'aide d'un tube plongeur. En remontant, le béton chasse la boue bentonitique, qui est évacuée par pompage au fur et à mesure.

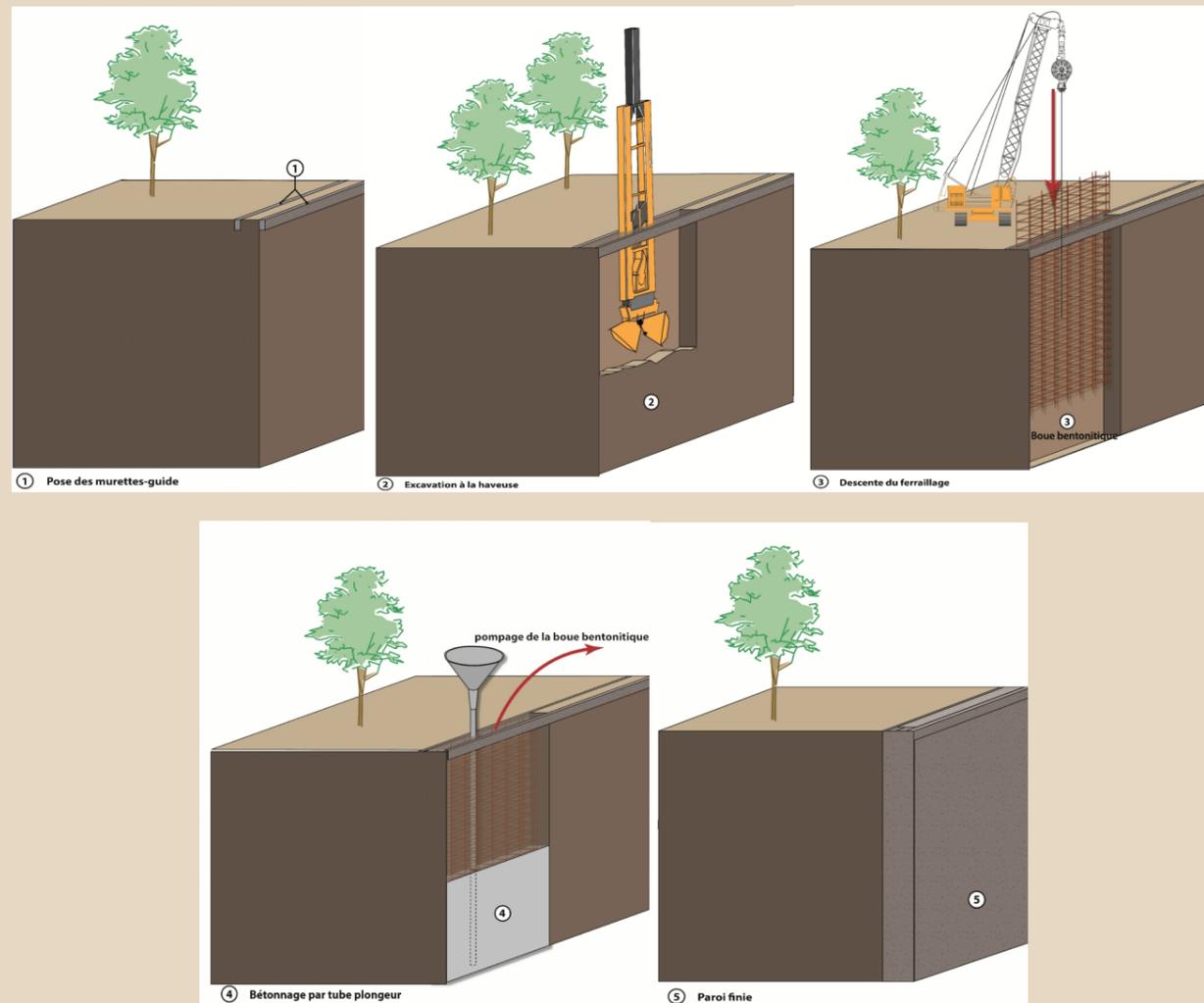


Figure 9 : Etapes de réalisation des parois moulées



Figure 10 : Mise en place d'une cage d'armatures dans un panneau de paroi moulée

Effet barrage

Les gares de Pont de Sèvres, Issy RER, Vitry Centre et Les Ardoines ainsi que la tranchée couverte d'accès au site de maintenance des infrastructures de Vitry-sur-Seine peuvent induire un effet barrage non négligeable, qui nécessite la mise en œuvre de mesures spécifiques (voir 3.2.4 ci-après).

Mise en communication des nappes

A l'échelle du projet, huit gares sont réalisées dans plusieurs nappes superposées: Châtillon-Montrouge, Bagneux, Arcueil Cachan, Villejuif IGR, Vitry Centre, Les Ardoines, Le Vert de Maisons et Créteil L'Echat.

La technique des parois moulées utilisée pour chacune de ces gares permet de limiter grandement les échanges entre les nappes grâce à la mise sous pression de la fouille par la boue bentonitique au moment du creusement.

Pour les parties réalisées en méthode souterraine traditionnelle, les pré-injections d'étanchement permettent de limiter grandement les échanges entre nappes. Les vides qui potentiellement pourraient subsister suite à la mise en place des structures définitives pourront faire l'objet d'injections de remplissage afin de minimiser les échanges entre nappes, si cela s'avérait nécessaire.

3.2.4 Mesures mises en œuvre et coûts

- *Méthodes constructives*

Les méthodes constructives retenues pour la réalisation du tunnel, des tranchées, des gares et des ouvrages annexes sont adaptées à la présence potentielle d'eaux souterraines (voir le détail de réalisation au titre 3.2.3).

- *Mesures particulières mises en œuvre*

Des mesures spécifiques pour supprimer les risques liés à l'impact du projet sur les eaux souterraines pourront par ailleurs être retenues au cas par cas au cours des études de maîtrise d'œuvre du projet, en complément des méthodes constructives générales déjà définies :

- Concernant l'effet barrage, en particulier à l'extrémité ouest du tunnel, entre l'arrière-gare de Pont de Sèvres et la gare d'Issy RER, les études à venir permettront de quantifier cet effet et d'estimer le réel impact des ouvrages du métro souterrain sur le niveau des nappes afin de prendre d'éventuelles dispositions pour limiter ce phénomène. Il existe différents dispositifs permettant de lutter contre cet effet de barrage parmi lesquels : recapeage des têtes de parois moulées, tranchées drainantes, siphons, etc. Les études ultérieures permettront de vérifier au cas par cas l'opportunité de mettre en œuvre de telles mesures.
- Dispositifs de traitement des eaux pompées polluées avant rejet : ces dispositifs s'appliquent systématiquement aux volumes d'eau polluée qui seront pompés sur le chantier du métro.

L'ensemble des coûts des actions mises en œuvre pour réduire l'impact de projet sur les nappes et les circulations d'eaux souterraines est inclus dans le coût global du projet.

3.2.5 Méthodes de suivi des effets des mesures

Un suivi des mesures mises en œuvre pour supprimer les impacts du projet sur le régime des nappes et eaux souterraines est mis en place dès la phase étude. En particulier :

- Un « état zéro » est établi pour les différents paramètres (niveau piézométrique, débits, température, pH, teneur en polluants...), ce dans le but de caractériser les différents aquifères présents sur le tronçon.
- Le suivi de ces paramètres est ensuite réalisé par mesures et analyses chimiques tout au long du chantier.

3.2.6 Cas spécifique des franchissements sous-fluviaux

D'un point de vue hydrographique, le tronçon Pont de Sèvres – Noisy-Champs traverse en souterrain plusieurs cours d'eau : la Seine, la Bièvre (intégrée au réseau de gestion des eaux pluviales géré par le SIAAP en aval d'Antony) et la Marne.

Les traversées sous-fluviales sont des points particuliers du projet. Sur le tronçon ces traversées sont toutes réalisées au tunnelier, ce sont des points maîtrisés techniquement par les constructeurs.

- **Définition des incidences potentielles**

Le creusement d'un tunnel sous un cours d'eau présente le risque que le lit mineur (zone d'écoulement des eaux en temps normal) soit atteint, directement ou par création d'un passage d'eau préférentiel :

- soit parce que le tunnel ou l'ouvrage atteint directement le lit mineur et perturbe l'écoulement. Ce cas n'est pas envisagé ici.
- soit parce que la structure du fond du lit mineur est fragilisée par les travaux, lorsque ceux-ci sont très proches, et la relative étanchéité qui s'est établie est rompu. Le lit mineur fuit alors de façon plus importante que ce qui se passe normalement. Dans certaines conditions, le niveau d'eau dans le cours d'eau peut même baisser significativement à débit comparable.

- **Application au projet**

Passage sous la Seine à Vitry-sur-Seine

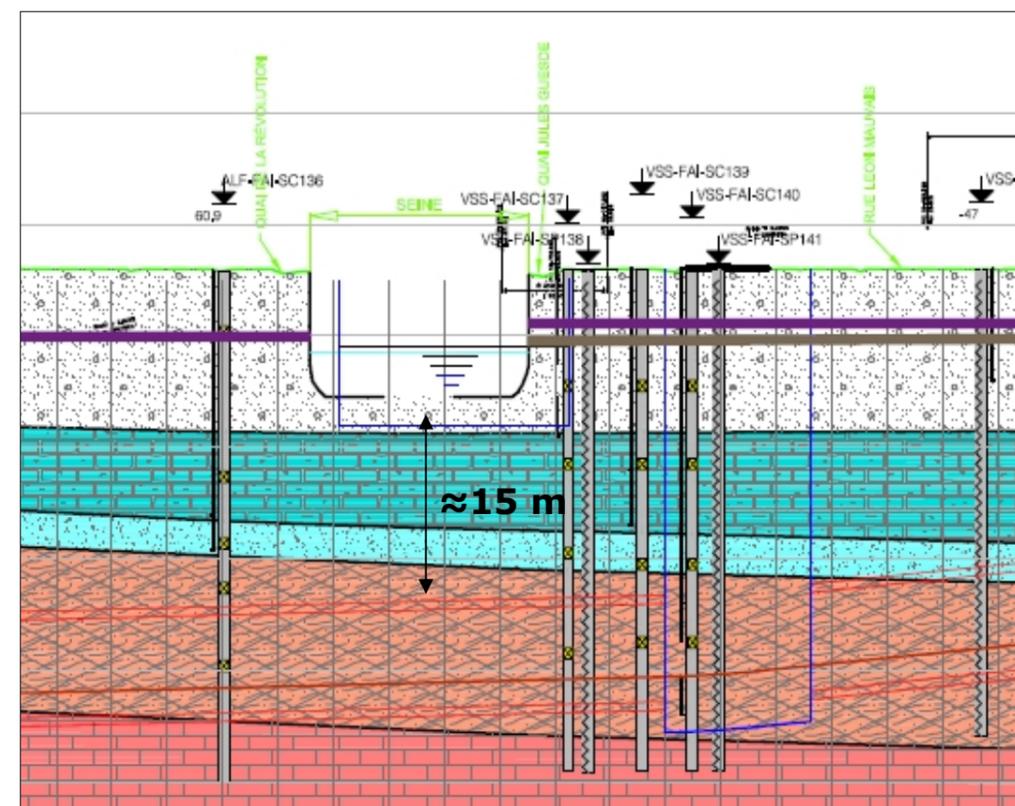


Figure 11 : Passage sous fluvial au niveau de Vitry-sur-Seine

La figure permet de constater que le tunnel passe 15 m environ sous le fond du lit mineur et qu'il en est séparé par deux couches géologiques entières composées du Calcaire de Saint-Ouen et des Sables de Beauchamp, et par deux couches partielles composées de la base des alluvions et de la partie supérieure des Marnes et Caillasses.

Dans cette configuration, il n'y a aucun risque d'atteinte au lit mineur de la Seine.

Passage sous la Marne à Saint-Maur-des-Fossés

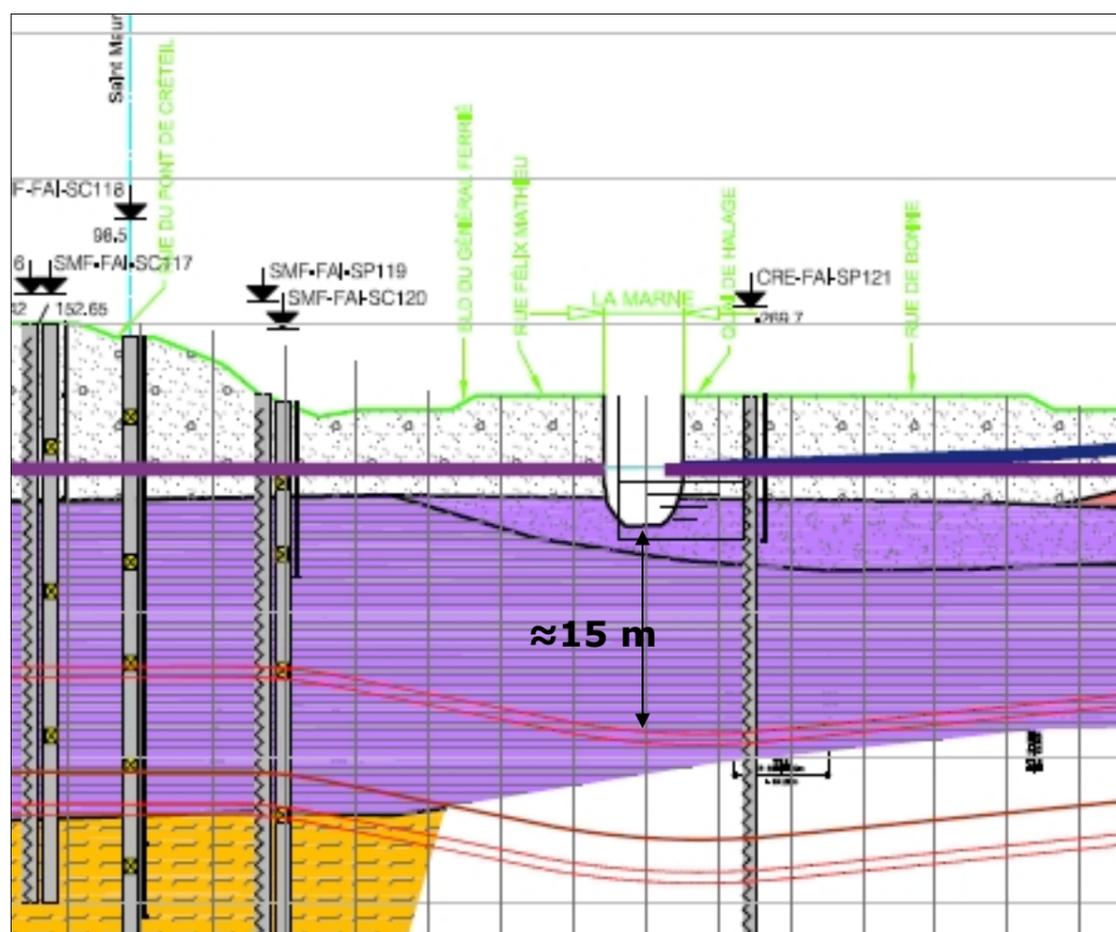


Figure 12 : Passage sous fluvial au niveau de Saint-Maur-des-Fossés

La figure permet de constater que le tunnel passe 15 m environ sous le fond du lit mineur et qu'il en est séparé par une couche géologique : une lentille de sables de l'Yprésien, sans doute relativement argileux pour retenir l'eau du lit mineur, et l'Argile Plastique de l'Yprésien ayant une très faible perméabilité.

Dans cette configuration, il n'y a aucun risque d'atteinte au lit mineur de la Marne.

Passage sous la Marne à Champigny-sur-Marne

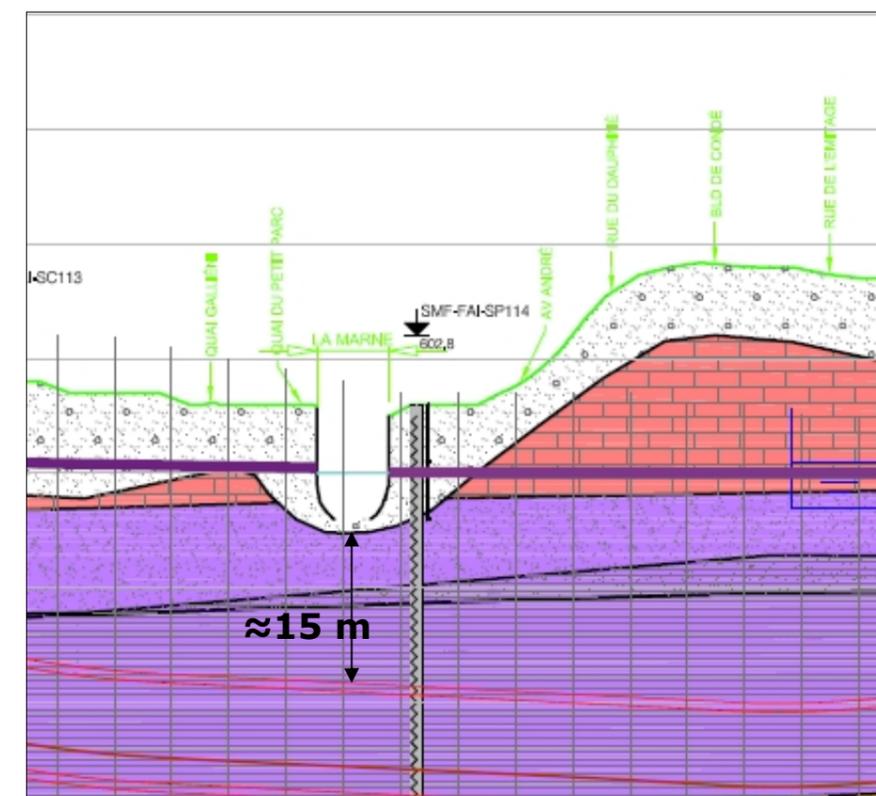


Figure 13 : Passage sous fluvial au niveau de Vitry-sur-Seine

La figure permet de constater que le tunnel passe 15 m environ sous le fond du lit mineur et qu'il en est séparé par une couche géologique : une couche de sables de l'Yprésien, sans doute relativement argileux pour retenir l'eau du lit mineur, et l'Argile Plastique de l'Yprésien ayant une très faible perméabilité.

Dans cette configuration, il n'y a aucun risque d'atteinte au lit mineur de la Marne.

Passage sous la Seine à Boulogne-Billancourt

Le double passage sous la Seine au niveau de la gare de Pont de Sèvres est le plus délicat. Pour des raisons pratiques, la structure de la gare est située sous le quai de la Seine au pied du pont de Sèvres. La figure ci-après montre cette situation.

Il y a toujours au moins 15 m entre le fond du cours d'eau traversé et la partie haute du tunnel. Par ailleurs, la figure montre que le tunnel reste dans la Craie et n'atteint pas les alluvions.

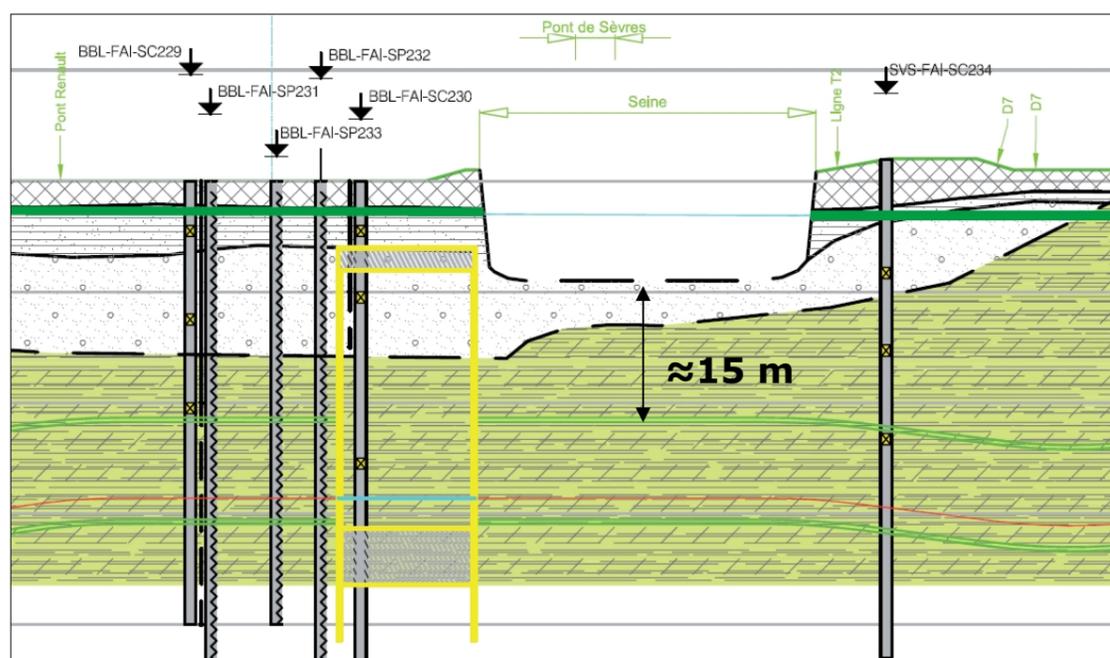


Figure 14 : Passage sous fluvial au niveau de la gare de Pont de Sèvres

Le creusement du tunnel ne porte donc pas atteinte au lit mineur.

3.2.7 Conclusion

L'hydrogéologie est un élément essentiel de l'analyse des impacts du projet de tronçon Pont de Sèvres – Noisy-Champs sur l'environnement. Les risques géotechniques en liaison directe ou indirecte avec l'hydrogéologie sont un enjeu majeur de cette partie du projet car le sous-sol présente de nombreuses fragilités résultant de la géologie et de l'histoire de cette région.

Les méthodes constructives utilisées permettent de prévenir les risques liés à la traversée des couches géologiques dites aquifères, c'est-à-dire contenant de l'eau, ou au franchissement en souterrain des cours d'eau.

Il convient également de rappeler que la mesure des impacts du projet au niveau hydrogéologique sera complétée lors des études réglementaires exigées par le code de l'environnement, en particulier le Titre Ier de son Livre II, relatif à l'eau et aux milieux aquatiques et marins.

En effet, de nombreuses opérations relèvent de la nomenclature de l'article R.214-1 dudit code et sont soumises à déclaration ou autorisation des services de l'Etat.

3.3 Dissolution du gypse

3.3.1 Description du phénomène

- Qu'est-ce que la dissolution du gypse ?

Le gypse est une espèce minérale composée de sulfate de calcium, soluble dans l'eau. Cette roche est présente soit sous forme de bancs massifs (Masses et Marnes du gypse en particulier), soit de manière plus diffuse, sous forme de nodules, d'interlits ou de lentilles dans différentes couches géologiques du sous-sol parisien (Calcaire de Saint Ouen ou Marnes et Caillasses par exemple).

La dissolution du gypse se produit lorsqu'il est soumis à un apport d'eau « non chargée en sulfate » par infiltration de la pluie ou mise en communication avec une nappe d'eau souterraine non chargée. Selon le type de cristallisation du gypse et sa densité dans le massif encaissant, ce phénomène peut entraîner soit une dégradation diffuse des caractéristiques mécaniques d'un horizon géologique, soit la création de cavités souterraines appelées vides de dissolution, de dimensions variables.

La dissolution du gypse s'accompagne alors de décompressions des terrains sus-jacents et/ou, dans le cas extrême, d'apparition de fontis.

Ce phénomène fait l'objet de plusieurs Plans de Prévention des Risques sur l'ensemble de la région Ile-de-France. Cela signifie que le risque est avéré dans certains secteurs, mais également qu'il est bien identifié et a été étudié, un élément essentiel pour la maîtrise du risque.

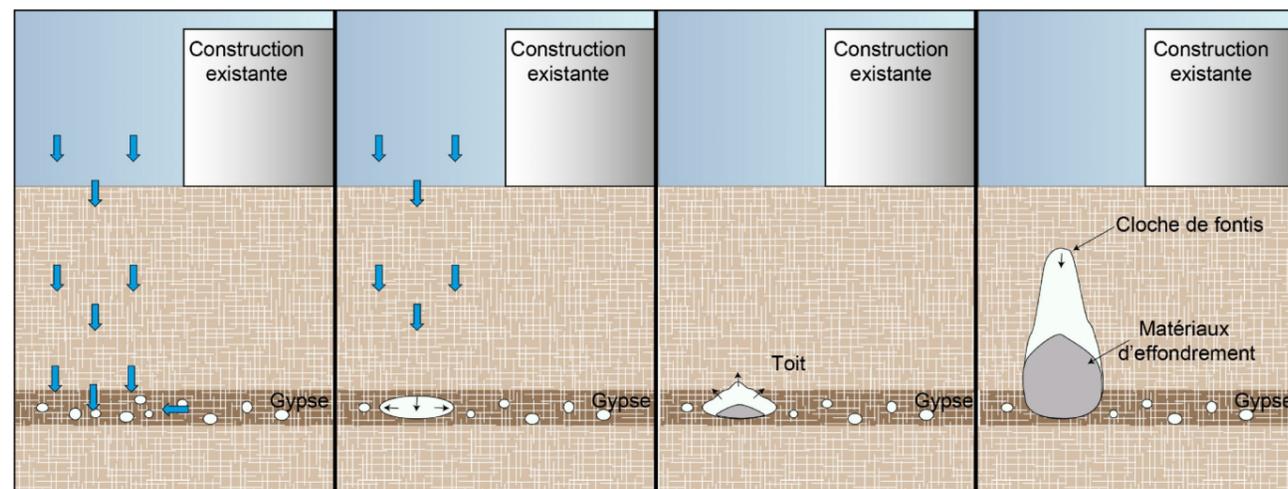


Figure 15 : Phénomène de dissolution du gypse

Nota : il existe un phénomène similaire à la dissolution du gypse, dans les massifs calcaires. Ce phénomène, appelé karstification, est anecdotique dans le bassin parisien et ne présente pas de réels enjeux vis-à-vis du projet. C'est pourquoi il n'est pas abordé dans le présent rapport.

- Quels pourraient être les enjeux d'un projet de type métro souterrain liés à la dissolution du gypse ?

Un projet de type métro souterrain est susceptible d'activer ou de réactiver le phénomène de dissolution du gypse en modifiant le régime d'écoulement des nappes d'eau souterraines dans des zones marquées par la présence de gypse.

La présence de zones décomprimées ou de vides dans le sous-sol peuvent être à l'origine de mouvements de terrain (tassements, fontis...) susceptibles de causer des désordres sur le bâti et plus généralement sur les ouvrages situés à l'aplomb et au voisinage des infrastructures du projet.

- Le projet Pont de Sèvres - Noisy-Champs de la ligne rouge du Grand Paris Express rencontre-t-il des zones gypseuses ?

En région parisienne, le phénomène de dissolution du gypse est particulièrement développé au nord de Paris et en Seine-Saint-Denis, où ce risque fait l'objet d'un plan de prévention.

Cependant, le projet de tronçon Pont de Sèvres - Noisy-Champs traverse plusieurs couches géologiques potentiellement marquées par la présence de gypse, et donc susceptibles de présenter des phénomènes de dissolution. On citera en particulier :

- les Masses et Marnes du Gypse,
- le Calcaire de Saint-Ouen,
- les Sables de Beauchamp,
- les Marnes et Caillasses.



Figure 16 : Fontis

3.3.2 Prise en compte des enjeux dès la conception

Afin d'éviter les phénomènes de dissolution du gypse, la conception du projet de métro Pont de Sèvres – Noisy-Champs prévoit de limiter au maximum l'impact du projet sur le régime d'écoulement des nappes, qui constitue l'origine de la dissolution du gypse. La conception et les mesures adoptées pour limiter cet impact sont décrites au titre 2 du présent rapport.

3.3.3 Localisation des zones d'incidence potentielle

Le projet traverse des zones gypseuses lors de sa traversée du plateau de Villejuif. En effet, il passe dans des horizons de Masses et Marnes de Gypse et de Marnes Supra-gypseuses entre la vallée de la Bièvre à l'ouest et la gare de Vitry Centre à l'est.

Cependant, le projet de métro impacte le régime d'écoulement des eaux souterraines de façon limitée (cf. titre 3.2). Par conséquent, il ne favorise que très faiblement la dissolution du gypse dans ces zones gypseuses.

3.3.4 Mesures mises en œuvre et coûts

Afin de maîtriser les effets de la présence de gypse, les mesures suivantes seront mises en œuvre dans les zones concernées :

- Reconnaissances adaptées avant le chantier, en phase études (bibliographie, sondages, mesures géophysiques, analyses hydrogéologiques...) : le but est de caractériser le massif et de repérer d'éventuelles décompressions ou vides.
- Si des anomalies étaient repérées lors de la construction de l'infrastructure du métro (tunnel, tranchée, gare, ouvrage annexe), il pourrait être nécessaire de traiter les vides par injection, selon leur taille et la sensibilité de la zone d'influence du creusement (présence de bâti, d'ouvrage sensible, etc.) : cela consiste en la réalisation de forages depuis la surface permettant de remplir les cavités par injection gravitaire de mortier ou de coulis. Le coût de ce type de traitement est très variable selon la profondeur des anomalies (et donc des forages à réaliser) et des volumes en jeu.

3.3.5 Méthodes de suivi des effets des mesures

Pour vérifier que les mesures mises en œuvre en cas d'injection notamment sont efficaces, des sondages de contrôle des traitements seront réalisés.

Par ailleurs, une méthode observationnelle sera mise en place. Elle se décompose en deux phases :

- *Etude de vulnérabilité du bâti* : elle consiste à inventorier et catégoriser le bâti, définir son état initial ainsi que les valeurs seuils de déplacements acceptables pour ce dernier. Cette étude permettra de consolider les méthodes constructives ainsi que les traitements à mettre en place en cas de terrains décomprimés. Elle interviendra en accompagnement des phases d'études d'avant-projet et de projet.
- *Mise en place de l'auscultation de surface* : cette auscultation sera mise en place en amont de la phase de chantier (environ une année avant le début des travaux de génie civil). afin de mesurer la respiration naturelle du bâti et des ouvrages, et sera maintenue en phase travaux. Les déplacements enregistrés seront alors comparés aux estimations des phases études (estimations faites par un logiciel de modélisation aux éléments finis). Dans le cas de dépassement des valeurs seuils, les méthodes constructives seront immédiatement adaptées, le but étant de maîtriser complètement les déformations dans le sol.

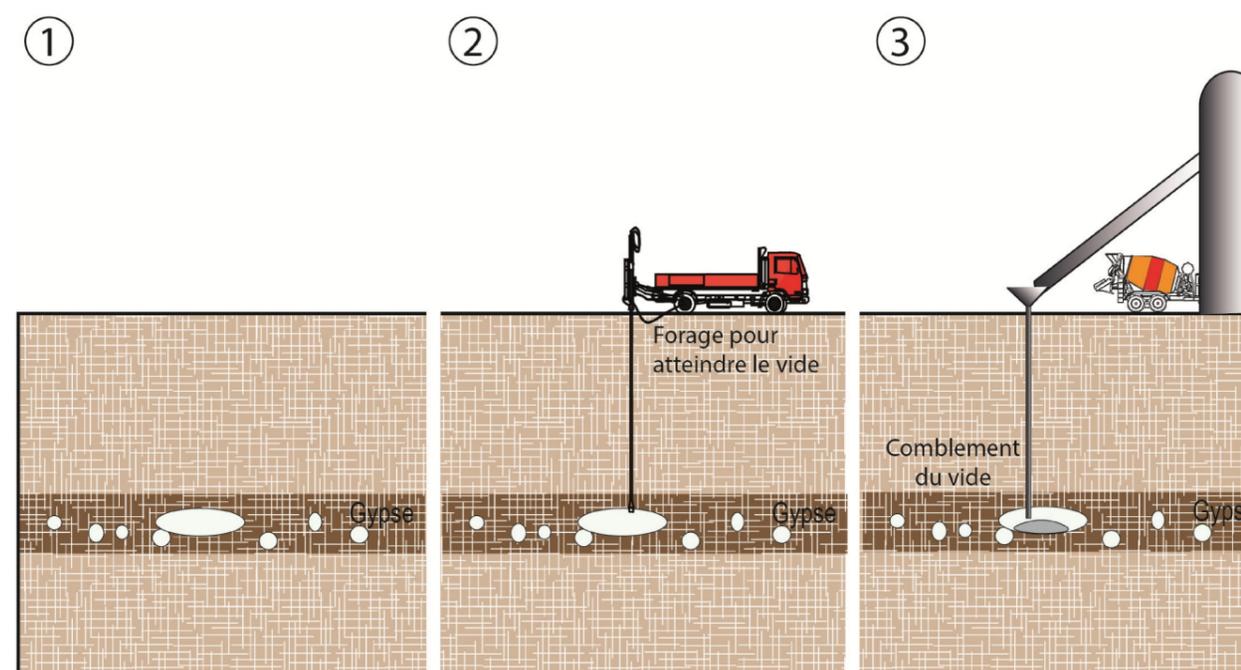


Figure 17 : Principe de comblement d'un vide de dissolution



Figure 18 : Carotte de gypse issue d'un sondage en région parisienne

3.4 Retrait et gonflement des argiles

3.4.1 Description du phénomène

- *Qu'est-ce que le phénomène de retrait/gonflement des argiles ?*

L'argile est une roche sédimentaire à grains fins présente dans différentes couches géologiques.

L'argile voit sa consistance se modifier en fonction de sa teneur en eau. Elle est dure et cassante lorsqu'elle est desséchée, elle devient plastique et malléable à partir d'un certain niveau d'humidité. Ces variations de consistance s'accompagnent de variations de volume, dont l'amplitude peut s'avérer très importante.

- *Quels pourraient être les impacts d'un projet de type métro souterrain sur le retrait/gonflement des argiles ?*

Un projet de type métro souterrain est susceptible d'activer ou de réactiver le phénomène de retrait/gonflement des argiles en modifiant le régime d'écoulement des nappes d'eau souterraines.

En effet, l'apport ou le retrait d'eau (pompages, remontées de nappe, etc.) dans des zones marquées par la présence d'argile est susceptible de modifier leur état hydrique et donc de les faire gonfler lorsqu'elles passent d'un état sec à un état humide ou d'activer leur « retrait » lorsqu'elles passent d'un état humide à un état sec.

Par ailleurs, la réalisation de terrassements à ciel ouvert est susceptible d'exposer des argiles aux aléas météorologiques alors qu'elles étaient jusqu'à présent protégées, favorisant également leur retrait/gonflement.

- *Dans le cadre d'un projet de type métro souterrain, quels pourraient être les impacts du retrait/gonflement des argiles sur l'environnement ?*

Les variations de volume générées par le retrait des argiles provoquent des tassements qui se manifestent par des désordres sur les ouvrages. A contrario, le phénomène de gonflement peut provoquer des soulèvements (en champ libre, c'est-à-dire si l'argile n'est pas contrainte) ou des sur-contraintes (pression de gonflement sous un radier de gare par exemple).

En général, ces phénomènes se produisent à proximité de la surface, où la teneur en eau des argiles est soumise à de fortes variations, liées à la météorologie (périodes de sécheresse notamment), mais aussi à la végétation (système racinaire) ou à l'activité humaine (imperméabilisation des surfaces, pompages ou arrosages...).

Ce phénomène fait l'objet de Plans de Prévention des Risques en Ile-de-France. Cela signifie que le risque est avéré dans certains secteurs, mais également qu'il est bien identifié et a été étudié.



Figure 19 : Argile plastique

- *Le projet Pont de Sèvres – Noisy-Champs de la ligne rouge du Grand Paris Express rencontre-t-il des zones argileuses ?*

Le projet de réalisation du tronçon Pont de Sèvres – Noisy-Champs recoupe plusieurs formations géologiques argileuses considérées comme fortement sensibles. On citera en particulier les Argiles vertes et les Argiles plastiques.

Les différents secteurs concernés sont les suivants :

- En sortant de la gare Issy RER, le tunnel remonte progressivement sous le plateau de Calcaire Grossier, qui s'étend jusqu'à la vallée de la Bièvre. Le tunnel vient s'établir dans le Calcaire Grossier en partie supérieure, et dans l'Argile Plastique en partie inférieure.
- En remontant à l'est de la vallée de la Bièvre sous le plateau de Villejuif, le tunnel est surplombé par une couche d'argile verte, jusqu'à la gare de Vitry Centre.
- En sortant de la gare de Créteil L'Echat jusqu'à la gare de Saint-Maur - Créteil, le tunnel est à nouveau creusé dans une couche argileuse, sous la vallée de la Marne.
- Enfin, le tunnel est à nouveau surplombé par une couche d'Argile Verte, sous le plateau du Calcaire de Champigny, sur le territoire de la commune de Noisy-le-Grand en particulier, jusqu'à son terminus de Noisy-Champs.

3.4.2 Prise en compte des enjeux dès la conception

Le projet de tronçon Pont de Sèvres - Noisy-Champs traverse les Argiles Vertes au niveau des gares de Villejuif IGR et de Noisy-Champs. Toutefois, les Argiles Vertes sont situées dans la partie haute de la série ; les gares traversent cette couche et s'ancrent plus bas. Par conséquent, du fait des méthodes constructives retenues (parois moulées), les Argiles Vertes ne sont jamais exposées aux intempéries météorologiques. Les impacts liés au retrait/gonflement des Argiles Vertes est donc nul sur le tronçon Pont de Sèvres – Noisy-Champ au niveau des gares. Quant à la partie courante, le tunnel s'inscrit systématiquement sous cette couche, l'impact est donc également nul.

Concernant la couche d'Argiles Plastiques qui se situe en profondeur, pour la partie en section courante, le tunnel s'inscrit partiellement dans cette couche. Comme mentionné précédemment (voir 2.2.3), la réalisation du tunnel au tunnelier ne perturbe pas les conditions hydriques des Argiles Plastiques : le phénomène de retrait/gonflement des Argiles Plastiques est donc quasi nul pour cette partie.

Concernant les gares ancrées en fond de fouille dans les Argiles Plastiques, lors des terrassements en phase chantier, des précautions particulières pourront être mises en place en cas d'intempéries météorologiques, le but étant de limiter l'intrusion d'eau dans la fouille et ainsi minimiser le gonflement des Argiles.

Pour la phase définitive, le radier de la gare sera dimensionné de telle sorte qu'il sera capable de reprendre les efforts de gonflement des Argiles Plastiques.

3.4.3 Localisation des zones d'incidence potentielle

De façon générale, aucune incidence potentielle significative n'est à prévoir sur les tronçons excavés au tunnelier. En effet, la réalisation du tunnel au tunnelier permet de limiter au minimum l'impact du projet sur le régime d'écoulement des eaux souterraines. Par ailleurs, les phénomènes météorologiques n'ont aucun impact sur les sections souterraines du projet.

A l'échelle du projet, les zones d'incidences potentielles sont localisées au niveau des ouvrages réalisés à ciel ouvert avec un fond de fouille se situant dans les Argiles Plastiques, et ce uniquement pendant la phase chantier.

Il est à noter que l'enjeu reste mineur, même au niveau de ces ouvrages.

3.4.4 Mesures mises en œuvre

- *Dispositions constructives*

L'impact du projet sur le phénomène de retrait/gonflement des argiles ne représente pas d'enjeu majeur pour l'environnement.

En revanche, les ouvrages du projet seront soumis comme toute autre construction à cet aléa. Par conséquent, les ouvrages seront conçus pour résister à ces phénomènes. Les radiers fondés dans les Argiles Plastiques au niveau des gares et ouvrages annexes seront conçus et dimensionnés en prenant en compte cet aléa, et seront capables de reprendre les efforts de gonflement.

- *Mesures spécifiques*

Les dispositions constructives adoptées au niveau des ouvrages à ciel ouvert permettent de limiter au maximum les mouvements de nappes, ce qui évite d'agir sur l'état hydrique des argiles présentes autour de ces gares.

En phase chantier, des dispositions constructives spécifiques pourront être mises en œuvre afin de préserver ces matériaux sensibles de toute venue d'eau. En particulier, les fonds de fouilles des ouvrages fondés dans une couche argileuse pourront bénéficier de mesures spécifiques afin de ne pas exposer ces sols aux conditions météorologiques (systèmes de drainage et de collecte, protection par des masques ou des géosynthétiques par exemple).

3.4.5 Méthodes de suivi des effets des mesures

Au vu des mesures de réduction mises en œuvre dans la conception du projet, ainsi que de l'ampleur en conséquence très limitée du phénomène concerné, il n'y a pas de disposition spécifique à mettre en place dans le cadre du suivi des mesures. L'infrastructure du métro, comme toute infrastructure, fera l'objet au cours de son exploitation d'un suivi régulier, permettant de la maintenir efficacement.

4. Glossaire

Anticlinal : en géologie, il s'agit d'un plissement des couches géologiques suite à un mouvement tectonique, l'anticlinal présente une convexité vers le haut et le centre est occupé par les couches géologiques les plus anciennes.

Boue bentonitique : il s'agit d'une boue constituée de bentonite, une argile très gonflante thixotropique au contact de l'eau, et qui permet donc, dans des fouilles de type paroi moulée, de maintenir le sol verticalement sans éboulement.

Carotté : se dit d'un sondage qui permet d'extraire des échantillons de sols intacts (sans remaniement).

Destructif : se dit d'un sondage qui ne permet pas d'identifier les sols de façon précise comme le sondage carotté, mais qui permet via l'observation des paramètres de forages de détecter des anomalies (vides, décompressions notamment).

Eboulis : amas de matériaux érodés, glissés, se situant souvent en flanc de coteaux ou en partie basse sur le tronçon considéré.

Piézomètre : tube crépiné inséré dans le sol qui permet de mesurer le niveau de la nappe en présence.

Pressiométrique : se dit d'un sondage dans lequel est réalisé un essai de type pressiométrique, qui consiste à introduire une sonde dans un forage calibré et à faire gonfler cette sonde afin de mesurer certaines caractéristiques mécaniques du sol.

Série stratigraphique : correspond à l'empilement des couches géologiques (strates).

Voussoirs : en tunnel, il s'agit du revêtement en béton armé préfabriqué qui, assemblés par anneau, maintient les parois du tunnel ; ils sont posés directement par le tunnelier.

Table des figures

Figure 1 :	<i>Ecorché d'une carrière de type hagues et bourrages (figure extraite de « Les souterrains de Paris », édition Nord Patrimoine).....</i>	19
Figure 2 :	<i>Ancienne carrière souterraine dans l'ouest parisien.....</i>	20
Figure 3 :	<i>Mise en place d'un mur masque dans une ancienne carrière souterraine avant injection de la carrière</i>	22
Figure 4 :	<i>Principe d'injection d'une ancienne carrière souterraine.....</i>	22
Figure 5 :	<i>Nappe d'eau souterraine affleurant lors de travaux de terrassement.....</i>	23
Figure 6 :	<i>Principe de l'effet barrage.....</i>	24
Figure 7 :	<i>Rabattement de nappe.....</i>	26
Figure 8 :	<i>Les deux configurations permettant de réaliser une enceinte de gare quasiment étanche : parois moulées ancrées dans une couche imperméable ou ajout d'un bouchon injecté.....</i>	27
Figure 9 :	<i>Etapes de réalisation des parois moulées.....</i>	28
Figure 10 :	<i>Mise en place d'une cage d'armatures dans un panneau de paroi moulée</i>	29
Figure 11 :	<i>Passage sous fluvial au niveau de Vitry-sur-Seine</i>	30
Figure 12 :	<i>Passage sous fluvial au niveau de Saint-Maur-des-Fossés.....</i>	31
Figure 13 :	<i>Passage sous fluvial au niveau de Vitry-sur-Seine</i>	31
Figure 14 :	<i>Passage sous fluvial au niveau de la gare de Pont de Sèvres.....</i>	32
Figure 15 :	<i>Phénomène de dissolution du gypse</i>	33
Figure 16 :	<i>Fontis</i>	33
Figure 17 :	<i>Principe de comblement d'un vide de dissolution</i>	34
Figure 18 :	<i>Carotte de gypse issue d'un sondage en région parisienne.....</i>	35
Figure 19 :	<i>Argile plastique</i>	36



Société du Grand Paris
Immeuble « Le Cézanne »
30, avenue des Fruitiers
93200 Saint-Denis

www.societedugrandparis.fr