

# Enjeux géotechniques pour la construction du métro automatique « Grand Paris Express »

## Geotechnical issues for « Grand Paris Express » automatic metro

Fluteaux V.

*Société du Grand Paris*

**RÉSUMÉ :** La Société du Grand Paris, Établissement Public d'État, a pour mission de concevoir et de réaliser le réseau de transport public « Grand Paris Express » qui est au cœur du projet d'aménagement du territoire : « Nouveau Grand Paris ». Ce projet comporte 4 nouvelles lignes, 2 extensions : il se développe sur 200 km et comprend 72 gares, principalement en souterrain. Dans un premier temps, il est détaillé le processus d'utilisation des données et la mise en place de regards partagés entre les différents acteurs (maître d'ouvrage, assistants à maîtrise d'ouvrage, maîtres d'œuvre) sur ces dernières afin de maîtriser les risques techniques liés notamment à la géotechnique et à la reconnaissance du bâti. Dans un second temps, sont listés les enjeux liés à la géotechnique pour le projet du Grand Paris Express et comment ces enjeux ont été pris en compte dès les premières phases d'études amont, et ont, de ce fait, orienté, les investigations géotechniques qui sont résumées en quelques chiffres. Ces enjeux sont les carrières anthropiques, les nappes d'eau, la dissolution du gypse et le retrait gonflement des argiles.

**ABSTRACT:** « La Société du Grand Paris », a Public company, was created for the conception and construction of « Grand Paris Express » transport network, the major link of « Nouveau Grand Paris » urban development. This project is composed of 4 new lines and 2 line extensions, with 72 stations: its total length is 200 km, mainly underground level. In a first time, the method used for collecting geotechnical and existing building data is exposed, also the corresponding risk management approach of the owner, his advisors and the designers. In a second time, the main geotechnical issues are identified and mitigated at the first conception phase with pertinent geotechnical investigations: existing underground quarries, water table layers, gypsum dissolution and clay swelling.

**MOTS-CLÉS :** développement urbain, souterrain, reconnaissances géotechniques, maîtrise des risques

**KEYWORDS:** Urban development, tunnelling, geotechnical investigation, risk management

### 1. INTRODUCTION

#### *Le Nouveau Grand Paris - Le projet du Grand Paris Express*

Le projet du Nouveau Grand Paris c'est d'abord un projet d'aménagement du territoire. L'État a affirmé par là sa volonté de valoriser les territoires de l'Île-de-France et d'améliorer la capacité de logement. Ce projet répond à trois enjeux majeurs : améliorer la vie quotidienne des Franciliens (enjeu de qualité de vie), favoriser le désenclavement des territoires (enjeu de solidarité) et leur développement économique (enjeu d'attractivité et d'emploi).

Le Grand Paris Express contribue à structurer ce grand projet d'aménagement, de par l'amélioration à court terme du service offert aux voyageurs, la modernisation et l'extension du réseau existant mais également par la création d'un réseau de transport public automatique qui concerne l'ensemble de l'Île-de-France. Il vise à desservir de nouveaux territoires et à apporter enfin une réponse satisfaisante aux très nombreux voyageurs qui vont quotidiennement de banlieue à banlieue et qui sont à ce jour obligés de transiter par Paris. Il a aussi vocation à pouvoir relier les différents aéroports à l'ensemble des activités de la région IDF.

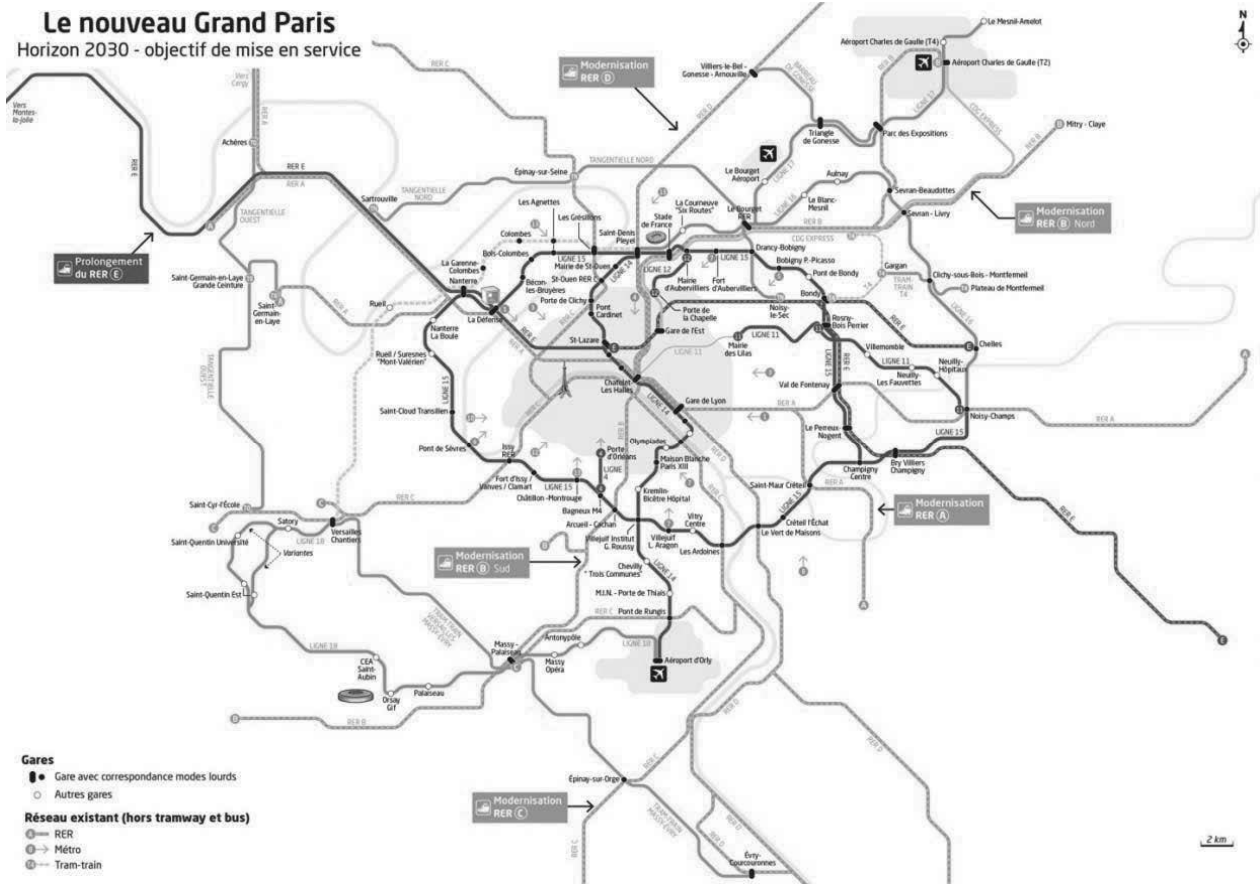
Le projet du Grand Paris Express a fait l'objet en janvier 2011 d'un protocole d'accord entre l'État et la région Île-de-France, il représente une synthèse des projets portés antérieurement par les deux autorités.

Il comporte :

- une rocade de grande capacité, la ligne 15, désaturant la zone dense ;
- des transports automatiques à capacité adaptée pour la desserte des territoires en développement : ligne 16, ligne 17, ligne 18 ;
- des prolongations de lignes de métro existants: ligne 14 au nord et au sud; ligne 11 vers l'est, de Mairie des Lilas à Noisy-Champs via Rosny-Bois-Perrier.

Ces trois lignes représentent 166 km de métro et 57 gares ; avec la ligne orange (réseau complémentaire), cela représente 200 km et 72 gares. L'ensemble, le Grand Paris Express, constitue un réseau très maillé avec les infrastructures de transport existantes (métro, RER, Transilien) afin de fluidifier les échanges à l'échelle de l'Île-de-France.

Le schéma d'ensemble de ce projet a fait l'objet d'un décret en Conseil d'État en août 2011.



Une procédure d'enquête publique sur un premier tronçon de la ligne rouge (future ligne 15, entre Noisy-Champs et Pont de Sèvres) a été lancée. Les premières mises en service sont attendues à l'horizon 2020 sur ce tronçon.

### *La Société du Grand Paris*

La Société du Grand Paris (SGP), Établissement Public de l'État, a été créée par une loi de 2010. Elle est Maître d'Ouvrage du réseau de transport public du Grand Paris Express. Sa mission est de concevoir et de réaliser ce nouveau réseau. La SGP a également une capacité d'aménager ou de construire autour des gares.

La Société du Grand Paris est constituée d'équipes pluridisciplinaires, avec notamment une direction du programme qui regroupe des équipes de projet et des unités métiers qui assurent une approche transversale. Avec plusieurs dizaines de gares concernées par le projet, il est en effet nécessaire de définir des règles communes et transversales de conception. De la même manière, le projet étant essentiellement souterrain et parfois assez profond, une équipe de spécialistes de travaux souterrains intervient en conseil auprès des équipes projet, elle définit et gère notamment les campagnes de reconnaissance du sous-sol et du bâti à l'échelle du nouveau réseau.

Le présent article vise à détailler la mission du Maître d'Ouvrage durant les phases amont d'acquisition des données, et comment ces données vont être utilisées et par quel acteur par la suite.

La géologie du Bassin Parisien est plutôt bien connue et dès les premières études du projet, le MOA disposait d'une base documentaire sérieuse et assez étoffée sur les couches géologiques intéressées par le projet (INFOTERRE). Il est bien évident que cela n'est pas suffisant et que des campagnes de reconnaissances ont dû être planifiées et dont certaines sont en cours de réalisation.

S'ils servent d'abord à définir les paramètres servant aux calculs de dimensionnement des ouvrages, ces résultats doivent permettre aussi d'apprécier le comportement des terrains lors de l'exécution des travaux et les conséquences sur l'environnement, et en tout en premier lieu sur le bâti. La typologie et l'état de ce bâti sont donc évidemment déterminants pour juger des conséquences des travaux. Des enquêtes détaillées du bâti seront donc entreprises. En attendant, des investigations de terrain et documentaires ponctuelles, a minima qualitatives, ont été effectuées toutes les fois que la faisabilité de la réalisation des ouvrages du projet était en jeu.

Une bonne part des reconnaissances réalisées à ce jour a permis d'alimenter les études de conception « amont », plus particulièrement les études préliminaires qui se sont déroulées tout au long de l'année 2012.

## 2. LES GRANDS AXES DE CONCEPTION

Dès les premières phases de conception du projet, la Société du Grand Paris s'est donc 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 que du point de vue de l'état du bâti (y compris réseaux enterrés et infrastructures).

### 2.1 *Le bâti, les réseaux enterrés et les infrastructures*

#### 2.1.1 *Types d'ouvrages rencontrés à proximité du projet et enjeux liés à leur présence*

Le projet 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, à savoir notamment : les canalisations d'assainissement, transports énergie (gaz, pétrole) et les canalisations de chauffage urbain.
- Infrastructures - sont notamment concernés les ouvrages d'art et les infrastructures ferroviaires, routières.

Les effets négatifs sur les ouvrages existants liés à la réalisation de nouveaux ouvrages enterrés sont bien sûr très variables selon l'ouvrage concerné et son état. Ces effets vont de l'atteinte au fonctionnement normal de celui-ci jusqu'à sa dégradation voire sa ruine.

Cette plus ou moins grande 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 ou de décompressions préexistantes etc... ainsi que de la profondeur du tunnel. Il est donc essentiel dès les premières phases de faire un recensement de qualité, mission qui incombe à la Maîtrise d'Ouvrage.

#### 2.1.2 *Organisation des études sur le bâti, les réseaux enterrés et les infrastructures*

Dès les phases amont (études de faisabilité et études préliminaires) 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, égouts, transports d'énergie, etc. De même, concernant le bâti, ont été recensés les bâtiments susceptibles d'interférer avec le projet (immeubles de grande hauteur, fondations profondes...).

Ainsi, les premiers tracés réalisés ont tenu compte, tant en plan qu'en profil, de ces contraintes et n'interfèrent pas avec ces grands réseaux ou obstacles.

*Les études de maîtrise d'œuvre* à venir vont permettre d'affiner les connaissances sur ce bâti, les objectifs sont multiples :

- confirmer et/ou compléter le recensement des études préliminaires des grands réseaux non déviables, afin d'établir un tracé prenant en compte l'ensemble de ces contraintes ;
- établir la méthodologie des travaux de confortement à entreprendre en cas de proximité de ces grands réseaux ;
- identifier, concevoir et initialiser les 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.

Pour atteindre ces objectifs, deux démarches doivent être menées :

#### Le 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, état de conservation et fonctionnement des réseaux).

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

La Société du Grand Paris va s'adjoindre les conseils d'un Assistant à Maîtrise d'Ouvrage en expertise du bâtiment. Cette

enquête et cette étude de sensibilité seront réalisées dans la zone d'influence géotechnique du projet.

Elle aura un double objectif : reconnaître le bâti au sens large tant d'un point de vue géométrique que structurel (niveau des fondations, système de pourtrason, etc.) ; mais également déterminer sa vulnérabilité (tolérance aux déformations du sol) aux travaux envisagés.

Ces données d'entrée seront ensuite fournies au Maître d'Œuvre pour prise en compte dans la conception du réseau. Sur la base de l'analyse de ces données, il conviendra d'adapter le dimensionnement des ouvrages du métro et/ou les méthodes constructives de manière à respecter les tolérances des ouvrages existants afin de réduire voire supprimer le risque.

Le but de cette organisation est d'avoir un regard partagé sur l'interprétation des données entre l'assistant à Maîtrise d'Œuvre bâti et le maître d'œuvre afin de concevoir un projet adapté au contexte de sensibilité du bâti présent dans la zone d'influence géotechnique. Dans cette organisation l'assistant à Maîtrise d'Œuvre Géotechnique a bien sûr un rôle essentiel à jouer (cf.2.2.2).

De plus, la Société du Grand Paris dès les phases d'études de Maîtrise d'Œuvre va mettre en place un Comité de maîtrise des risques qui sera constitué d'experts indépendants. Ce comité sera consulté sur les grandes orientations techniques du projet, mais également sur les points sensibles.

A travers cette organisation tournée vers l'expertise des sujets sensibles, dont fait notamment partie la caractérisation du bâti pour la détermination des méthodes constructives, la Société du Grand Paris entend maîtriser la qualité technique, les risques, les coûts et les délais.

### 2.1.3 Dispositions mises en place en phase travaux

En complément, afin de vérifier que les mesures retenues lors des différentes études réalisées permettent bien de supprimer les risques d'impact sur le bâti, une auscultation de celui-ci 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, une surveillance de l'existant en temps réel sera mise en œuvre, le but étant de comparer les déformations estimées aux déformations observées afin de pouvoir adapter les méthodes constructives immédiatement en cas de déplacement jugé anormal.

Comme dans la phase de conception, cette auscultation fera l'objet d'un double regard entre l'assistant à Maîtrise d'Œuvre en bâti et le maître d'œuvre, ainsi que d'une expertise éventuelle du Comité de Maîtrise des Risques.

## 2.2 La géologie, l'hydrogéologie et la géotechnique

### 2.2.1 La but des investigations géotechniques entreprises

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 investigations géotechniques entreprises dès la phase d'études préliminaires ont classiquement pour objectifs :

- D'établir le modèle géologique du projet : coupe linéaire par corrélation entre les 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 que d'un point de vue perméabilité.

- De caractériser les couches rencontrées tant d'un point de vue mécanique (dimensionnement les ouvrages de génie civil) qu'environnemental (détermination de la destination d'évacuation des déblais).

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.

### 2.2.2 Organisation des études géotechniques

Les études géotechniques sont régies par la norme NF P 94-500 relative aux missions géotechniques. Ces missions sont à mettre en regard des phases d'études de conception définies par la loi relative à la Maîtrise d'Œuvre Publique « loi MOP », cf. le tableau ci-après qui récapitule les caractéristiques de chacune des phases :

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

C'est toujours au travers d'une organisation rigoureuse, permettant divers niveaux d'expertises, que la Société du Grand Paris compte maîtriser les risques techniques (dans un projet de travaux en souterrain, ils sont essentiellement liés au sol), les coûts et les délais.

Pour se faire, la Société du Grand Paris s'est adjoint les conseils d'un assistant à maîtrise d'ouvrage en géotechnique, qui a plusieurs missions :

- Définir et superviser les investigations géotechniques,
- Interpréter et établir pour le compte de la Société du Grand Paris les missions G11, G12 et G2,
- Accompagner la Maîtrise d'Œuvre dans ses discussions avec le maître d'œuvre.

Les résultats factuels de ces investigations géotechniques sont transmis au maître d'œuvre pour une analyse et une interprétation qui lui sont propres, ce qui double la réalisation des missions G12 et G2.

Le but de cette organisation est d'avoir un regard partagé sur l'interprétation des données de sols entre les spécialistes du maître d'œuvre et l'assistant à maîtrise d'ouvrage Géotechnique, afin de concevoir un projet adapté au contexte géologique, hydrogéologique et géotechnique par une adéquation des méthodes constructives retenues.

De plus, le Comité de maîtrise des risques, sera consulté dans tous les grands choix techniques qui sont liés à la géotechnique et aux méthodes constructives.

### 2.2.3 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 : mission d'études et de suivi géotechnique des travaux portée par l'entreprise qui réalise les travaux,

- La mission G4 : mission de supervision géotechnique d'exécution portée par le Maître d'ouvrage, et déléguée à son Maître d'œuvre.

La SGP a prévu d'être accompagnée de spécialistes dans le domaine de la géotechnique via des missions de conseil, pour maintenir la vision partagée sur les données géotechniques et les méthodes constructives qu'elle a initié dès les phases amont du projet.

De plus, le Comité de maîtrise des risques, sera consulté dans tous les grands choix techniques qui sont liés à la géotechnique et les méthodes constructives.

## 3. LES PRINCIPAUX ENJEUX GÉOLOGIQUES, HYDROGÉOLOGIQUES ET GÉOTECHNIQUES

Le projet de réalisation du réseau Grand Paris Express s'insère majoritairement 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 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 (forte concentration de carrières dans le périmètre du projet sur la partie sud 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.

- 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 principalement localisé au nord et nord-est du réseau.

- prendre en compte la **présence d'argiles** 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 Types de carrières rencontrés

La présence de carrières fait l'objet de Plan de Prévention des Risques à l'échelle de l'Île-de-France.

Le secteur sud de Paris a été largement exploité pour la construction de Paris jusqu'au XIX<sup>e</sup> siècle, essentiellement à partir de carrières souterraines. On rencontre actuellement d'anciennes carrières qui ont servi à l'extraction de matières premières variées (le calcaire grossier en pierre à bâtir ; le gypse pour le plâtre ; les marnes, craies pour le ciment et la chaux, et les sables pour l'industrie...).

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 :

○ 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 subsister des vides.

#### 3.1.2 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.

**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. 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 des décompressions dans le sol et donc des tassements pouvant remonter en surface et impacter le bâti, situé 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.

#### 3.1.3 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. 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 à ciel ouvert), lorsque cela était compatible avec les objectifs de desserte du projet.

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 sur la majorité des zones concernées en dessous de ces dernières. En effet, le passage au travers d'une carrière souterraine est délicat, du fait de son équilibre précaire, du manque d'homogénéité des terrains traversés et de leur mauvaise qualité, et doit donc se cantonner à des linéaires très faibles nécessitant de ce fait des confortements préalables lourds. D'autre part, pour une grande partie du tracé

l'épaisseur de terrain n'est pas suffisante pour faire passer le tunnel au-dessus de la zone de carrières souterraines

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 devront être réalisés, afin que la stabilité d'ensemble du massif soit préservée. Les études et les investigations à venir permettront d'identifier ces zones.

### 3.1.4 Mesures mises en œuvre

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.
- En phase travaux, pour les zones où les études ont montré la nécessité d'un traitement de carrières : des injections ou comblements des carrières (à ciel ouvert ou souterraines) nécessitant un confortement pourront être réalisées.

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 préexistant 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 ;
- comblement à pied d'œuvre : réalisation du comblement depuis les galeries des carrières, mise en place de murs masques et remplissage par mortier à l'arrière.

### 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, comme décrit au chapitre 2.1

## 3.2 Nappes et circulations souterraines

Le projet Grand Paris Express de par sa profondeur va se situer majoritairement sous nappe. De ce fait, sa réalisation est susceptible de générer différents phénomènes :

- 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.

Le projet Grand Paris Express va traverser différents aquifères ayant leur propre système hydrogéologique : sens d'écoulement, puissance de l'aquifère, perméabilité. Chaque aquifère ne répondra pas de la même façon à la réalisation de ce projet.

### 3.2.1 Impacts de la modification du régime d'écoulement des eaux souterraines

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

- Tassements : l'abaissement du niveau de la nappe peut générer des déformations de terrain en surface.
- Ennoiement des structures enterrées : la hausse du niveau de la nappe peut provoquer des ennoiements 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 les pompes existantes (captage d'eau potable, géothermie, etc.).

### 3.2.2 Prise en compte des enjeux dès la conception

#### - 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.

Pour les gares et tranchées couvertes, la méthode constructive « enceinte étanche » en parois moulées est majoritairement retenue, ce qui limite les venues d'eau horizontales.

En fonction des conditions géologiques (zones à dissolutions de gypse potentielles par exemple), de la sensibilité de la zone en termes environnementales (proximité de zones abritant des espèces protégées ne permettant pas une modification du niveau piézométrique, même temporaire), il peut également s'avérer nécessaire de limiter au maximum les venues d'eau par le fond de fouille. Pour cela un bouchon injecté en sous face du radier sera réalisé. Dans le cas de terrain imperméable en fond de fouille ou de bouchon injecté, l'eau extraite en phase chantier se limite au volume d'eau contenu dans la gare, ainsi que des venues d'eau résiduelles, l'évacuation de ces dernières est toutefois non significative au regard du niveau de la nappe baignant l'ouvrage.

Certaines gares peuvent être réalisées en technique mixte associant la réalisation d'un puits en parois moulées présentant les mêmes caractéristiques que présentées ci-avant, et le reste réalisée en méthode traditionnelle. Cette technique est utilisée lorsque des contraintes de surface ne permettent pas de réaliser la gare uniquement depuis la surface.

La partie puits est similaire au cas d'une enceinte étanche. Pour la partie traditionnelle des pompages en phase chantier s'avèreront nécessaires ; quand le contexte géologique ou environnemental ne permettra pas de rabattre la nappe de façon importante, un traitement d'étanchéité préventive des terrains sera mis en place par injections ou jet-grouting, permettant ainsi de limiter au maximum l'impact des travaux sur le niveau piézométrique de la nappe en présence.

#### - Effet barrage

L'effet barrage induit par la réalisation du tunnel est fonction du sens d'écoulement de la nappe dans laquelle s'insère ce dernier. Cet effet se manifeste par l'abaissement du niveau piézométrique en aval du tunnel et une augmentation du niveau piézométrique en amont de ce dernier. Certaines zones du tracé ont d'ores et déjà été identifiées comme susceptibles d'être le siège d'un tel phénomène (Pont de Sèvres, le Nord de Paris).

Certaines gares ou tranchée couverte peuvent induire un effet barrage non négligeable, qui nécessite la mise en œuvre de mesures spécifiques. En premier lieu, 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 : recepage des têtes de parois moulées, tranchées drainantes, siphons, etc.

- Mise en communication des nappes

La mise sous pression de la chambre d'abattage en tête de tunnelier et l'injection du vide annulaire permettent d'éviter les arrivées d'eau à l'intérieur de l'ouvrage.

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

La technique des parois moulées utilisée pour la majorité des 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.

### 3.2.3 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.

### 3.3 Dissolution du gypse

Le gypse est présent dans certaines couches sédimentaires présentes sur le tracé du Grand Paris Express : Masses et Marnes du gypse, Calcaire de Saint Ouen Sables de Beauchamp ou Marnes et Caillasses, essentiellement par exemple.

La dissolution du gypse se produit lorsqu'il est soumis à un apport d'eau « non chargée en sulfate », ce phénomène peut entraîner soit une dégradation diffuse des caractéristiques mécaniques d'un horizon géologique, soit la création de vides de dissolution accompagnés 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.

#### 3.3.1 Enjeux d'un projet de type métro souterrain liés à la dissolution du gypse

Les enjeux sont de deux natures :

- La présence de zones décomprimées ou de vides dans le sous-sol préexistants sont potentiellement à l'origine des mêmes phénomènes que les carrières souterraines d'origine anthropique (voir détail au chapitre 3.1.2).

De plus dans ce cas particulier, la réalisation d'un projet de type métro souterrain est susceptible d'activer ou de réactiver le phénomène de dissolution du gypse de par la modification éventuelle du régime d'écoulement des nappes d'eau souterraines dans les zones marquées par la présence de gypse. La création de ces vides pouvant avoir des impacts sur les travaux en cours de réalisation (arrêt du tunnelier, adaptation des méthodes constructives au niveau des gares) comme sur le bâti situé dans la zone d'influence hydrogéologique du projet.

- La difficulté des zones de dissolution de gypse résidant le caractère aléatoire de sa répartition, et dans la difficulté de localiser avec certitude leur étendue.

#### 3.3.2 Prise en compte des enjeux dès la conception

Dans un premier temps, 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, 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.).

Dans un deuxième temps, afin d'éviter les phénomènes de dissolution du gypse, la conception du projet Grand Paris Express prévoit de limiter au maximum l'impact du projet sur le régime d'écoulement des nappes dans les zones susceptibles de développer ce phénomène.

La conception et les mesures adoptées pour limiter cet impact sont donc celles décrites au chapitre 3.2.2 récapitulant les méthodes constructives à mettre en œuvre pour ne pas perturber le niveau piézométrique et les sens d'écoulement des nappes.

#### 3.3.2 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 dans ces zones, comme décrit au chapitre 2.1.3.

### 3.4 Retrait et gonflement des argiles

L'argile voit sa consistance se modifier en fonction de sa teneur en eau. Ces variations de consistance s'accompagnent de variations de volume, dont l'amplitude peut s'avérer très importante.

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 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 Île-de-France

#### 3.4.1 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.

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. Le projet du Grand Paris Express recoupe plusieurs formations géologiques argileuses considérées comme fortement sensibles. On citera en particulier les Argiles vertes et les argiles plastiques.

#### 3.4.2 Prise en compte des enjeux dès la conception

Le projet du Grand Paris Express traverse les argiles vertes à l'est de Paris; 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. L'impact lié au retrait/gonflement des Argiles Vertes est donc quasi nul. 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 située entre Arcueil-Cachan et Fort d'Issy, le tunnel s'inscrit partiellement dans cette couche. Comme mentionné précédemment (cf. 3.2.1), la réalisation du tunnel au tunnelier perturbe peu 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 dans les Argiles Plastiques, lors des terrassements en phase chantier, des précautions particulières pourront être mises en place en cas d'intempéries météorologiques (systèmes de drainage et de collecte, protection par des masques ou des écrans d'étanchéité ou des membranes, par exemple), le but étant de limiter l'intrusion d'eau dans la fouille et ainsi minimiser le gonflement des Argiles.

Pour la phase définitive, les radiers des gares seront dimensionnés pour reprendre les efforts de gonflement des Argiles Plastiques.

### 3.4.3 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. LES CAMPAGNES DE RECONNAISSANCES

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 et 2013. Ce sont les problématiques rencontrées le long du tracé qui ont dicté le type de reconnaissances à effectuer.

Au total, pour un tracé de 150 km et comprenant 57 gares (partie sous Maîtrise d'Ouvrage SGP), la campagne d'investigations géotechnique a compris :

- 385 sondages carottés dans lesquels ont été prélevés environ 1 500 échantillons intacts pour la réalisation d'essais en laboratoire;
- 278 sondages pressiométriques avec un essai pressiométrique tous les 1,5 m ;
- 19 forages destructifs avec enregistrement des paramètres de forage.

La profondeur des sondages varie de 20 à 92 m de profondeur, avec une profondeur moyenne s'établissant aux alentours de 45m. L'espacement moyen entre sondages s'établit à environ 350m.

Au droit de chacune des gares, lorsque le contexte urbain le permettait, il a été réalisé 3 sondages carottés et 2 sondages pressiométriques.

La quasi-totalité des sondages carottés et des forages destructifs ainsi que et plusieurs sondages pressiométriques ont été équipés en piézomètres, conduisant ainsi à un total d'environ 450 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.

Les campagnes de reconnaissances pour la mission G12 vont débuter mi-2013 et porteront les investigations à environ 760

sondages carottés, 690 sondages pressiométriques, 180 sondages destructifs, menant ainsi l'espacement moyen entre sondages à environ 150 m, et 5 à 8 sondages par gare.

Le projet Grand Paris Express ayant un développé important en termes de tracé et un planning d'études contraint, six entreprises de travaux de forages mènent à bien ces investigations, avec en moyenne 20 à 30 machines par mois le long des 150 km de tracé. Ces investigations font l'objet d'un contrôle réalisé par l'Assistant à Maîtrise d'Ouvrage en Géotechnique de la SGP afin de garantir la qualité et l'homogénéité de ces dernières.

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 (pour rappel 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).

Le but de ces reconnaissances conséquentes menées dès la phase G11 phase 2, est de permettre de stabiliser le modèle géologique, hydrogéologique et géotechnique le long du tracé au plus tôt afin de statuer sur les méthodes constructives.

Il est reconnu que l'occurrence de désordres et accidents graves en travaux souterrains est inversement proportionnelle à la quantité et à la qualité de reconnaissances engagées lors des phases d'études. La Société du Grand Paris a donc, vu l'échelle du réseau, décidé d'engager d'importantes investigations géotechniques dès les phases amont, ceci dans le but de maîtriser les risques.

La maîtrise des risques est au cœur de l'organisation des études via de multiples regards partagés sur les sujets techniques majeurs (bâti, géotechnique, méthodes constructives). La Société du Grand Paris a l'objectif d'étendre cette culture de la maîtrise des risques à l'ensemble de ses partenaires à venir (Conduite d'opération, Maîtres d'Œuvre, Entreprises).

Pour rappel, le planning des travaux de réalisation du Grand Paris Express a une amplitude de 14 ans (2016 et 2030) comprenant 200 km de linéaire (principalement en tunnel) et 70 gares, avec des mises en service de tronçons s'échelonnant de 2020 à 2030 soit en moyenne 5 à 7 gares par an.

Le Grand Paris Express est un projet d'envergure de par de nombreux aspects ; les investigations géotechniques entreprises en sont un ; elles sont à la hauteur de la volonté de la Société du Grand Paris de maîtriser les risques techniques.