

Journée commune AFTES – CFGI – CFMS
Chantiers linéaires souterrains en site urbain

L'importance des investigations géotechniques

Jacques ROBERT



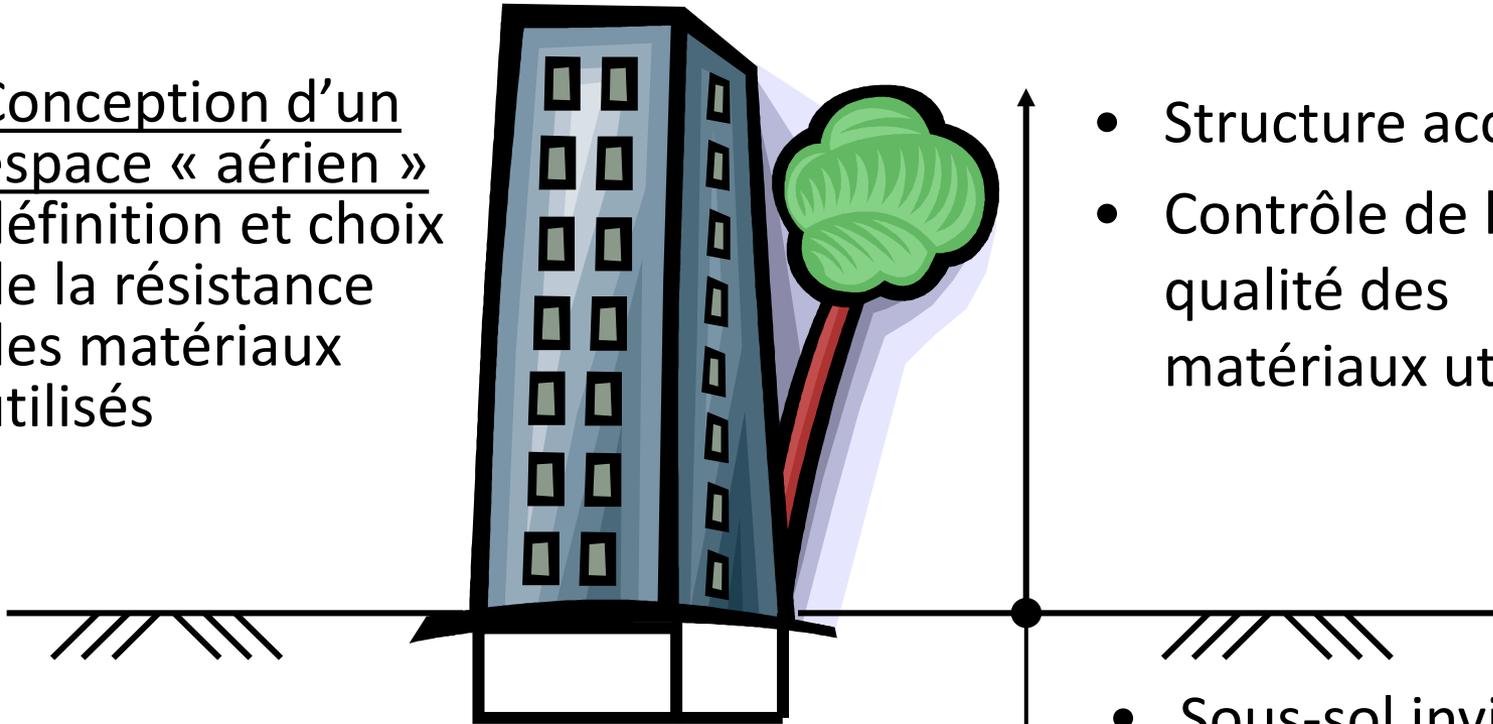
*« On ne commande à la nature
qu'en lui obéissant »*

Francis Bacon

1561 – 1626, philosophe précurseur de
l'empirisme, de la méthode
expérimentale et de la logique inductive

Les spécificités de l'espace souterrain

- Conception d'un espace « aérien » définition et choix de la résistance des matériaux utilisés



- Conception d'un espace souterrain en plus, détermination de l'état initial du sous sol et de son comportement futur

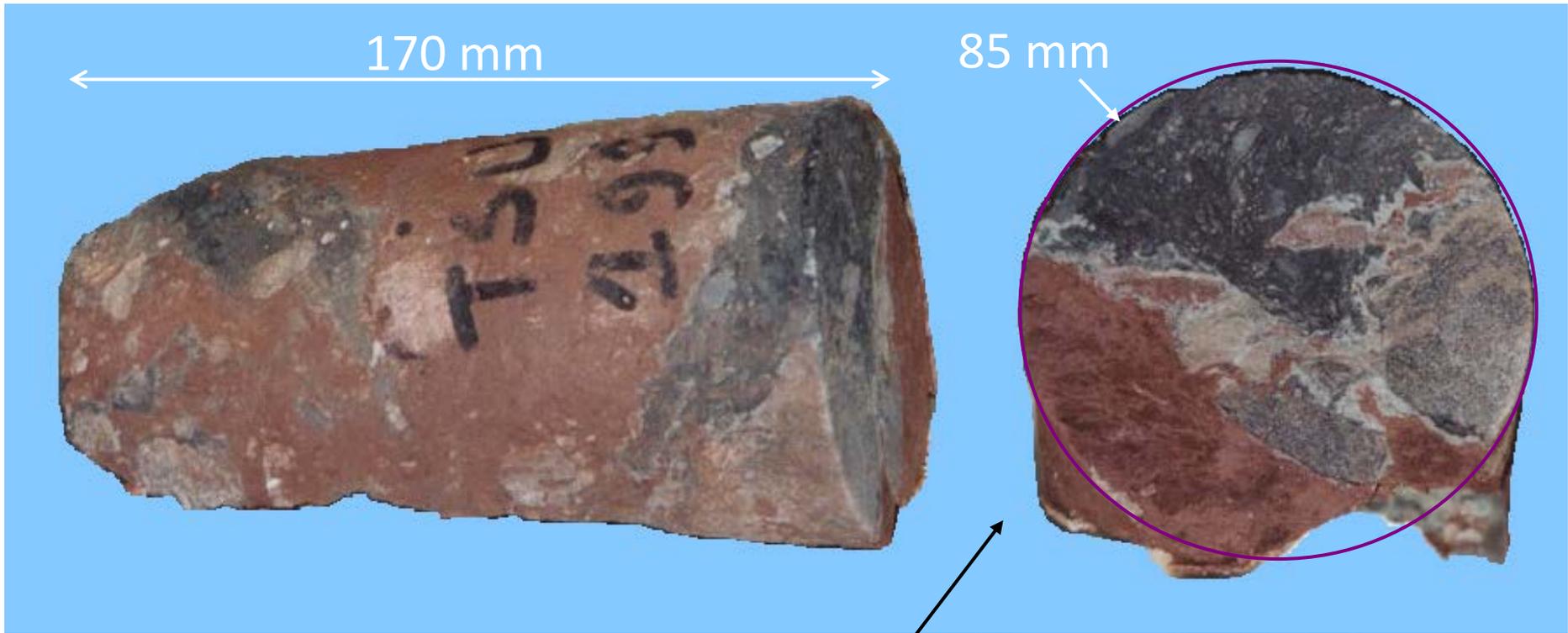
- Structure accessible
- Contrôle de la qualité des matériaux utilisés
- Sous-sol invisible
- Volume reconnu du sous-sol inférieur à $1/10^6$ du volume mobilisé

Un ouvrage souterrain est toujours un prototype

- **Par le contexte géotechnique du site**
sensible à l'anomalie ponctuelle naturelle ou du fait de l'homme
- **Par le contexte de voisinage**
avoisinants souterrains ou en surface, contraintes urbaines
- **Par la méthode de construction**
excavation, soutènement, améliorations de sols

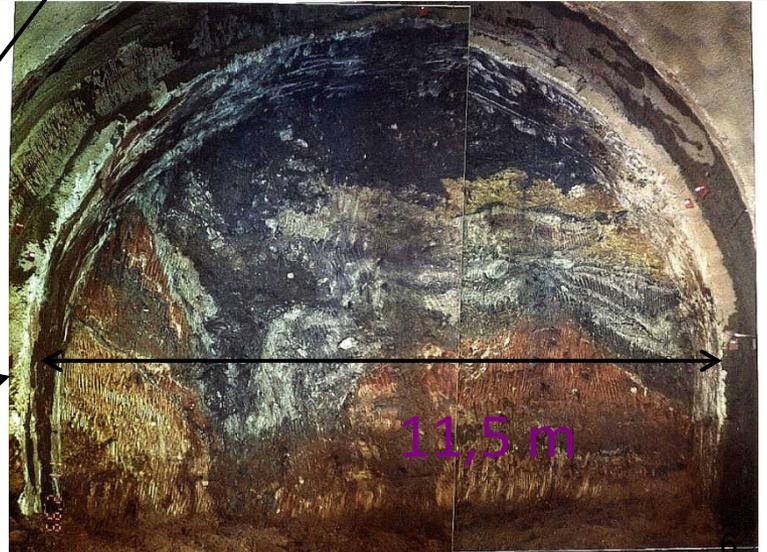
Contexte géotechnique naturellement très complexe

- Nombreuses formations
- Chaque formation a des limites très irrégulières dans l'espace
- Chaque formation peut présenter des lithologies et des caractéristiques géotechniques très hétérogènes
- Présence possible de plusieurs nappes phréatiques plus ou moins indépendantes



Hétérogénéité à l'échelle de l'échantillon et du tunnel

rapport d'échelle : 135



Complexité accrue par l'action de l'homme

- Exploitation des matériaux en carrières à ciel ouvert ou souterraines
- Pollution des nappes et des formations
- Remblaiement non contrôlé et non répertorié de fouilles
- Présence non répertoriée d'ouvrages (anciennes maçonneries, ouvrages souterrains ...)
- Effets néfastes d'ouvrages souterrains existants (déconfinement, accumulation d'eau...)



Évolution du contexte géotechnique avec le temps

- Fluctuation des nappes (naturelle ou artificielle)
- Phénomène de gonflement et de retrait
- Dissolution de matériaux par circulation des nappes (réseaux karstiques, fontis)
- Stabilité des falaises et versants mise en cause par les circulations d'eau et l'érosion
- Secousses sismiques réduisant la portance de certaines formations

Débouché d'un karst en surface



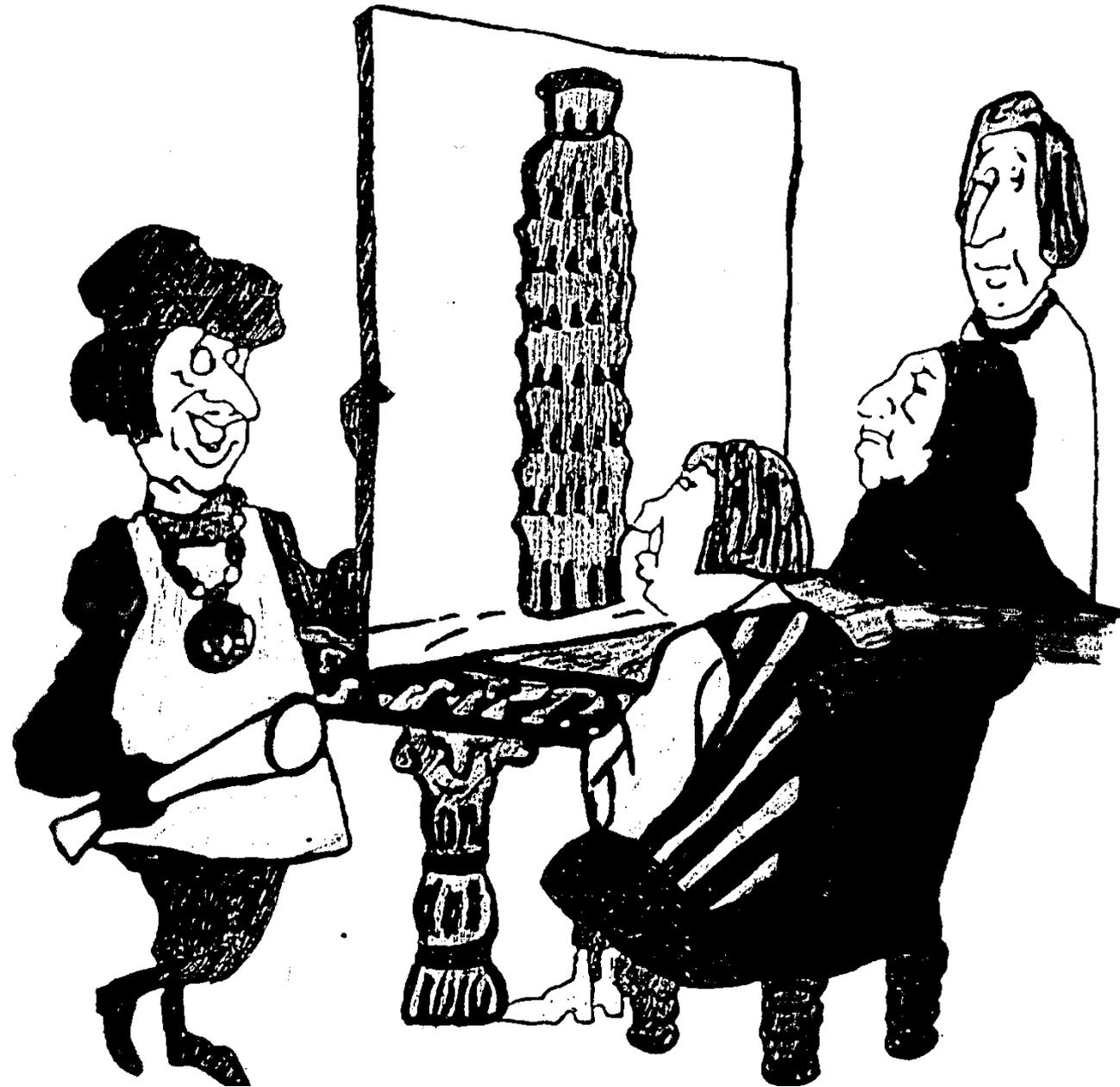
Le voisinage

- ZIG : volume de terrain au sein duquel il y a interaction entre l'ouvrage (du fait de sa réalisation et de son exploitation) et l'environnement (sol et ouvrages environnants). Sa forme et son extension sont spécifiques à chaque site et à chaque ouvrage
- L'étude de l'impact sur le voisinage passe par une bonne connaissance du contexte géotechnique au droit de la ZIG, des ouvrages avoisinants (structure et conditions de fondation)
- La limitation de l'impact sur le voisinage passe par la maîtrise des poussières, des bruits, des vibrations, des déformations du terrain, des fluctuations de nappes...

Facteurs d'accroissement des risques pour les ouvrages souterrains

- Mobilisation des compétences allégée en amont
- Terrains disponibles médiocres et voisinage sensible
- Ouvrages complexes, de performance élevée
- Modification de programme
- Délais d'études et de travaux trop raccourcis
- Phases provisoires non étudiées
- Qualité d'exécution mal surveillée
- Maintenance et suivi négligés, voire inexistant

« nous avons gagné
3 semaines en ne
faisant pas les
investigations
géotechniques »



Face à cette complexité géotechnique, que faire pour les ouvrages souterrains ?

- réaliser les études et les investigations par étapes successives en phase conception, avec application de la conception interactive
- faire un suivi géotechnique pendant la phase construction
- définir la maintenance et l'auscultation nécessaires pendant l'exploitation
- D'où une meilleure maîtrise des risques liés aux incertitudes restantes, aux variabilités des paramètres et aux aléas

Enchaînement des missions d'ingénierie géotechnique

Enchaînement des missions G1 à G4	Phases de la maîtrise d'œuvre	Mission d'ingénierie géotechnique (GN) et Phase de la mission		Objectifs à atteindre pour les ouvrages géotechniques	Niveau de management des risques géotechniques attendu	Prestations d'investigations géotechniques à réaliser
Etape 1 : Etude Géotechnique Préalable (G1)		Etude géotechnique préalable (G1) Phase Etude de site (ES)		Spécificités géotechniques du site	Première identification des risques présentés par le site	Fonction des données existantes et de la complexité géotechnique
	Etude préliminaire / Esquisse, APS	Etude géotechnique préalable (G1) Phase Principes généraux de construction (PGC)		Première adaptation des futurs ouvrages aux spécificités du site	Première identification des risques pour les futurs ouvrages	Fonction des données existantes et de la complexité géotechnique
Etape 2 : Etude Géotechnique de Conception (G2)	APD / AVP	Etude géotechnique de conception (G2) Phase Avant-projet (AVP)		Définition et comparaison des solutions envisageables pour le projet	Mesures préventives pour la réduction des risques identifiés,	Fonction du site et de la complexité du projet (choix constructifs)
	PRO	Etude géotechnique de conception (G2) Phase Projet (PRO)		Conception et justifications du projet	mesures correctives pour les risques	Fonction du site et de la complexité du projet (choix constructifs)
	DCE / ACT	Etude géotechnique de conception (G2) Phase DCE/ACT		Consultation sur le projet de base / Choix de l'entrepreneur et mise au point du contrat de travaux	résiduels avec détection au plus tôt de leur survenance	
Etape 3 : Etudes Géotechniques de Réalisation (G3 / G4)		à la charge de l'entreprise		à la charge du maître d'ouvrage		
	EXE/VISA	Etude et suivi géotechniques d'exécution (G3) Phase Etude (en interaction avec la phase Suivi)	Supervision géotechnique d'exécution (G4) Phase Supervision de l'étude d'exécution (en interaction avec la phase Supervision du suivi)	Etude d'exécution conforme aux exigences du projet, avec maîtrise de la qualité, du délai et du coût	Identification des risques résiduels, mesures correctives, contrôle du management des risques résiduels (réalité	Fonction des méthodes de construction et des adaptations proposées si des risques identifiés surviennent
	DET/AOR	Etude et suivi géotechniques d'exécution (G3) Phase Suivi (en interaction avec la phase Etude)	Supervision géotechnique d'exécution (G4) Phase Supervision du suivi d'exécution (en interaction avec la phase Supervision de l'étude)	Exécution des travaux en toute sécurité et en conformité avec les attentes du maître d'ouvrage	des actions, vigilance, mémorisation, capitalisation des retours d'expérience)	Fonction du contexte géotechnique observé et du comportement de l'ouvrage et des avoisinants en cours de travaux
A toute étape d'un projet ou sur un ouvrage existant (G5)	Diagnostic	Diagnostic géotechnique (G5)		Influence d'un élément géotechnique spécifique sur le projet ou sur l'ouvrage existant	Influence de cet élément géotechnique sur les risques géotechniques identifiés	Fonction de l'élément géotechnique étudié

Objectif des investigations géotechniques : connaître les facteurs influant sur la conception des tunnels

Facteurs géologiques

- degré de complexité des structures géologiques (adaptation des méthodes, gestion des risques)
- Discontinuités, failles, vallées fossiles (distribution spatiale, résistance des discontinuité, détection)
- Champs de contraintes initiales (écaillage, déformations, efforts à reprendre)
- Stabilité de versant (rigidité transversale, joints longitudinaux)
- Risque sismique (joints, efforts)
- Présence de gaz (gestion du risque chantier et en exploitation)
- Hétérogénéité des formations (naturelle et/ou artificielle, risque de surexcavation)

Objectif des investigations géotechniques : connaître les facteurs influant sur la conception des tunnels

Facteurs hydrogéologiques

- connaissance des nappes (charge hydrostatique, fluctuations saisonnières, circulations, perméabilité de matrice ou de fissures, vitesse d'écoulement, débits, importance du réservoir, réalimentation)
- Risque de dissolution (karst)
- risque d'entraînement de fines (tassements)
- Agressivité de l'eau vis à vis des injections, du béton
- Pollutions éventuelles

Objectif des investigations géotechniques : connaître les facteurs influant sur la conception des tunnels

- Facteurs géotechniques

- tenue à l'ouverture (cohésion c , résistance σ_c , granularité, teneur en eau w)
- tassements (E , c , ω)
-
- stabilité du front (σ_σ , u , cu)
- abattage (σ_c , abrasivité, dureté, granularité, collage)
- avancement de la jupe d'un tunnelier (cu , gonflement, dilatance)
- marinage
- évolution du comportement dans le temps (altération, déconfinement)

3 conditions pour réaliser des investigations pertinentes

- Prévoir une progressivité qui suit l'avancement de la conception, pour une réduction optimale des incertitudes
- Dégager le temps nécessaire pour les réaliser
- Obtenir l'accessibilité des points d'investigations

Progressivité des objectifs des investigations géotechniques

- En phase d'étude préliminaire (mission G1)
 - Définir un modèle géologique préliminaire
 - Définir les principales caractéristiques géotechniques
 - Faire une première identification des risques majeurs
 - Proposer les caractéristiques géométriques les mieux adaptées au contexte géotechnique ainsi que les principes généraux de construction envisageables
- En phase d'avant-projet (phase AVP de la mission G2)
 - Préciser le contexte géotechnique du site, avec les hypothèses géotechniques à prendre en compte
 - Définir les contraintes générales (ZIG, principaux risques)
 - Choisir les caractéristiques géométriques envisageables (tracé, profil en long, section transversale)

Progressivité des objectifs des investigations géotechniques

- En phase de projet (phase PRO de la mission G2)
 - Fournir un dossier de synthèse des hypothèses géotechniques
 - Donner les caractéristiques géométriques retenues
 - Donner les méthodes de construction préconisées
 - Définir la ZIG et les risques identifiés pour l'ouvrage et les avoisinants
 - Dimensionner les ouvrages
 - Proposer des valeurs seuils et les conditions d'application de la méthode observationnelle
- En phase travaux (missions G3 et G4)
 - Définir les hypothèses géotechniques pour les études d'exécution, les vérifier
 - Valider les méthodes et conditions d'exécution retenues, les valeurs seuils, les dispositions constructives complémentaires éventuelles et leur mise en œuvre à temps si nécessaire

Progressivité des investigations géotechniques : du global au ponctuel (zoom)

1 Collecte des données existantes : étude documentaire

- cartes géologiques, hydrogéologiques, topographiques, photos aériennes
- cartes des risques naturels, des carrières
- données archéologiques
- réseaux et ouvrages enterrés existants
- banque de données du sous-sol
- études existantes, archives d'ouvrages existants
- données sur le bâti, données climatiques

2 Levés de terrain

- affleurements, failles, fracturation, schistosité, glissements, effondrements
- sources, puits, infiltrations, végétation

3 Géophysique

- sismique réfraction, sismique réflexion, résistivité électrique, gravimétrie, radar
- sismique entre forages, cross-hole

4 Sondages et essais in situ

- sondages carottés avec prélèvement d'échantillons de terrain et d'eau
- sondages destructifs avec enregistrement des paramètres de forage et diagraphies (RAN, microsismique, imagerie de paroi)
- essais hydrogéologiques in situ: pertes, artésianisme, perméabilité (Lefranc, Lugeon, pompage, écoulements, piézomètres, capteurs de pression)
- essais mécaniques : pressiomètre, dilatomètre, SPT, CPT, surcarottage, borehole slotter, fracturation hydraulique

5 Essais en laboratoire

- essais d'identification (w , γ , G+S, ES, IP, Vb, minéralogie, abrasivité)
- essais de rupture (dégradabilité, dureté, Rc, triaxial, cisaillement)
- essais de déformation (oedomètre, triaxial)

6 Puits et/ou galerie de reconnaissance

- relevés structuraux, relevé des arrivées d'eau et des débits dans le temps, effets sur la piézométrie
- essais de déformation (plaque, vérin plat), de rupture (boîte de cisaillement)
- auscultation pour suivi des déplacements et des efforts dans les soutènements (rétro-analyse)
- peut être utilisé comme ouvrage de service

7 Suivi en phase Travaux

- Levés de front, mesures de débits, suivis piézométriques
- Reconnaissances à l'avancement
- Analyse des paramètres de creusement
- Auscultations de l'ouvrage, de l'encaissant, de la surface, des avoisinants
- Rétroanalyses
- Capitalisation des retours d'expérience

Densité des investigations géotechniques pour quelques projets de métro

Projet	Longueur (km)	Durée sondages G1	Inter distance Moyenne G1	Durée sondages G2	Inter distance moyenne G1+G2
Ligne b Métro de Rennes	13.1	15 mois	83 m	31 mois	40 m
Grand Paris Express T2	23	33 mois	48 m		38 m
Grand Paris Express T3	12	29 mois	36 m	6 mois	28 m
Prolongement L14 lot 1 Paris	3.9		260 m		42 m
Prolongement L14 Lot 2 Paris	2,5		125 m		30 m
Prolongement L4	2				27 m

Corrélation entre coût des études + investigations et coût avéré des risques pour plusieurs projets de tunnels

