

LEVÉS GÉOLOGIQUES ET HYDROGÉOLOGIQUES DE TERRAIN POUR LES OUVRAGES SOUTERRAINS

Objectifs, spécifications, organisation contractuelle



AVERTISSEMENT

Les guides sont l'aboutissement de travaux de synthèse, de réflexion méthodologique, de recherche, de retour d'expérience, menés ou commandités par le CETU. Ils ont vocation à servir de référence pour la conception, la réalisation ou l'exploitation des ouvrages souterrains. Comme tout état de l'art à un moment donné, un guide peut toutefois devenir un jour obsolète, soit du fait de l'évolution des techniques ou des réglementations, soit par la mise au point de méthodes plus performantes.

LEVÉS GÉOLOGIQUES ET HYDROGÉOLOGIQUES DE TERRAIN POUR LES OUVRAGES SOUTERRAINS

Objectifs, spécifications, organisation contractuelle

décembre 2021

Centre d'Études des Tunnels

25, avenue François Mitterrand

69500 BRON – France

Tél. 33 (0)4 72 14 34 00

Fax. 33 (0)4 72 14 34 30

cetu@developpement-durable.gouv.fr

www.cetu.developpement-durable.gouv.fr

TABLE DES MATIÈRES

1 INTRODUCTION	5
2 PRÉPARATION DES LEVÉS DE TERRAIN	6
2.1 Définition de la zone d'étude géologique et hydrogéologique	6
2.2 Consistance de la préparation	7
3 RÉALISATION ET ENREGISTREMENT DES LEVÉS DE TERRAIN	9
3.1 Consistance du parcours du terrain	9
3.2 Enregistrement des informations collectées	10
4 EXPLOITATION ET SYNTHÈSE DES LEVÉS DE TERRAIN	13
5 ORGANISATION CONTRACTUELLE	14
6 GLOSSAIRE	16
7 BIBLIOGRAPHIE	17
8 ANNEXES	18

INTRODUCTION

L'état de l'art des études géotechniques consacre l'importance de la visite de site : la norme NF P94-500 et la recommandation GT43R1F1 de l'AFTES mettent en avant la nécessité de cette visite, notamment pour les premières phases d'étude d'un ouvrage souterrain. Plusieurs niveaux de visite sont possibles allant de l'aperçu du terrain pour en vérifier la bonne accessibilité et la correspondance vis-à-vis des travaux projetés jusqu'à une enquête géologique et hydrogéologique approfondie. Une telle enquête approfondie forme les levés de terrains à proprement parler. Ils donnent accès aux informations uniquement accessibles sur site par un œil expert pour mettre en place, asseoir et justifier les modèles géologique et hydrogéologique.

Lors des premières phases d'étude d'un ouvrage souterrain, l'élaboration de ces modèles est déterminante pour les implantations d'ouvrages, les choix de tracés et les méthodes constructives envisagées. D'abord ébauches conceptuelles basées sur les éléments bibliographiques existants, ces modèles deviennent interprétatifs avec les informations disponibles sur le terrain telles la géomorphologie, les affleurements, les indices d'anomalie ou de présence d'eau. Les levés de terrains forment les premières reconnaissances faciles à réaliser. Ils ne nécessitent pas d'installation ou d'organisation particulière.

Un vide prescriptif est cependant observé entre d'un côté les normes et recommandations décrivant ces études géologiques préliminaires comme indispensables, sans clairement en expliciter les contenus, et d'un autre côté les publications académiques qui expliquent l'observation naturaliste sans définir précisément leur enregistrement et leur utilisation.

C'est ce vide que ce guide vise à combler. Adressé principalement aux maîtres d'ouvrage, il formalise le contenu des missions de levés géologiques et hydrogéologiques de terrain. Organisés la plupart du temps dans les premiers moments d'une étude, les objectifs principaux des levés géologiques et hydrogéologiques de terrain sont :

- la collecte de manière exhaustive des informations disponibles uniquement sur le terrain (géomorphologie, affleurements, eau, indices d'anomalies), leur enregistrement et leur exploitation ;
- l'élaboration ou la consolidation des modèles géologique et hydrogéologique interprétatifs pour le projet. Pendant de cet objectif principal, deux objectifs corollaires peuvent être ajoutés. Le premier est l'identification des incertitudes majeures susceptibles d'être sources de risques compte tenu des travaux envisagés. Le second est l'élaboration du programme de reconnaissances (autre que levés de terrain) par moyens géophysiques, sondages, etc.

Les levés de terrain dits « initiaux » sont réalisés dès les premières phases d'étude (études géotechniques préalables G1 ES¹ « étude de site » puis G1 PGC « principes généraux de construction » afin de définir les risques géotechniques). Ils sont dits « complémentaires » lorsqu'ils sont réalisés lors d'une phase ultérieure pour compléter les connaissances existantes (étude géotechnique préalable G1 ou étude de conception G2¹).

Pour organiser ces levés de terrain, trois phases sont distinguées :

- 1. Une phase de préparation.** Cette phase permet de prendre connaissance du contexte géologique et hydrogéologique afin d'amorcer la conceptualisation du terrain qui fait l'objet des levés. Bien entendu, cette phase de préparation comprend tout d'abord une étude portant sur la recherche et la synthèse des connaissances existantes. Il est ensuite opportun de la prolonger par une étude photo-interprétative.
- 2. Une phase de réalisation et d'enregistrement.** C'est lors de cette phase que le terrain est parcouru de manière la plus exhaustive. Le compte-rendu de cette phase comporte le report de l'ensemble des observations.
- 3. Une phase d'exploitation, d'interprétation et de synthèse.** À partir des données issues de la phase de préparation et des données collectées sur le terrain, exploitées et enregistrées, des interprétations doivent être proposées. La plus importante de ces exploitations est la synthèse géologique et hydrogéologique qui retranscrit les modèles géologique et hydrogéologique interprétatifs. Ainsi, le rapport de la mission reprend l'ensemble des données collectées et les synthèses produites. Il est clair qu'aujourd'hui le numérique est incontournable : les observations ont vocation à être synthétisées en tables de données et les éléments cartographiques à être élaborés à l'aide d'un système d'information géographique (SIG). L'objectif visé est de capitaliser l'information et de favoriser son appropriation pour la suite des études.

Ce guide aborde ainsi les points suivants :

- les préparatifs aux missions de terrain que sont les missions d'étude bibliographique et d'étude photo-interprétative ;
- la réalisation des levés géologiques et hydrogéologiques de terrain, leur enregistrement et leur exploitation ;
- l'organisation contractuelle de ces missions de terrain pour en assurer le bon déroulement et la qualité.

1. Au sens de la norme NF P94-500.

PRÉPARATION DES LEVÉS DE TERRAIN

Pour que les levés de terrain soient exhaustifs et pertinents, une phase préparatoire s'avère nécessaire. Cette phase permet non seulement l'appropriation des éléments disponibles, de situer les grandes unités géologiques, leurs relations,

les principaux accidents et l'histoire géologique (mise en en place des terrains, tectonique, géomorphologie), mais aussi de se projeter sur le terrain via les données d'images aériennes.

2.1 DÉFINITION DE LA ZONE D'ÉTUDE GÉOLOGIQUE ET HYDROGÉOLOGIQUE

La zone d'étude géologique et hydrogéologique (Fig. 1) est la zone au sein de laquelle les informations collectées seront utiles à l'élaboration des modèles géologique et hydrogéologique. Nécessairement plus étendue que la zone d'influence géotechnique (ZIG*) pour pouvoir justement la justifier, la zone d'étude dépend des structures géologiques et hydrogéologiques (bassins versants hydrogéologiques) susceptibles d'intéresser le projet.

À l'issue de la phase de préparation des levés, lorsque sa connaissance des structures géologiques est établie sur base documentaire, le prestataire propose une définition du périmètre de la zone d'étude. Ce périmètre est également confirmé à l'issue des levés de terrain. Si nécessaire lors de l'élaboration d'un marché, en plus des éléments géométriques du projet avec leurs possibles variations, le maître d'ouvrage peut définir une zone d'étude a priori qui a vocation à être ajustée par le prestataire à l'issue de la phase de préparation.

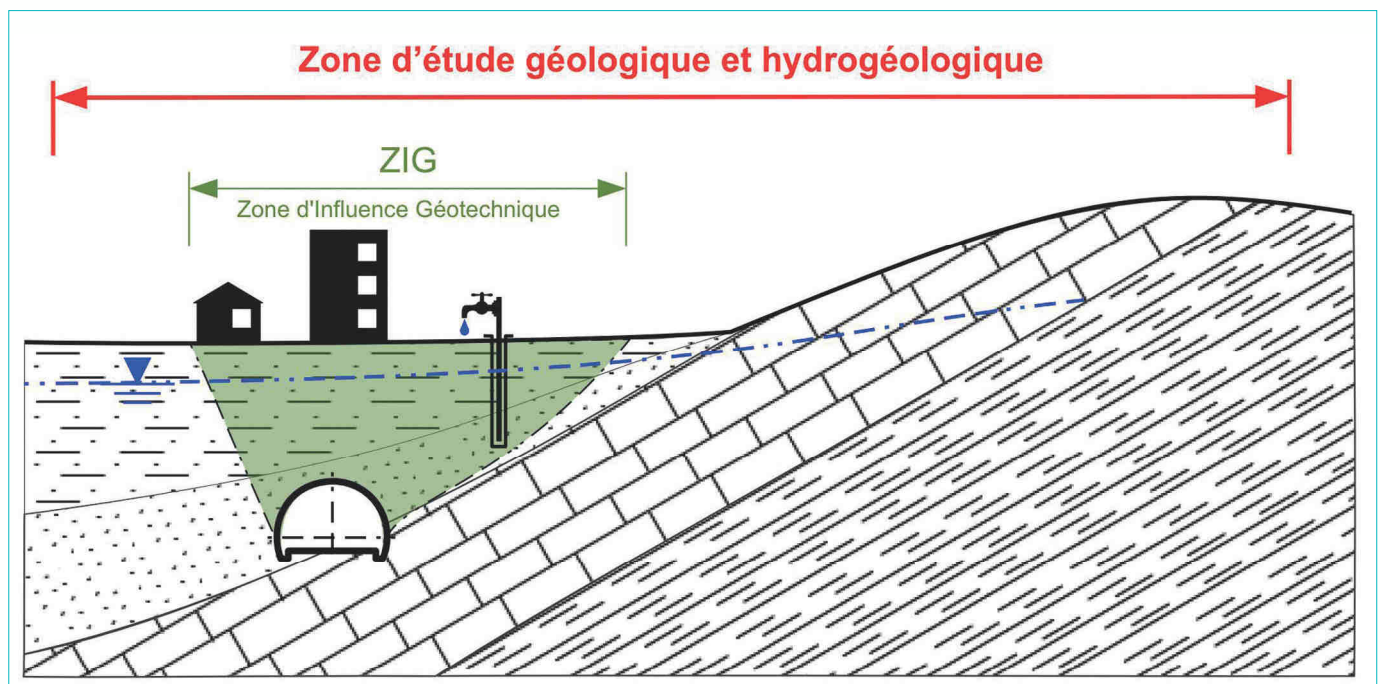


Figure 1 : Définition de la zone d'étude géologique et hydrogéologique par rapport à la Zone d'Influence Géotechnique (ZIG*).

La zone d'étude englobe toutes les structures géologiques et hydrogéologiques susceptibles d'intéresser le projet. Cette zone de recherche élargie contribue à la définition des contours de la ZIG*.

2.2 CONSISTANCE DE LA PRÉPARATION

Dans le cas des levés de terrain initiaux et avant tout déplacement sur le terrain, le prestataire doit disposer au minimum d'une synthèse des connaissances existantes et d'une étude photo-interprétative. Ces deux études sont incluses dans la prestation « levés de terrain » et forment la phase préparatoire. Elles peuvent également être commandées séparément au préalable comme missions spécifiques.

Recherche et bilan des connaissances

Ce bilan est réalisé sur la base de cartes topographiques, géologiques et hydrogéologiques existantes, d'anciennes études, d'articles, thèses, etc. Synthétisées, ces études permettent de préparer la description des terrains rencontrés ainsi que leur organisation générale (toponymie, morphologie, stratigraphie, contexte structural, organisation hydrogéologique). Le livrable (note de synthèse des connaissances) de cette étude comprend les chapitres suivants :

- **Données** : les données d'entrées non seulement sous forme d'une liste des références consultées mais également un répertoire numérique comprenant les documents associés ;
- **Géologie** : un chapitre décrivant le contexte structural, le log lithologique* et les caractéristiques des terrains susceptibles d'être rencontrés ;
- **Hydrogéologie** : un chapitre décrivant la présence d'aquifères, les écoulements et les connections, les régimes saisonniers, la présence de sources et les valeurs de perméabilités disponibles.

Étude photo-interprétative*

Les données préférentielles pour l'étude photo-interprétative sont les images satellitaires, aériennes ou acquises depuis un drone. Elles sont exploitées en vision directe et/ou stéréoscopique (plus riche d'informations). Lorsque leur disponibilité le permet, il est conseillé de disposer d'images d'échelles et de dates différentes. Avoir au moins deux échelles différentes permet une vue synthétique contextuelle (petite échelle de l'ordre du 1/30 000 ou plus) et une vue de détail (grande échelle de l'ordre du 1/10 000). Des images de dates sensiblement différentes permettent une exploitation multi-date pour déterminer l'évolution du site dans le temps. Les images aériennes d'archive de l'IGN sont librement accessibles sur le site remonterletemps.ign.fr.

En complément des images aériennes, des images ombrées de la topographie issues de modèles numériques de terrain (MNT*, issus de campagnes LiDAR* ou photogrammétriques) peuvent être utilisées ou encore les lignes de niveau issus d'un MNT très précis. Une attention particulière doit toutefois être portée à ce que leur exploitation ne soit pas qu'automatique.

L'étude de ces données permet d'analyser la géomorphologie du terrain (délimitations des unités lithologiques et structurales par photo-géomorphologie*, failles, plis), de décrire les linéaments* et le réseau hydrographique, d'identifier des évolutions géodynamiques récentes ou actives (néotectonique, glissements de terrain observables par des ruptures de pente), de détecter toutes les anomalies observables (dues à des affaissements, karsts, anciennes carrières, changement de type de végétation, d'humidité, variations de pentes, etc.).

En plus de la livraison d'une table de données et d'une carte (réalisation d'un SIG*, Fig. 2) reprenant de manière catégorisée l'ensemble des observations réalisées, une note photo-interprétative est fournie au format papier et numérique, comprenant :

- **les données d'entrée** que sont les références des photographies, leurs tirages papier ;
- **les minutes d'observation** des photographies et MNT* avec légende et commentaires indexés ;
- **une synthèse** décrivant les unités lithologiques et structurales, du réseau hydrographique, des linéaments et des anomalies observés. Les directions des linéaments sont synthétisées sur un stéréogramme avec pondération de leurs longueurs pour en déterminer les grandes familles.

Que ce soit dans le cadre de levés de terrain initiaux ou complémentaires, cette phase préparatoire se conclut par la production d'un rapport de synthèse. Celui-ci fait le bilan des connaissances obtenues par la recherche d'informations et l'étude photo-interprétative. Cette synthèse permet de confirmer l'étendue de la zone d'étude. Des ébauches conceptuelles de modèles géologiques et hydrogéologiques sont présentées qui forment une première étape d'élaboration des modèles géologique et hydrogéologique interprétatifs. Enfin, les zones critiques à lever prioritairement sont listées pour confirmer, compléter ou au contraire modifier les points les plus délicats des modèles ébauchés.

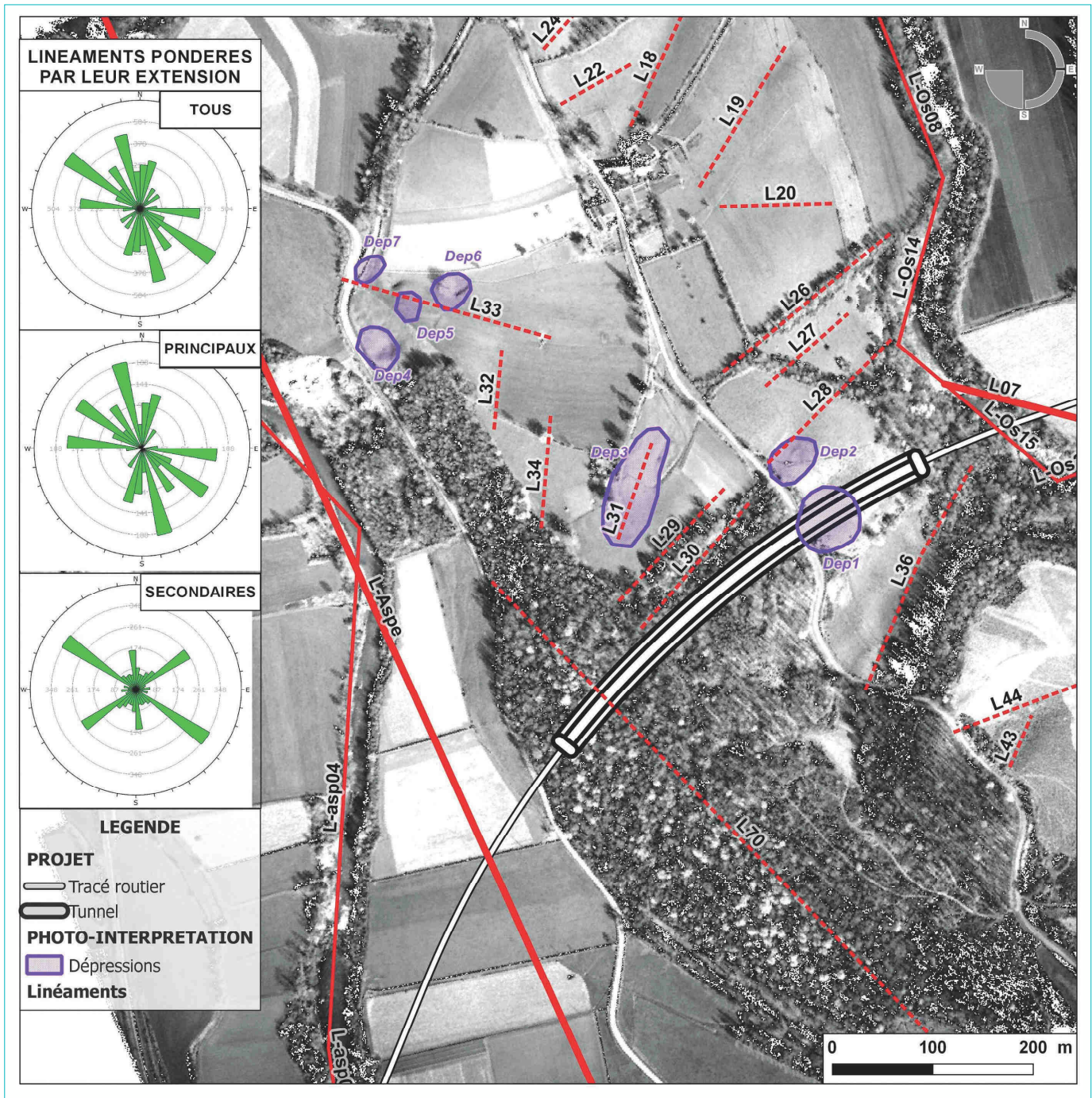


Figure 2 : Exemple de livrable SIG de l'étude photo-interprétative.

Les linéaments (catégorisés selon leur importance) et les anomalies forment chacun des couches vectorielles intégrées dans un SIG*. Les directions des linéaments ainsi catégorisés sont exploitées de manière statistique (dans l'exemple présent sur une zone d'étude plus large que la zone rapprochée du tunnel ici figurée).

RÉALISATION ET ENREGISTREMENT DES LEVÉS DE TERRAIN

Le levé de terrain est la reconnaissance de surface basée sur une cartographie à grande échelle (classiquement du 1/10 000 à 1/250, jusqu'à 1/100 pour les entrées en terre). Dans sa première étape, le levé de terrain permet la mise en adéquation des descriptions bibliographiques avec l'observation *in situ*. Les étapes suivantes visent à recueillir et enregistrer de manière exhaustive l'ensemble des informations disponibles uniquement sur le terrain. La cartographie réalisée pour un ouvrage souterrain diffère de celle réalisée pour une carte géologique générale car directement

orientée ingénierie : les caractéristiques des terrains sont considérées en plus de leur lithologie et de leur structure tels leur degré d'altération ou leur différenciation géotechnique au sein même d'une formation géologique donnée.

Une attention particulière doit être portée à l'état des formations en surface. Souvent peu ou irrégulièrement documentées, la caractérisation de ces terrains (notamment l'altération) intéresse particulièrement les ouvrages souterrains dans les zones de faible couverture et au niveau des entrées en terre.

3.1 CONSISTANCE DU PARCOURS DU TERRAIN

Le plus exhaustif possible, le parcours du terrain est guidé par sa préparation. La première étape d'appropriation du terrain vise à l'élaboration d'une ou plusieurs coupes générales afin d'identifier les différents terrains et vérifier, corriger, compléter les limites géologiques ébauchées lors de la préparation.

D'un point de vue géologique, le parcours comprend au minimum l'examen de l'ensemble des indices issus du bilan des connaissances et de l'étude photo-interprétative pour confirmer/infirmier leur existence. D'autres points d'observations complètent ce parcours selon les nécessités et la complexité du site. Le levé de terrain représente le moment privilégié où le géologue construit et confronte la représentation de la géologie du terrain, de sa structure avec les points d'observations* qui sont :

- des interprétations de panoramas, faisant le lien entre le paysage et l'analyse de la carte ;
- des analyses (levés) d'affleurement.

Concernant l'hydrogéologie, le parcours inclut au minimum la visite de l'ensemble des sources et des cours d'eau repérés lors de la phase de préparation.

Concernant les avoisinants, le géologue profite du parcours pour inventorier et photographier les avoisinants (même lointains) au projet.

Les informations collectées sur les affleurements doivent permettre de décrire de manière détaillée le log lithologique*, les éléments structuraux (discontinuités) et d'éventuelles singularités : cavités karstiques, gros blocs dans une formation de sols fins, zones faillées et broyées, poches d'altération dans une roche saine, venues d'eau ponctuelles, zones humides, etc.

3.1.1 Panoramas

Les panoramas font partie intégrante des levés de terrain. Ces vues d'ensemble sur tout ou partie de la zone de levé sont interprétées suivant les unités structurales, discontinuités majeures, etc. Ils permettent de fournir des informations importantes lorsque la géologie est visible et pour partie interprétable notamment dans des secteurs difficiles d'accès.

3.1.2 Consistance du levé d'affleurement

La cartographie des points d'observation consiste à recenser tous les affleurements levés en délimitant leur extension réelle ainsi que la localisation des points de vue analysés. Cette cartographie permet de rendre compte immédiatement des faits (les affleurements et les panoramas) sur lesquels repose l'interprétation. Les zones inaccessibles seront naturellement mises en exergue ainsi que les secteurs complexes par la multiplication des points d'observation proches.

Le levé de l'affleurement débute par sa description contextuelle qui comprend des photographies et un schéma interprétatif d'affleurement ou de panorama pour décrypter et restituer l'observation. Le levé se concentre ensuite sur la description des terrains rocheux, des terrains meubles et des conditions hydrogéologiques observées :

- concernant les terrains rocheux, la description comprend la caractérisation descriptive du massif rocheux, de sa matrice et des discontinuités suivant les termes du dictionnaire de géologie (Foucault et al., 2014), de la recommandation GT1 de l'AFTES et de la norme ISO 14 689.

Le massif est décrit dans son ensemble avec son altération. La matrice est précisée selon sa pétrographie et minéralogie issues de la carte géologique ou de l'interprétation *in situ*. Les faciès représentatifs sont échantillonnés pour analyses et essais ultérieurs. Les discontinuités sont caractérisées en identifiant les différentes familles, en estimant les extensions et les fréquences de fracturation, avec mesures des vecteurs pendages, en observant globalement les ouvertures (éventuels remplissages ou broyage) et la présence d'eau. Les descriptions plus détaillées basées sur la réalisation de lignes de mesure permettant la réalisation de statistiques quant aux espacements, extensions, rugosités, ouvertures, et remplissages relèvent de levés complémentaires ;

- concernant les terrains meubles, leur description est réalisée selon les normes ISO 14 688. Cette description comprend au minimum les caractérisations descriptives minéralogique et granulométrique des éléments durs présents dans le terrain (sans oublier le diamètre maximal) ;
- concernant les conditions hydrogéologiques, la description comprend la localisation des sources, des pertes, l'extension des zones humides, et l'estimation des débits et des niveaux d'eau associés. Le suivi des niveaux d'eau, des températures et des conductivités relève d'une mission spécifique.

À l'issue de ces observations, l'affleurement est rattaché à une entité du log lithologique*.

3.2 ENREGISTREMENT DES INFORMATIONS COLLECTÉES

Les informations collectées sur chaque point d'observation sont reprises intégralement dans une fiche de levé (Fig. 3). Cette fiche comprend le numéro du point d'observation, son positionnement XYZ, son rattachement au log lithologique, les photographies d'affleurement, de panorama ou des avoisinants présents, un schéma interprétatif, la description des terrains et des conditions hydrogéologiques. Un stéréogramme peut être inclus pour compléter la description des discontinuités. Une table de données des points d'observation est élaborée.

Par ailleurs intégrés au SIG, tous les éléments graphiques et photographiques sont également fournis séparément au format numérique avec un nommage explicite.

Le parcours du terrain (Fig. 4) est enregistré dans une table de données (SIG) et une carte est produite représentant le chemin suivi, les points d'observation et l'extension des affleurements observés, et les mesures principales (stratification, schistosité, failles majeures).

Type et numéro du point d'observation	AFFLEUREMENT		C05		
Date du levé	26/02/2017	X Y Z (L93-RGF93)	308259	5237265	239
Localisation	En rive gauche de la rivière.				
Descriptions, commentaires, mesures (convention vecteur pendage)	<p>Une alternance calcaires/marnes (c4, Coniacien) avec dominante calcaire apparaît susjacent à un faciès marneux épais (env. 2 m) et quasiment argileux localement (bas gauche de la photo).</p> <p>Mesures stratigraphie : N20 42°, N19 37°, N19 43° Mesures diaclases : - N87 82°, N83 80°, N85 87°, N78 75°, N90 78° - N192 46°, N194 48°</p>				
Photographie (s)	<p>En haut à droite, alternance calcaire avec très fins bancs de marnes (c4, Coniacien). En bas à gauche, présence d'un banc marneux /argileux de 2 m d'épaisseur.</p>				
Schéma					

Figure 3 : Exemple de fiche de levé.

Chaque point d'observation possède sa propre fiche de levé dans laquelle sont rassemblées les localisations, descriptions, photographies et interprétations.

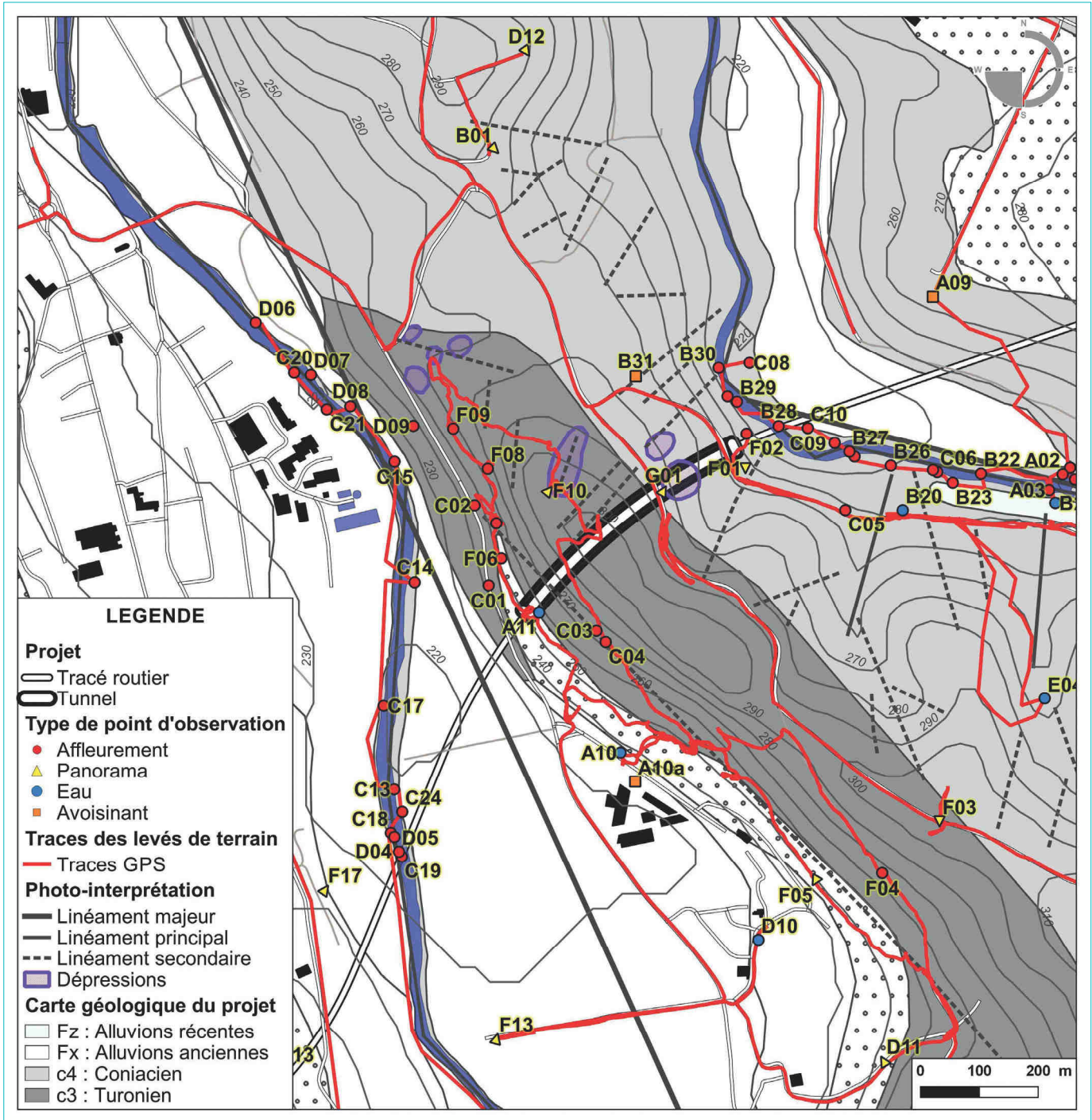


Figure 4 : Exemple de carte d'affleurement sur la carte géologique du projet étudié.

Les points d'observations reportés sur la carte géologique ainsi que les parcours effectués permettent d'afficher les zones où les informations sont lacunaires : la fiabilité de la carte géologique est ainsi affichée.

EXPLOITATION ET SYNTHÈSE DES LEVÉS DE TERRAIN

Les levés de terrains ont vocation à être intégrés à l'ensemble des reconnaissances : réalisés en premiers, ils permettent d'orienter les campagnes de géophysique, de sondages et autres. Cette bonne intégration est garantie par la production dès ce niveau de reconnaissance des tout premiers modèles interprétatifs issus des levés de terrains. Ceux-ci seront complétés, confirmés ou infirmés par les résultats des reconnaissances ultérieures.

Les modèles géologique et hydrogéologique interprétatifs issus des levés de terrain s'établissent en croisant les ébauches de modèles conceptuels issus de la phase de préparation (carte géologique existante, données de géophysique, de sondages et l'étude photo-interprétative) avec les levés de terrain. Ces modèles interprétatifs sont décrits en trois dimensions par des cartes et des coupes pour illustrer la compréhension de l'organisation des structures. Ces modèles doivent clairement mettre en évidence les singularités et les incertitudes selon la recommandation de l'AFTES GT32R2F1.

Les supports graphiques sont les cartes géologiques et hydrogéologiques interprétatives (avec report des points d'observation) associées à une ou plusieurs coupes mettant en évidence l'organisation et la structure du massif (coupe géologique interprétative reliant les données lithologiques, stratigraphiques et structurales entre elles) et l'estimation des niveaux des aquifères (coupe hydrogéologique interprétative).

Le rapport fait état des missions de terrains et des conditions dans lesquelles celles-ci ont été réalisées (conditions d'affleurement incluses). Il rassemble l'ensemble des données enregistrées lors des missions de terrain, synthèses géologique et hydrogéologique ainsi que la description des modèles par les cartes et coupes interprétatives. Les incertitudes portant sur la modélisation sont clairement identifiées. Le rapport s'organise autour des chapitres suivants :

1. les études préparatoires reprenant le bilan des connaissances et l'étude photo-interprétative ;
2. l'enregistrement des observations ;
3. la correction des données photo-interprétatives en fonction des observations de terrain ;
4. les descriptions des terrains rencontrés, du contexte structural et du modèle conceptuel :
 - **terrains rencontrés** : le log lithologique* est décrit de manière exhaustive. Les descriptions issues des campagnes de terrain font le lien avec les descriptions bibliographiques. Les caractéristiques des terrains sont illustrées par des photographies d'affleurements pour l'illustration des états du massif rocheux et la morphologie des terrains meubles, des photographies d'échantillons pour l'illustration des états de la matrice (massif rocheux) et les caractéristiques des terrains meubles, des photographies de discontinuités pour l'illustration des catégories d'épentes (massif rocheux),

- **structure géologique** : un rappel est fait des grandes unités géologiques, de leurs relations, des principaux accidents et de leur histoire tectonique. Dans le cas des massifs rocheux, le contexte structural de la zone étudiée est décrit par la représentation et l'identification de familles de discontinuités (stéréogrammes de Wulf ou Schmidt, hémisphère supérieur). Cette interprétation fait le lien entre les mesures de discontinuités prises sur le terrain et les rosaces de linéaments issues de l'étude photo-interprétative,
 - **modèle interprétatif** : les cartes et coupe(s) géologique(s) interprétatives (Fig. 5 & 6) sont présentées avec une note explicative de construction. Les incertitudes sont représentées sur le modèle selon la recommandation de l'AFTES GT32R2F1 (et son annexe 3). Les incertitudes sont décrites littéralement dans la notice ;
5. la description hydrogéologique des aquifères et du modèle conceptuel :
 - **contexte hydrogéologique** : un rappel est fait des connaissances bibliographiques des aquifères, des régimes saisonniers observés le cas échéant avec une carte des sources et une estimation des débits associés,
 - **modèle interprétatif** : les cartes et coupe(s) hydrogéologique(s) interprétatives (Fig. 7) sont présentées avec une note explicative de construction. De manière identique au modèle conceptuel géologique, les incertitudes figurent au modèle et sont décrites dans la notice.

Une réunion de restitution est organisée à la fin de la mission afin de présenter l'ensemble des travaux, des résultats et la description des modèles conceptuels proposés par le prestataire.

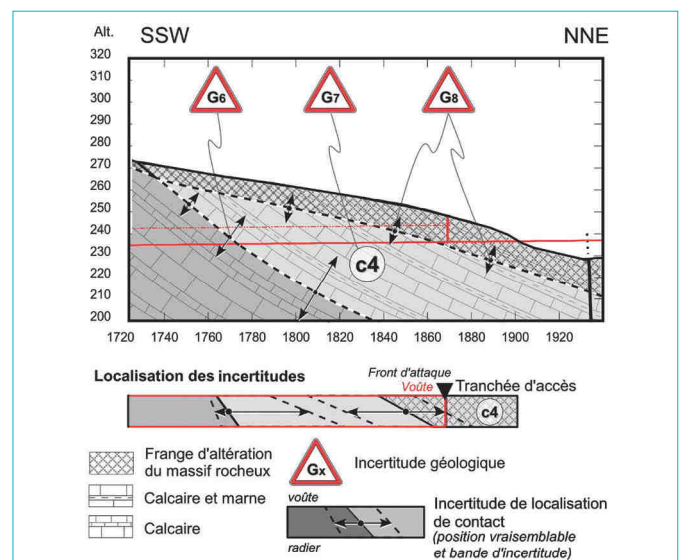


Figure 5 : Extrait de coupe géologique longitudinale (Cf. Fig. 6 en annexe pour coupe complète).

Le modèle géologique est éprouvé dans sa fiabilité : les incertitudes, leurs extensions sont clairement mises en valeur.

ORGANISATION CONTRACTUELLE

Des levés de terrain de qualité prennent nécessairement du temps, autant pour la préparation, la réalisation, l'enregistrement, l'exploitation que la synthèse. Lors de la commande, une première estimation du délai d'exécution est faite. Il est conseillé de l'actualiser au moment de la mise au point. Ceci permet la mise en adéquation de la volonté de qualité du maître d'ouvrage avec les réalités des temps nécessaires à la réalisation des levés. Les exemples suivant éclairent sur les besoins d'adaptation du temps passé préalablement sous-estimé :

- dans le cas d'une recherche spécifique de connaissances : le nombre de documents bibliographiques est plus important que prévu initialement. Leur appropriation ainsi que la synthèse de ces documents nécessite plus de temps ;
- dans le cas d'une étude spécifique photo-interprétative où la zone d'étude est élargie ou le nombre de photographies de bonne qualité et de différents types (infra-rouge ou noir et blanc) est plus important que prévu : le temps nécessaire à leur étude est proportionnel à leur nombre ;
- le contexte géologique est complexe nécessitant une interprétation poussée ou des allers-retours entre les phases d'exploitation et de terrain. Cette notion de complexité est importante : le temps passé pour réaliser des levés de terrain et des exploitations de qualité est directement corrélé à la complexité géologique.

La contractualisation doit permettre d'intégrer ces ajustements afin que prime la qualité sur la seule gestion contractuelle. L'objectif général est la définition des contextes géologiques et hydrogéologiques. En ne considérant que cette étape de levés de terrain, l'atteinte de cet objectif passe par la réalisation de phase de préparation, de réalisation et d'exploitation comportant toutes les trois des livrables précisément définis. Les soumissionnaires sont invités à expliciter les moyens qu'ils mettent en œuvre pour atteindre les objectifs dans un mémoire technique à produire. Un soin particulier doit être pris à l'écriture du contrat afin de permettre une souplesse cadrée autorisant des dépassements le cas échéant.

Selon l'avancement des études, la préparation des levés de terrain est plus ou moins conséquente :

- concernant la synthèse des connaissances, elle relève de l'appropriation si l'ensemble des documents est fourni au prestataire. Par contre, si rien n'est fourni, un bilan des connaissances doit être prévu comprenant la recherche documentaire et d'informations. Cette mission spécifique fait l'objet de la livraison intermédiaire d'un recueil de références ainsi que la livraison de l'ensemble des documents au format numérique (Cf. §2) ;
- concernant l'étude photo-interprétative, celle-ci relève de l'appropriation si une étude a déjà été réalisée dans la mesure où les photographies sont transmises au prestataire. Par contre, dans le cas où une telle étude n'existe pas, elle fait l'objet d'une mission spécifique (Cf. §2) comprenant l'acquisition d'images et MNT* éventuels sur la zone d'étude ainsi que leur étude. Les minutes d'observation ainsi que les commentaires associés constituent des livrables intermédiaires.

Concernant le mode de rémunération, une distinction est réalisée entre d'une part les missions d'études et de terrain qui peuvent être rémunérées au temps passé et d'autre part les livrables associés qui peuvent l'être au forfait ou à l'unité. Le tableau 1 récapitule le détail des prestations des levés de terrain et les types de rémunération associés.

Si les levés de terrain s'inscrivent dans le cadre d'un marché public, les prestations relèvent du Cahier des Clauses Administratives Générales applicables aux marchés publics de prestations intellectuelles (CCAG-PI) qu'il faut rendre contractuel. La forme contractuelle permettant une souplesse en rapport avec la complexité géologique est l'accord cadre. Cet accord cadre est mono-attributaire dans sa version la plus simple avec bons de commande et mixte avec marchés subséquents si des missions spécifiques peuvent devenir nécessaires au moment de la réalisation de la prestation.

LEVÉS DE TERRAIN		PRIX
Préparation		
11	Mission – Bilan des connaissances et/ou étude photo-interprétative	j
12	Livrable : note d’appropriation et identification des besoins spécifiques le cas échéant	F
13	Réunion intermédiaire de présentation de la préparation (ajustement de la zone d’étude possible)	U
Missions spécifiques préparatoires		
14	Mission spécifique – Bilan des connaissances (y compris recherche de documents)	j
15	Livrable bilan des connaissances – Recueil des données d’entrée (liste et documents pdf)	F
16	Acquisition des photographies aériennes (une mission petite échelle + une mission grande échelle couvrant la zone d’étude), images aériennes, MNT*	U
17	Mission spécifique – Réalisation de l’étude photo-interprétative	j
18	Livrables photo-interprétatifs : données d’entrée, minutes d’observation, SIG, notes photo-interprétatives géologique et hydrogéologique	F
Réalisation et enregistrement		
21	Frais de déplacement	J + frais
22	Mission - Levés de terrain effectués par un géologue	j
23	Livrable papier et SIG - Carte d’affleurement, trace parcours et fiches d’affleurement	F
24	Livrable fiches d’affleurement	U
25	Livrable papier et SIG – Carte photo-interprétative corrigée	F
26	Livrable papier et SIG – Carte des sources avec estimation des débits	F
Exploitation des levés		
31	Livrable papier et SIG – Carte géologique interprétative	F
32	Livrable papier et numérique – Coupes géologiques	U
33	Livrable papier et SIG – Carte hydrogéologique interprétative	F
34	Livrable papier et numérique – Coupes hydrogéologiques	U
Rapport de synthèse et restitution		
41	Rapport comprenant les notes bibliographiques et photo-interprétatives ainsi que les synthèses géologique et hydrogéologique	F
42	Réunion de restitution	U

Tableau 1 : Prestations de levés de terrain et type de rémunération (j pour jours, F pour forfait, U pour unité).

GLOSSAIRE

Affleurement : partie d'un terrain visible à la surface de la terre pour lequel on effectue une observation naturaliste descriptive, en dehors des sols organiques.

Anomalies (indices) : variation importante géomorphologique, structurale et lithologique due à la présence d'hétérogénéités géologiques, variation importante d'humidité due à des hétérogénéités hydrogéologiques. Ces variations sont détectées par l'étude photo-interprétative et confirmées par le levé de terrain.

Carte géologique : représentation sur un fond topographique des formations géologiques qui affleurent à la surface du terrain, réalisée spécifiquement pour le projet d'ouvrage souterrain.

Carte géologique BRGM : carte géologique à 1:50 000 éditée par le BRGM couvrant l'ensemble du territoire français métropolitain représentant les formations géologiques affleurantes sous le sol organique selon un code couleur en relation avec leur âge et leur nature. Les formations superficielles (altérites et dépôts quaternaires) sont partiellement et irrégulièrement figurées.

Géomorphologie : étude descriptive et explicative des formes du relief.

LiDAR (Light Detection And Ranging) : système d'acquisition topographique permettant l'acquisition rapide de millions de points au sol pour le modéliser.

Linéaments : alignement (décamétrique à kilométrique) ayant une origine structurale (faille, strate), géomorphologique (talweg, falaise, rupture de pente), hydrologique (réseau hydrographique) ou indéterminée. Ils sont mis en évidence par l'étude photo-interprétative ou par une étude d'analyse de la topographie fine (basée sur un levé LiDAR par exemple).

Log lithologique : colonne graphique représentant les formations présentes sur la zone d'étude géologique et hydrogéologique. Elle présente les terrains les plus anciens en bas et les plus récents au-dessus, avec une indication du niveau d'érosion observé. L'âge et la nature de chaque terrain sont précisés ainsi que les relations entre les formations (contact stratigraphique normal ou discordant, contact faillé chevauchant...).

MNT (Modèle Numérique de Terrain) : représentation de la topographie d'une zone par un réseau maillé de points en élévation.

Point d'observation : localisation pour laquelle on effectue une observation naturaliste à partir d'un panorama ou d'un affleurement.

Photo-interprétative (étude) : analyse qui résulte de l'observation de photographies aériennes, satellites et de l'exploitation d'un MNT. Le plus souvent les photographies sont observées au stéréoscope par couple. De la vision en relief obtenue, on peut en tirer des hypothèses sur la géologie et l'hydrogéologie grâce à des arguments morphologiques.

SIG (Système d'Information Géographique) : système d'information conçu pour recueillir, stocker, traiter, analyser, gérer et présenter tous les types de données spatiales et géographiques.

ZIG (Zone d'Influence Géotechnique) : volume de terrain au sein duquel il y a interaction entre l'ouvrage (réalisation et exploitation) et l'environnement (sols et avoisinants). Sa forme et son extension sont spécifiques à chaque site et chaque ouvrage.

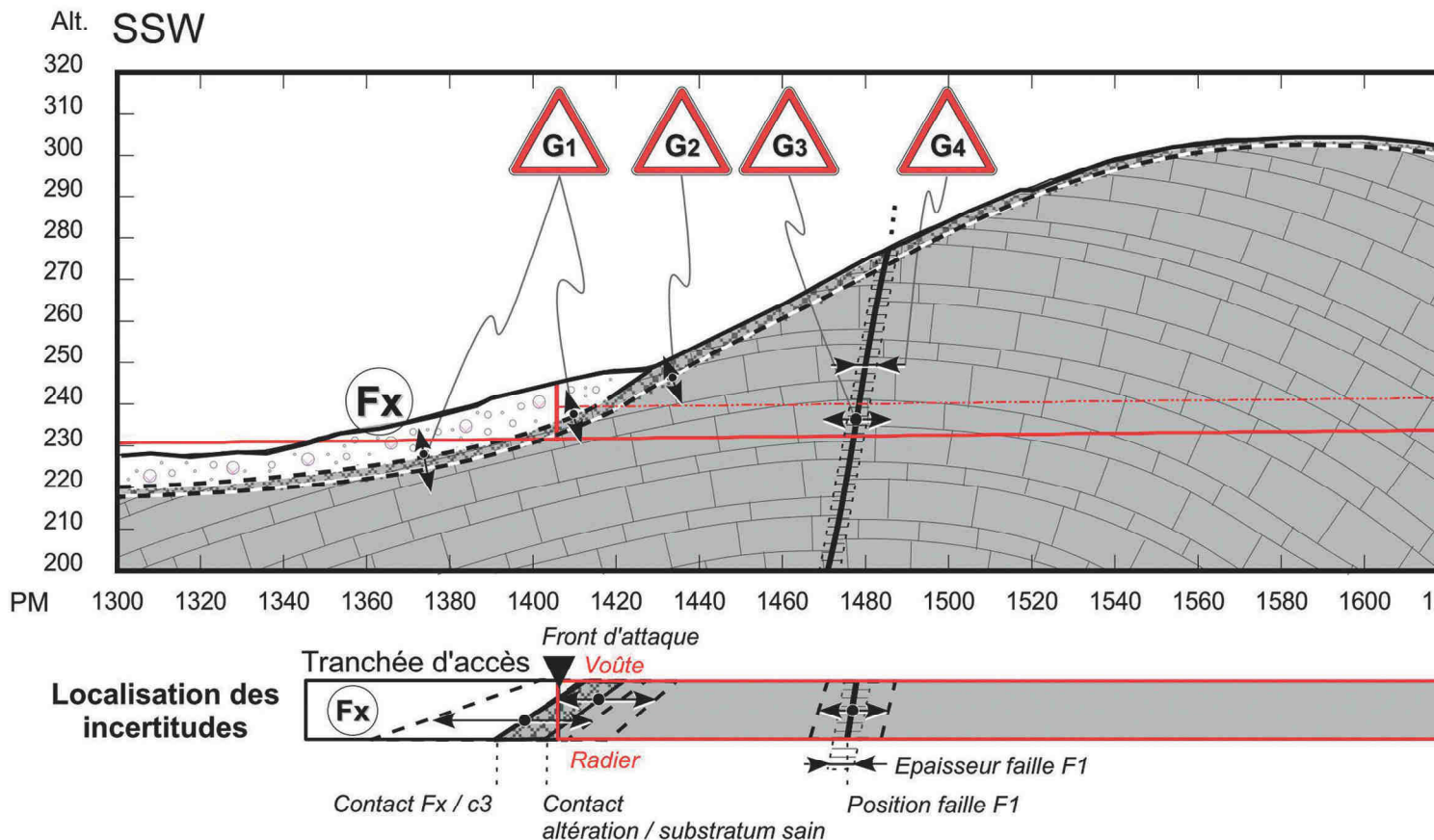
Zone d'étude (Zone d'étude géologique et hydrogéologique) : surface du territoire autour du projet d'ouvrage souterrain permettant de collecter des informations utiles à l'élaboration des modèles géologique et hydrogéologique.

BIBLIOGRAPHIE

Les ouvrages suivants ont été consultés pour élaborer ce guide :

- AFTES, GT1R1F1 (2003). *Caractérisation des massifs rocheux utile à l'étude et à la réalisation des ouvrages souterrains. Recommandation.*
- AFTES, GT32R2F1 (2012). *Caractérisation des incertitudes et des risques géologiques, hydrogéologiques et géotechniques. Recommandation.*
- AFTES, GT43R1F1 (2015). *Guide d'application au domaine des ouvrages souterrains de la norme NF P 94-500 (version 2013) relative aux missions d'ingénierie géotechnique. Recommandation.*
- Boulvain (2011). *Géologie de terrain : de l'affleurement au concept*, Technosup.
- Campy, Macaire (1989). *Géologie des formations superficielles géodynamique - faciès - utilisation*, Masson.
- CETU (1998). *Dossier pilote des tunnels – Génie civil – section 2 : géologie, hydrogéologie, géotechnique.*
- Foucault, Raoult, Cecca, Platevoet (2014). *Dictionnaire de géologie* (8^e édition), Dunod, 416 p.
- Goguel (1967). *Application de la géologie aux travaux de l'ingénieur*, Masson, 373 p.
- Groshong (2006), *3D Structural Geology. A practical guide to quantitative surface and subsurface map interpretation*, Springer.
- ISRM (1978). *Suggested Method for the quantitative description of discontinuities in rock masses.*
- LCPC (1982). *Reconnaissance géologique et géotechnique des tracés de routes et autoroutes.* Notice d'information technique du Ministère des transports. Guide technique du LCPC.
- LCPC (1999). *L'utilisation de la photo-interprétation dans l'établissement des plans de prévention des risques liés aux mouvements de terrain.* Guide technique du LCPC.
- Lisle (2004). *Geological structures & Maps: A practical guide*, Elsevier.
- McClay (1987). *The mapping of geological structures*, Geological Society of London Handbook.
- NF EN ISO 14688-1 (2018). *Reconnaissance et essais géotechniques – Identification et classification des sols – Partie 1 : Identification et description.*
- NF EN ISO 14688-2 (2018). *Reconnaissance et essais géotechniques – Identification et classification des sols – Partie 2 : Principes pour une classification.*
- NF EN ISO 14689 (2018). *Reconnaissance et essais géotechniques – Identification, description et classification des roches.*
- NF P94-500 (2013). *Missions d'ingénierie géotechnique – Classifications et spécifications.*
- Pégrier (2006). *Les noms de lieux en France, glossaire de termes dialectaux*, Commission de toponymie, IGN.

PROFIL EN LONG GEOLOGIQUE



Légende

Age des formations

	Fx : Alluvions anciennes
	c4 : Coniacien
	c3 : Turonien

Nature des formations

	Graves sableuses
	Calcaire et marne
	Calcaire

Altération

	Frange d'altération du massif rocheux
--	---------------------------------------

L'épaisseur des bancs est figurative

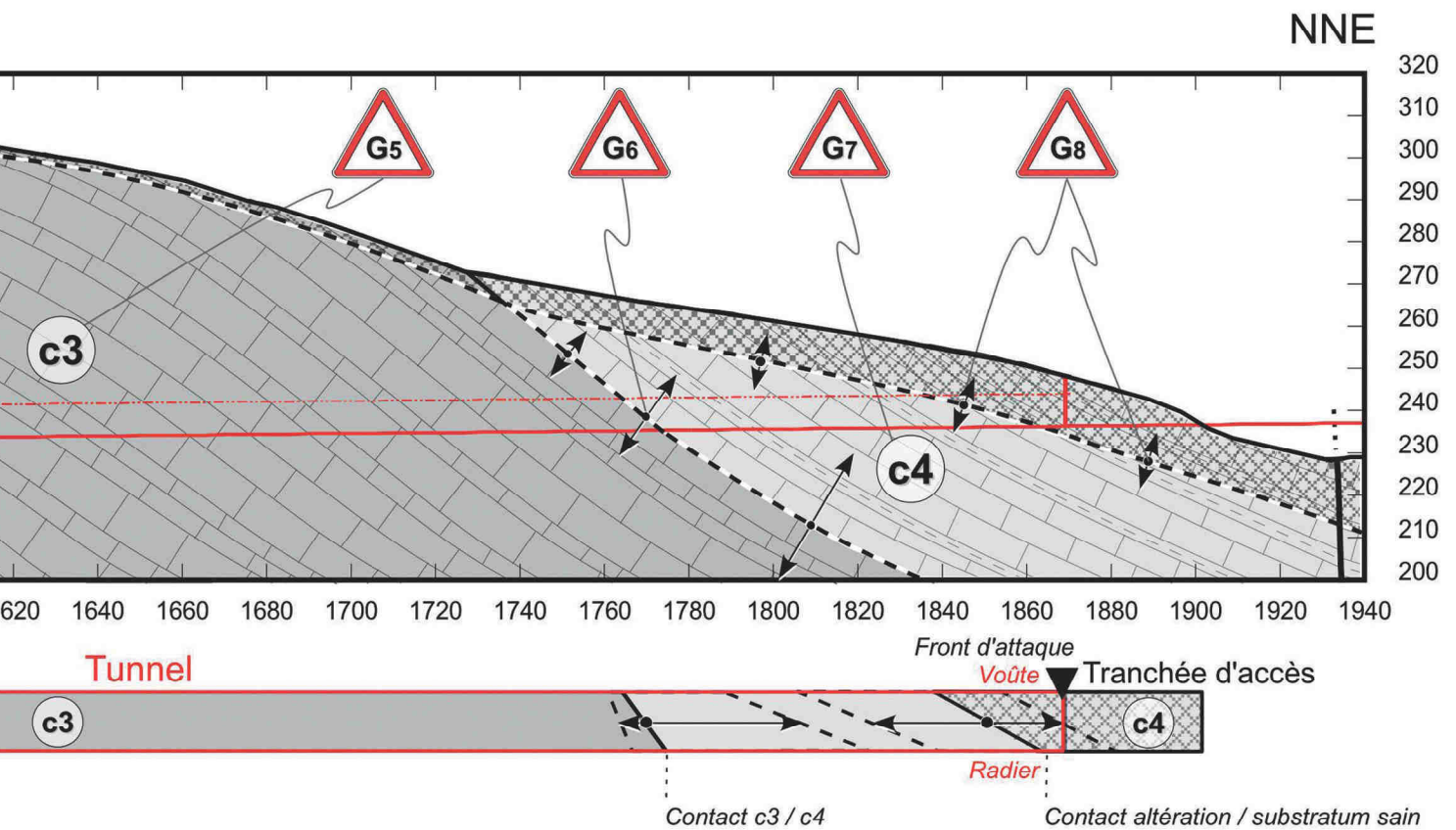
Figure 6 : Exemple de modèle géologique issu d'une campagne de levés de terrain.

Le modèle est représenté sous forme de coupe longitudinale et met en valeur les différentes incertitudes (distinction entre limites observées et supposées). Leurs extensions sont explicitement quantifiées et représentées.

Le lien est fait par une signalisation spécifique (ici des panneaux « attention ») entre les incertitudes indexées dans le rapport et leur localisation spatiale sur le modèle.

Le modèle géologique comporte le modèle d'altération et les formations superficielles aux émergents notamment.

La localisation des incertitudes sur une coupe longitudinale précise les rencontres des contacts, failles et singularités lors du creusement du tunnel.



Incertitudes



Incertitude géologique

Limite entre formations ou unités



Limite observée



Limite supposée

voûte



Incertitude de localisation de contact
(position vraisemblable et bande d'incertitude)

radier A/B

voûte



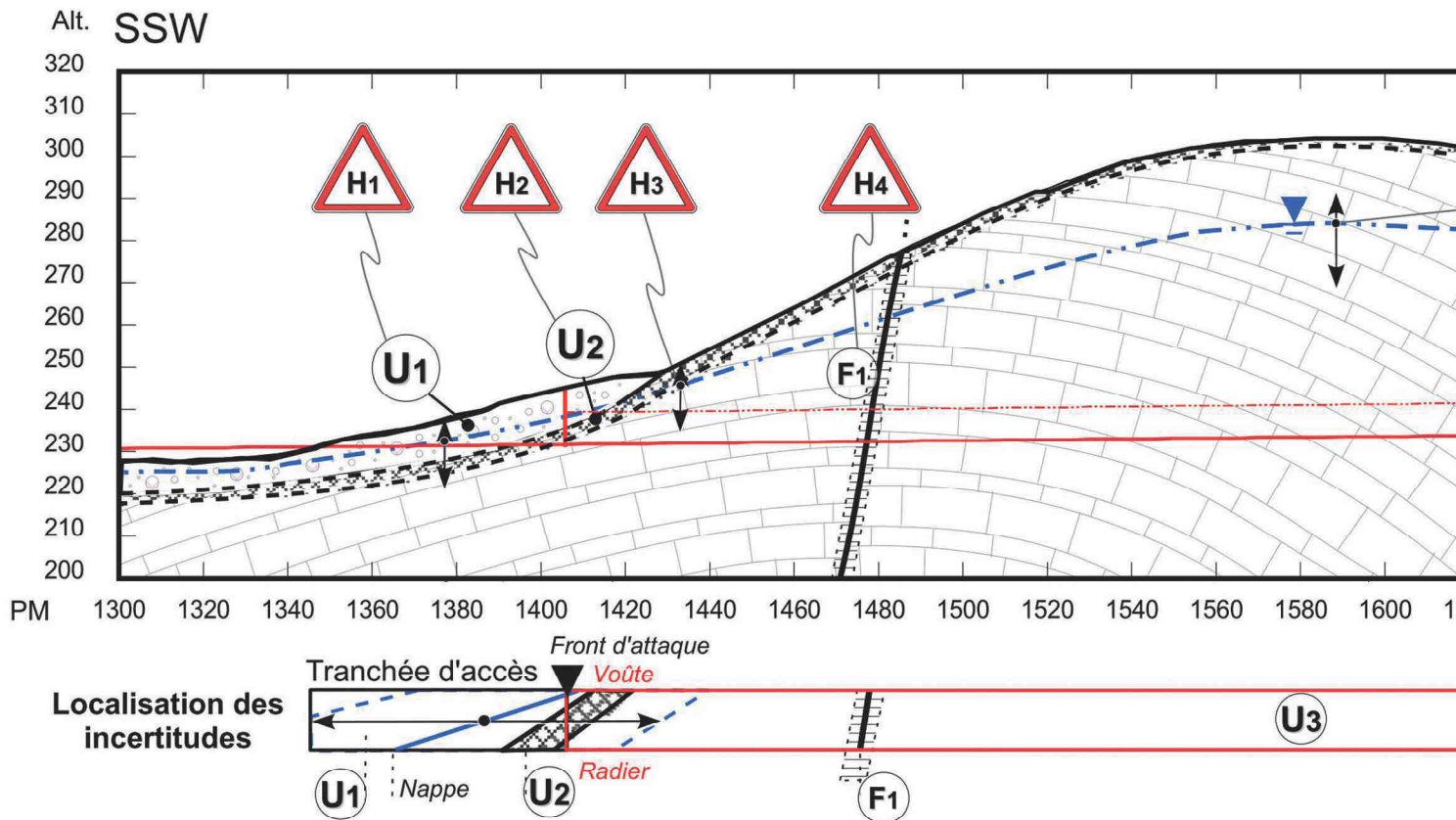
Incertitude de localisation de faille

radier



Incertitude de puissance de faille

PROFIL EN LONG HYDROGEOLOGIQUE



Légende

Hydrogéologie

U_x Unités hydrogéologiques (aquifères ou imperméables)

F1 Zone faillée, singularité hydrogéologique

Nappe

--- Niveau piézométrique supposé

Nature des formations

Graves sableuses

Calcaire et marne

Calcaire

L'épaisseur des bancs est figurative

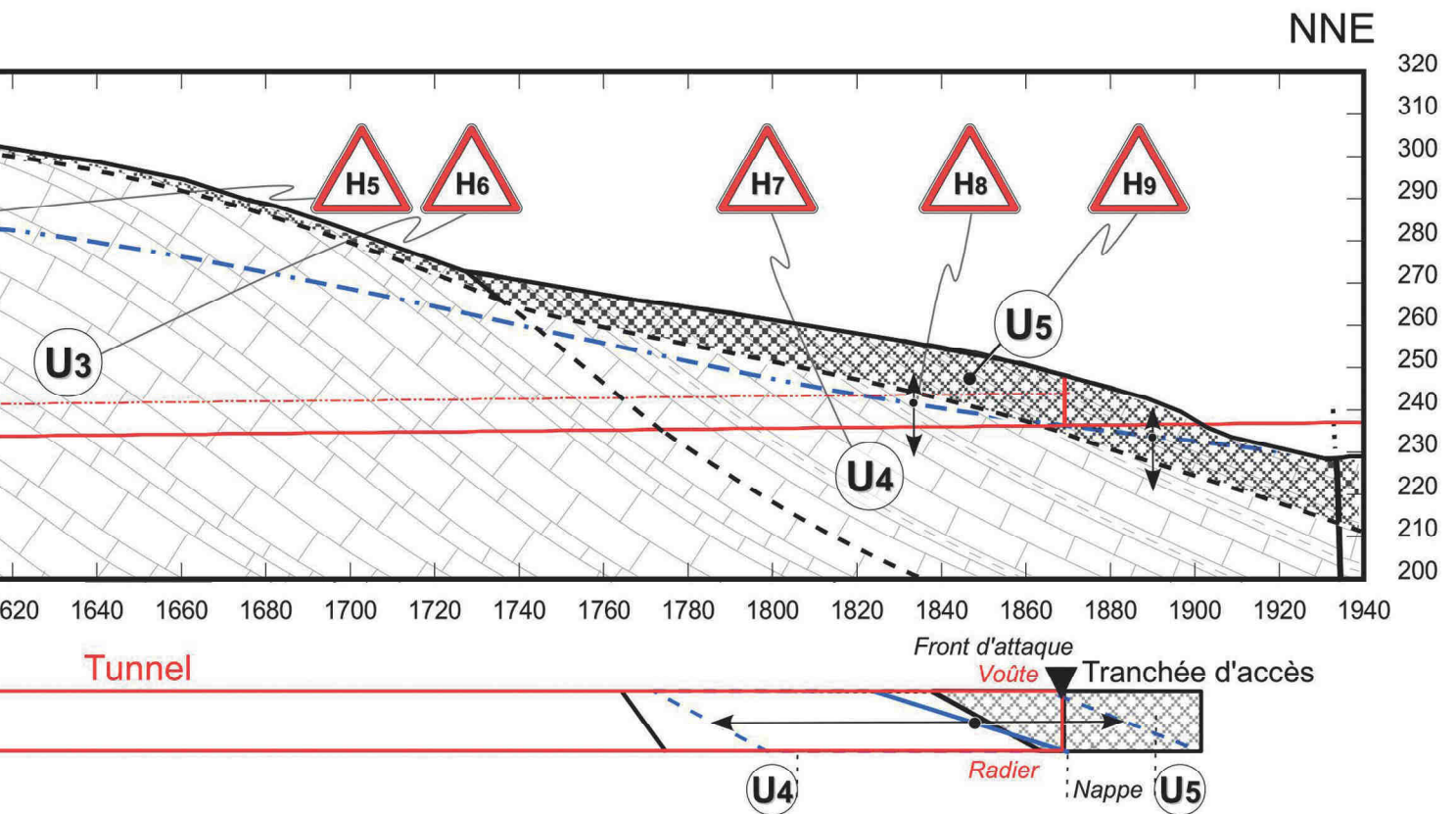
Altération

Frange d'altération du massif rocheux

Figure 7 : Exemple d'un modèle hydrogéologique issu d'une campagne de levés de terrain.

Le modèle hydrogéologique s'appuie sur le modèle géologique dont on a expurgé une partie des incertitudes géologiques pour se concentrer sur les seules incertitudes hydrogéologiques.

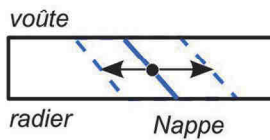
Le modèle comporte au minimum les hauteurs de nappe et l'identification des différentes unités hydrogéologiques et singularités. De la même manière que pour le modèle géologique, le lien est fait entre les incertitudes indexées dans le rapport et leur localisation spatiale sur le modèle (ici par des panneaux « attention »).



Incertitudes



Incertitude hydrogéologique



Incertitude de localisation de la nappe
(position vraisemblable et bande d'incertitude)

Limite entre formations ou unités

- Limite observée
- - - Limite supposée

CONTRIBUTEURS

Ce document a été rédigé par Johan KASPERSKI et Cédric GAILLARD.

Sont remerciés pour leur relecture : M. CHAHINE (CEREMA), J.-L. DURVILLE (consultant), E. EGAL (EGIS Tunnels), P. LOCHON (SPIE BATIGNOLLES), A. ROBERT (EGIS Tunnels), F. ROBERT (CETU), D. SUBRIN (CETU), P. VASKOU (GEOSTOCK), F. VAYSSE (EDF)

Centre d'Études des Tunnels

25 avenue François Mitterrand
69500 BRON - FRANCE
Tél. +33 (0)4 72 14 34 00
Fax. +33 (0)4 72 14 34 30
cetu@developpement-durable.gouv.fr

www.cetu.developpement-durable.gouv.fr



**MINISTÈRE
CHARGÉ
DES TRANSPORTS**

*Liberté
Égalité
Fraternité*

