

Chapitre

LES PRINCIPAUX MOYENS DE RECONNAISSANCE

6.1. INTRODUCTION

Les moyens de reconnaissance sont divisés en deux catégories principales :

1^{ère} catégorie : les méthodes d'observation du terrain soit en place, soit à l'aide d'échantillons, peuvent être considérées comme le prolongement en profondeur de la géologie de surface.

2^{ème} catégorie : les méthodes de mesure in situ qui sont basées sur la mesure des propriétés physiques qui peuvent être mécaniques, électriques, hydrauliques etc. d'un terrain.

A la première catégorie appartiennent les tranchées, puits, galeries et sondages de reconnaissance. A la seconde, les essais géophysiques, mécaniques et hydrauliques.

Par rapport aux essais de laboratoire, les essais in situ présentent un certain nombre d'avantages

- Coût moins élevé.
- Remaniement du terrain généralement moindre.

Cependant ne peuvent se substituer entièrement aux essais de laboratoire qui restent irremplaçables pour le calcul précis des fondations ou des ouvrages souterrains.

6.2. LES TRANCHEES ET LES PUITES

Leurs objectifs sont généralement multiples :

- Recherche d'un substratum imperméable sous une couverture peu épaisse.
- Levé d'une coupe géologique détaillée
- Prélèvement d'échantillons pour identification et essais mécaniques.

Les techniques employées dépendent des conditions d'accès, des disponibilités locales en matériels ou en personnels, et des prix de revient qui sont très variables selon les pays.

Les avantages de ce type de reconnaissance sont nombreux :

- Elles conviennent à tous les cas et peuvent être réalisées n'importe où.
- Si la mécanisation est possible, la rapidité d'exécution est grande et le prix de revient est faible.
- La souplesse d'emploi est considérable.
- Le creusement de ces ouvrages et leurs tenues dans le temps fournit des informations précieuses pour les travaux ultérieurs.

Leurs inconvénients sont liés surtout :

- A la cohésion insuffisante du terrain qui peut imposer un soutènement (augmentation du délai d'exécution et du coût).
- A la présence à faible profondeur d'une nappe phréatique.

Malgré ces défauts, le domaine d'application reste vaste particulièrement les cas où les couches superficielles se trouvent impliquées, tels que :

- Etudes de fondations.
- Recherche de matériaux meubles.
- Etude des sites de barrages, etc.

6.3. LES GALERIES

Il s'agit d'une technique beaucoup plus coûteuse qui n'est généralement mise en œuvre que pour des reconnaissances à gros budget (appui de barrage, travaux souterrains).

Les buts restent sensiblement les mêmes que dans le cas précédent, mais l'accent est mis sur la reconnaissance du bed rock (nature, fracturation et altération) et sur la possibilité de réaliser des essais in situ.

Les avantages sont nombreux :

- Disponibilité permanente des observations.
- Possibilité de réaliser une très vaste gamme d'essai.
- En percement manuel, très grande souplesse d'emploi ; le tracé notamment peut être conduit de manière à s'adapter aux détails structuraux du sous sol.
- Possibilité de réemploi dans des ouvrages définitifs, soit directement (galerie de visite ou d'injection), soit après élargissement (reprise d'une galerie de reconnaissance en galerie de dérivation provisoire sur un site de barrage).

L'inconvénient principal est le prix de revient, conditionné par le mode d'exécution, manuel ou mécanique. Dans ce dernier cas, la hauteur minimale de la galerie sera de l'ordre de 2,20 m et son tracé ne pourra être très sinueux.

6.4. LES SONDAGES MECANIQUES

La gamme des moyens de sondage mécanique est très étendue, qu'il s'agisse de la puissance des appareils, du mode de perforation, des diamètres employés, des profondeurs atteintes. Si les sondes pétrolières permettent le forage à plusieurs milliers de mètres de profondeur, les performances des machines utilisées en génie civil sont plus modestes, puisque la quasi-totalité des reconnaissances géotechniques n'intéressent que les profondeurs comprise entre 0 et 100 m ; les investigations de 100 à 300 m sont rares ; enfin ce n'est qu'exceptionnellement que des projets nécessite des forages profonds.

Il importe donc que le géologue connaisse, au moins sommairement, les possibilité et performances des divers types de matériel, ainsi que leurs sujétions de mise en œuvre et leurs prix de revient, afin de faire un choix correct pour résoudre au mieux ses problèmes. Il se doit également d'exploiter le plus complètement possible les résultats obtenus en raison de leur coût élevé.

D'une façon générale, les sondages mécaniques ont un double but :

- Géologique : car le sondage permet de compléter la reconnaissance géologique du sous sol, qui sera exprimée par une coupe géologique détaillée. Pour cette raison, le prélèvement des échantillons se fait le plus souvent en continu afin de disposer d'une coupe sans lacune.
- Géotechnique : car le sondage est un moyen d'accès au sous sol pour le prélèvement d'échantillons intacts destinés au laboratoire et pour l'exécution d'essai in situ, hydrauliques ou mécaniques.

Selon les cas, la priorité peut être accordée à l'un ou l'autre des aspects précédents, et le mode de forage sera tantôt destructif ou non destructif avec prélèvement d'échantillons (beaucoup plus cher). Par ailleurs les modes de forage, l'échantillonnage et les types d'essais différents selon que l'on se trouve en terrain meuble peu cohérent ou dans le rocher.

6.4.1 Le sondage en terrain meuble

Les principales difficultés proviennent de la tenue des parois du sondage et de la remontée du terrain foré. Dans la plupart des cas, il faut opérer sous la protection d'un tubage continu ou employer une boue de forage qui, formant un cake sur la paroi du puit, retient celle-ci. Aucun des procédés de forage utilisés en terrain meuble ne peut vraiment être considéré comme non destructif. Le remaniement de l'échantillon est souvent considérable.

6.4.1.1 Tarières à main

Les modèles les plus courants comportent un outil d'un diamètre de 60 à 200 mm constitué par une trousse coupante dont la forme permet la remonté de 0,5 à 2 litres de sol à chaque manœuvre. La tarière à main est un instrument idéal pour les reconnaissances à faible profondeur (jusqu'à 2 m) pouvant aller jusqu'à quatre cinq mètres si les conditions sont favorables (deux hommes sont alors nécessaire pour la manœuvre. Elle est inopérante sous la nappe, quel que soit le type de terrain

6.4.1.2 Tarières à moteur

Montée sur camion, sont extrêmement efficaces pour la reconnaissance rapide de volumes important de terrains meubles. Elles sont peu exploitables sous l'eau, et inopérants dans les formations à blocs.

6.4.1.3 Sondage par battage

Cette méthode est la plus courante en terrain meuble, sec ou saturé. Un tubage métallique est enfoncé dans le sol par battage à l'aide d'un mouton, la colonne de sédiment ainsi isolée à l'intérieur du tube est extraite à l'aide d'un outil adapté.

6.4.2 Le sondage en terrain rocheux

La reconnaissance géologique et géotechnique n'est pas le seul but assigné aux forages au rocher sur un chantier de génie civil. Ils permettent également :

- La mise en place d'équipement destiné à des mesures (piézomètres, perméabilités, pression interstitielle, etc.).
- Le traitement des terrains (injection, drainage).
- Le soutènement (ancrage).
- La mise en place de charges d'explosifs (terrassment en grande masse).

L'essentiel pour ces dernières applications est de perforer rapidement et économiquement d'où le recours à des méthodes destructives. Celles-ci sont mal adaptées aux besoins de la reconnaissance géologique et géotechnique qui exige une grande qualité de l'échantillonnage.

6.4.2.1 Les méthodes destructives

Touts fragmentent la roche, et les débris doivent être remontés à la surface par un fluide de forage (air comprimé, eau, boue).

6.4.2.2 Les méthodes non destructives (forages carottés)

Leur but est de découper en continuité sur toute une colonne de terrain puis de la remonter à la surface du sol pour examen géologique ou essais de laboratoire.

Dans la pratique, la carotte est découpée à l'aide d'une couronne abrasive solidaire d'un tube carottier qui permet sa protection et sa remontée.

6.5. LES ESSAIS HYDRAULIQUES

6.5.1 Introduction

Parmi les constituants du sous-sol, l'eau est certainement l'élément dont le technicien a cherché le plus précocement à détecter la présence et comprendre le comportement. La résolution de nombreux problèmes d'hydraulique des sols implique la connaissance du coefficient de perméabilité.

La mesure du coefficient de perméabilité effectuée au laboratoire est rarement satisfaisante, l'hétérogénéité du sol en place est le plus souvent, telle que l'on peut attribuer à une couche donnée le coefficient de perméabilité mesuré sur une éprouvette ayant, au plus, un volume de quelques centaines de centimètres cubes.

Il est donc nécessaire de procéder à des essais en place intéressant un volume suffisant pour tenir compte de l'hétérogénéité du sol.

Les principaux essais de perméabilité en place sont :

- L'essai de pompage.
- L'essai Lefranc.
- L'essai Lugeon.

6.5.2 La mesure des perméabilités en milieux poreux

6.5.2.1 L'essai de Pompage

Le pompage dans un aquifère selon un mode opératoire rationnel permet d'en calculer la perméabilité. Ce type d'essai dure longtemps et réclame généralement une préparation importante (forage et tubage du puits, pose de piézomètres au voisinage).

Il est surtout mis en œuvre en vue de l'exploitation des nappes. En génie civil, on utilise moins fréquemment, lui préférant le plus souvent des essais plus ponctuels, plus rapides, moins coûteux.

6.5.2.2 L'essai Lefranc

Pour mesurer la perméabilité d'un sol, un essai de pompage n'est pas toujours justifié ni même possible. L'essai Lefranc permet d'obtenir des résultats corrects, sans nécessiter un matériel important. Il peut être réalisé dans les sondages de reconnaissance, au fur et à mesure de l'avancement.

a) Principe

L'essai consiste à injecter ou à pomper de l'eau dans une cavité de forme invariable, appelée lanterne, réalisée en fond de forage après un léger relèvement du tubage et à observer les variations du niveau d'eau qui s'ensuivent. Un graphique établissant la relation hauteur/débit ou hauteur/temps permet de calculer la

perméabilité. La mise en œuvre est rapide et le matériel nécessaire est réduit (voir figure 5.1)

On distingue deux modes opératoires :

i) *L'essai à niveau constant*

On pompe ou on injecte de l'eau à débit constant dans la cavité jusqu'à la stabilisation du niveau dans le forage. Seules les mesures après stabilisation sont retenues pour la détermination du coefficient de perméabilité. Ce type d'essai est réalisé dans les sols perméables ($K > 10^{-4}$ m/s)

b) *L'essai à niveau variable*

On prélève ou on injecte un volume d'eau donné dans la cavité. On suit, en fonction du temps, les variations du niveau dans le tube piézométrique. Ce type d'essai est réalisé dans les sols peu perméables.

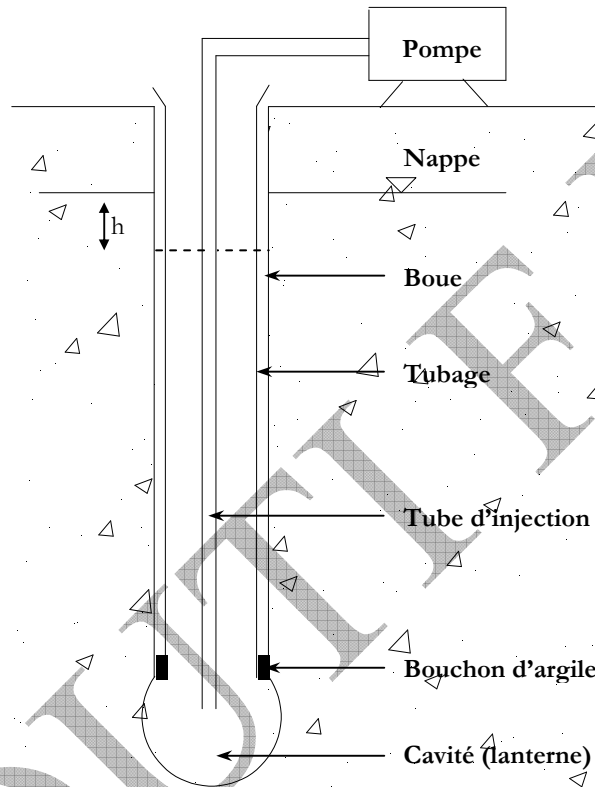


Figure 6.1 : Principe de l'essai Lefranc

b) Interprétation de l'essai à niveau constant :

On suppose que :

La loi de darcy applicable

Le régime est permanent

Le milieu est homogène et isotrope

Le calcul montre que la relation entre le débit Q , la dénivellation h (la charge) dans le puit et la perméabilité k :

$$Q = k \cdot C \cdot h$$

C : Coefficient de la forme de la cavité.

Pour une cavité cylindrique de hauteur L , et de diamètre D , dans un milieu infini, on utilise généralement la formule approchée :

$$C = \frac{2 \pi D \sqrt{\left(\frac{L}{D}\right)^2 - 1}}{\text{Ln} \left[\frac{L}{D} + \sqrt{\left(\frac{L}{D}\right)^2 - 1} \right]}$$

Elle se simplifie si $\frac{L}{D} > 2$

$$C = \frac{2\pi L}{\ln \frac{2L}{D}}$$

Si on connaît C, une mesure suffit en principe pour calculer k. Mais l'on préfère réaliser toujours une série d'essai avec des débits variables. On trace alors la courbe dénivellation/débit dont les points vont s'aligner sur une droite passant par l'origine et de pente $1/k \cdot C$ (figure 6.2). Celle-ci donne la valeur moyenne de la perméabilité de la passe étudiée.

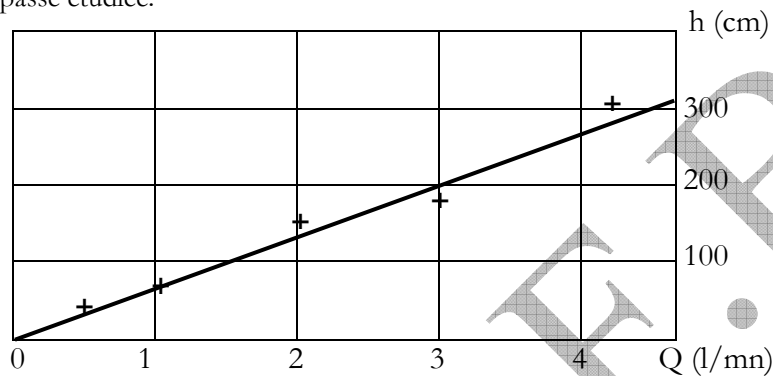


Figure 6.2 : Graphique hauteur-débit pour un essai à niveau constant

b) Interprétation de l'essai à niveau variable :

Le mode opératoire de cet essai est plus simple mais l'interprétation plus délicate que dans le cas précédant. La formule théorique généralement utilisée est :

$$h = h_0 \cdot e^{\frac{k \cdot C}{S} (t - t_0)}$$

Avec :

h et h_0 : rabattement en temps t et t_0

k : perméabilité du terrain

C : coefficient de poche

S : section du forage

En coordonnée semi-logarithmique les points expérimentaux du graphique rabattement/temps doivent s'aligner sur une droite de pente :

$$\frac{k \cdot C}{2,3S}$$

Il est possible de déduire la perméabilité k.

6.5.3. L'essai Lugeon et la mesure des perméabilités au rocher

Sur le plan hydraulique, l'écoulement de l'eau dans un massif rocheux diffère en général beaucoup de celui que l'on observe en milieu poreux. Cela provient essentiellement de la forme et la dimension des vides offrant passage à l'eau, pores dans un cas, fissures dans l'autre.

Le degré d'ouverture de ces fissures et la charge produisant l'écoulement autorisent parfois des vitesses rapides, l'écoulement peu devenir turbulent, ce qui interdit l'application de la loi de darcy. Par ailleurs l'hypothèse, courante en milieu poreux, de l'homogénéité et de l'isotropie de la perméabilité n'est pratiquement jamais admissible en massif rocheux.

Les méthodes employées, comme celle de l'essai Lugeon, restent très empirique. La validité des résultats fournis n'est souvent que relative et dépend beaucoup du sérieux et du soin apportés à l'exécution.

6.5.3.1 Principe

L'essai consiste à envoyer, dans une tranchée de forage de hauteur h isolée du reste par un obturateur, de l'eau sous charge constante (voir figure 6.3).

La pression d'injection P_m est contrôlée par un manomètre en tête de colonne et le débit mesuré au moyen d'un compteur.

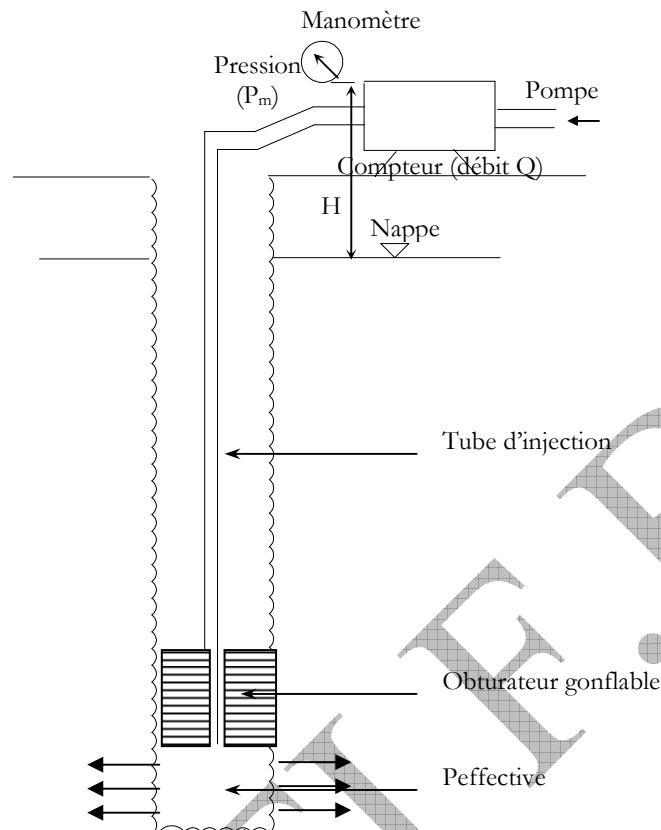


Figure 6.3 : Principe de l'essai Lugeon

6.5.3.2 Interprétation des mesures

La pression effective dans la tranchée de terrain est donnée par :

$$P_e = P_m + \gamma_w \cdot H - P_c$$

Avec :

H : Différence de cote nappe-manomètre, en mètres.

P_m : Pression lue au manomètre en tête de colonne, en bars.

P_c : Pertes de charge dans les tuyaux, en mètres de hauteur d'eau.

Si l'on calcule les pertes de charge par la formule de Flamant, applicable aux tuyaux de faible dimension, on a :

$$P_c = 0,00092 \sqrt{\frac{V^7}{d^5}}$$

d : Diamètre du tuyau en mètres.

V : Vitesse de l'eau en mètres par seconde.

6.5.3.3 Traduction des résultats en perméabilité

a) La perméabilité

Le calcul de la perméabilité k se justifie si l'on a un écoulement laminaire en régime permanent. La perméabilité k en [m/s] :

$$k = \frac{1}{10C} \times \frac{Q}{P_e}$$

C : Coefficient de forme exprimé en mètre.

P_e : Pression effective dans la cavité exprimée en bars.

Q : Débit exprimé en [m³/s].

$$C = \frac{2 \pi D \sqrt{\left(\frac{L}{D}\right)^2 - 1}}{\ln\left(\frac{L}{D}\right) + \sqrt{\left(\frac{L}{D}\right)^2 - 1}}$$

La correspondance des unités la plus courante admise est :

$$1 \text{ Lugeon} \approx 10^{-5} \text{ m/s}$$

b) Appréciation de l'état de fissuration de la roche

Plus la valeur lugeon est élevée, plus la fissuration est importante. Si l'on considère une fissure d'épaisseur e , perpendiculaire au forage de rayon r , dans lequel on injecte de l'eau à une pression P , si R est la distance de la pression nulle dans la fissure et η la viscosité de l'eau, le débit est donné par :

$$Q = \frac{\pi}{6 \eta \ln\left(\frac{R}{r}\right)} P e^3$$

Avec

$$\eta = \frac{1,79 \cdot 10^{-2}}{1 + 0,03368 \theta + 0,00022 \theta^2}$$

θ : Degrés Celcius

On voit que le débit varie comme le cube de l'ouverture de la fissure. Ainsi 20 Lugeon peuvent correspondre à une fissure de 0,25 mm, ou à 10 fissures de 0,12 mm, ou à 100 fissures de 0,06 mm d'épaisseur.

Remarque : l'essai Lugeon peut être utilisé pour prévoir les injections de ciment. Il existe une relation étroite entre les résultats de l'essai et les quantités de coulis qu'il faut injecter. Mais il faut être très prudent, quand il s'agit de roches très fracturées. On admet, que l'on ne peut injecter un terrain dont la perméabilité est inférieure à un Lugeon.

6.6. LA STRATEGIE DES RECONNAISSANCES

Pour conclure ce chapitre consacré aux moyens de reconnaissance à mettre en œuvre pour compléter l'étude géologique de surface, nous insisterons sur le fait qu'une campagne de reconnaissance doit toujours être menée avec méthode et précision. Le choix d'un type d'appareil doit se faire en fonction du terrain attendu et surtout de la nature du problème à résoudre. Il est rare qu'une seule méthode donne des résultats escomptés et l'on doit souvent combiner plusieurs observations et/ou plusieurs mesures.

Dans le cas des projets importants, il est nécessaire de conduire la campagne par étapes successives allant de la résolution des problèmes généraux à celles des points particuliers. On réservera toujours les essais ponctuels et coûteux pour la deuxième ou la troisième phase, après que la reconnaissance globale du site et la mise en évidence des principales difficultés auront été effectués.