

OBJECTIFS DE L'ENSEIGNEMENT :

Ce cours a pour objet de présenter à l'étudiant les différents types d'essais in-situ et en laboratoire pratiqués en mécanique des sols.

CONNAISSANCES PRÉALABLES RECOMMANDÉES :

Mécanique des sols 1 et 2.

CONTENU DE LA MATIÈRE :

<u>Chapitre I :</u>	SONDAGES ET FORAGES	(2 SEMAINE)
	Définition, Particularités, Sondages carottés, Techniques de carottages, Densité des sondages, Profondeur d'investigation.	
<u>Chapitre II :</u>	ECHANTILLONNAGES ET CARACTÉRISTIQUES GÉOTECHNIQUES	(2 SEMAINES)
<u>Chapitre III :</u>	ESSAIS MÉCANIQUES	(2 SEMAINES)
	Essais par battage, Essais de pénétration statique, Piézocone, Essais pressiométriques, Essais scissométriques	
<u>Chapitre IV :</u>	FORAGES DESTRUCTIFS	(1 SEMAINES)
	Les diagraphies instantanées et différées	
<u>Chapitre V :</u>	INSTRUMENTS ET SUIVI DES OUVRAGES	(2 SEMAINE)
<u>Chapitre VI :</u>	ETUDE GÉOTECHNIQUE	(2 SEMAINE)
	Mission du géotechnicien, Enquête préliminaire, Les différentes phases et programme de l'étude géotechnique	
<u>Chapitre VII :</u>	VARIABILITÉ ET INCERTITUDES	(2 SEMAINE)
	Hétérogénéité, Variabilité des sols, Incertitudes des mesures	
<u>Chapitre VIII :</u>	CHOIX DES TECHNIQUES D'INVESTIGATION	(2 SEMAINE)

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES :

1. M. Cassan (1988), *Les essais in situ en mécanique des sols 1. Réalisation et interprétation*. Edition Eyrolles.
2. M. Rat (1974), *Reconnaissance des sols*. Techniques de l'Ingénieur, Réf C224 V1.
3. P. Reiffsteck, D. Lossy, J. Benoît (2012), *Forages, sondages et essais in-situ géotechniques : Les outils pour la reconnaissance des sols et des roches*. Editeur : Presses Des Ponts.
4. P. Reiffsteck, M. Zerhouni, J.-L. Averlan (2018), *Essais de laboratoire pour la mécanique des sols et la géotechnique : les outils pour la reconnaissance des sols et des roches*. Presses de l'Ecole nationale des ponts et chaussées. CRC Press LLC, 2005.
5. Recommandations de l'AFTES (2012), *Caractérisation des incertitudes et des risques géologiques, hydrogéologiques et géotechniques*. (GT32 R2 F1).
6. G. Philipponnat, B. Hubert (1998), *Fondations et ouvrages en terre*. Edition Eyrolles.
7. H. Cambefort (1972), *Géotechnique de l'ingénieur et reconnaissance des sols*. Edition Eyrolles.
8. Union syndicale géotechnique – *Missions géotechniques types* (Projet de Normalisation), 1996.
9. Martin Van Staveren (2006), *Uncertainty and ground conditions: A risk management approach*. Elsevier.

Symboles :

Symbole	Désignation	Unité
$D_{\max}$	: Dimension maximale des plus gros éléments contenus dans le sol (équivalent au D_{95} du sol)	mm
ρ_d	: La masse volumique sèche	t/m^3
w_n	: Teneur en eau naturelle	(%)
w_{OPN}	: Teneur en eau optimum Proctor normal	(%)
w_L	: Limite de liquidité	(%)
w_P	: Limite de plasticité	(%)
I_P	: Indice de plasticité = $w_L - w_P$	(%)
I_C	: Indice de consistance = $(w_L - w_n) / I_P$	-
ES	: Equivalent de sable	(%)
VBS	: La valeur de bleu de méthylène d'un sol = $(g \text{ de bleu} / 100 \text{ g de sol}) \times 100$	(%)
IPI	: Indice portant immédiat	(%)
FS	: Coefficient de friabilité des sables	(%)
LA	: Coefficient Los Angels	(%)
MDE	: Coefficient micro-Deval en présence d'eau	(%)
FR	: Le coefficient de fragmentabilité	-
DG	: Le coefficient de dégradabilité	-

Abréviations :

GTR	: Guide des Terrassements Routiers
th	: Etat hydrique très humide
h	: Etat hydrique humide
m	: Etat hydrique moyen
s	: Etat hydrique sec
ts	: Etat hydrique très sec
LH	: Liant hydraulique

Chapitre I :

SONDAGES ET FORAGES

Le terme "forage" s'applique plus précisément à l'exécution d'un trou sans récupération d'échantillons. Son exécution peut être utilisée comme base pour la collecte d'informations (diagraphies) et la mise en place d'appareils spécifiques (installation de piézomètres, d'inclinomètres et de tassomètres). Le "sondage" est la réalisation d'un trou avec collecte d'échantillons ou la prise de mesures in situ.

1. Définition

Les sondages et forages sont des techniques fondamentales en géotechnique permettant d'obtenir des informations précieuses sur les caractéristiques du sous-sol, essentielles pour la conception et la construction de projets de Génie Civil. Ces méthodes consistent à pénétrer le sol ou la roche, à prélever des échantillons, ou à effectuer des mesures pour évaluer la composition, la résistance, et d'autres propriétés du matériau sous-jacent.

2. Particularités

Les sondages et forages en géotechnique présentent plusieurs particularités :

- **Variété des méthodes** : Il existe de nombreuses méthodes de sondage et de forage, chacune adaptée à des conditions spécifiques du site et des objectifs de collecte de données.
- **Profondeur variable** : La profondeur d'investigation varie en fonction des besoins du projet, allant de quelques mètres à plusieurs dizaines de mètres.
- **Caractère destructif ou non destructif** : Certains sondages sont non destructifs, tandis que d'autres impliquent la collecte d'échantillons de sol ou de roche, ce qui peut les rendre destructifs.
- **Analyse en laboratoire** : Les échantillons prélevés sont souvent analysés en laboratoire pour déterminer leurs propriétés mécaniques, chimiques, et hydrauliques.

3. Sondages Carottés

Les sondages carottés sont l'une des méthodes de sondage les plus courantes en géotechnique. Ils consistent à extraire des échantillons cylindriques de sol ou de roche à l'aide d'un outil de forage appelé carottier. Ces échantillons permettent une analyse détaillée des caractéristiques du matériau sous-jacent.

4. Techniques de Carottages

Plusieurs techniques de carottages sont utilisées en fonction des conditions du site et des objectifs de collecte de données :

- **Carottage à la tarière creuse** : Cette méthode est adaptée aux sols meubles et permet d'obtenir des échantillons non perturbés.
- **Carottage au diamant** : Utilisant des forets diamantés, cette technique est idéale pour les roches dures et permet d'obtenir des échantillons de grande qualité.
- **Carottage au rotopercuteur** : Cette méthode combine le carottage et le forage, adaptée aux sols et aux roches de diverses duretés.
- **Carottage au câble ou au tube** : Ces techniques sont utilisées pour obtenir des échantillons de grande longueur à partir de profondeurs importantes.

5. Densité des Sondages

La densité des sondages fait référence à la fréquence à laquelle les mesures de géotechnique sont effectuées le long d'un forage ou d'une section d'un site. La densité des sondages dépend de la complexité du projet, des caractéristiques du sol, et du budget disponible. Pour les projets critiques ou complexes, une densité élevée de sondages est souvent nécessaire pour minimiser les risques géotechniques.

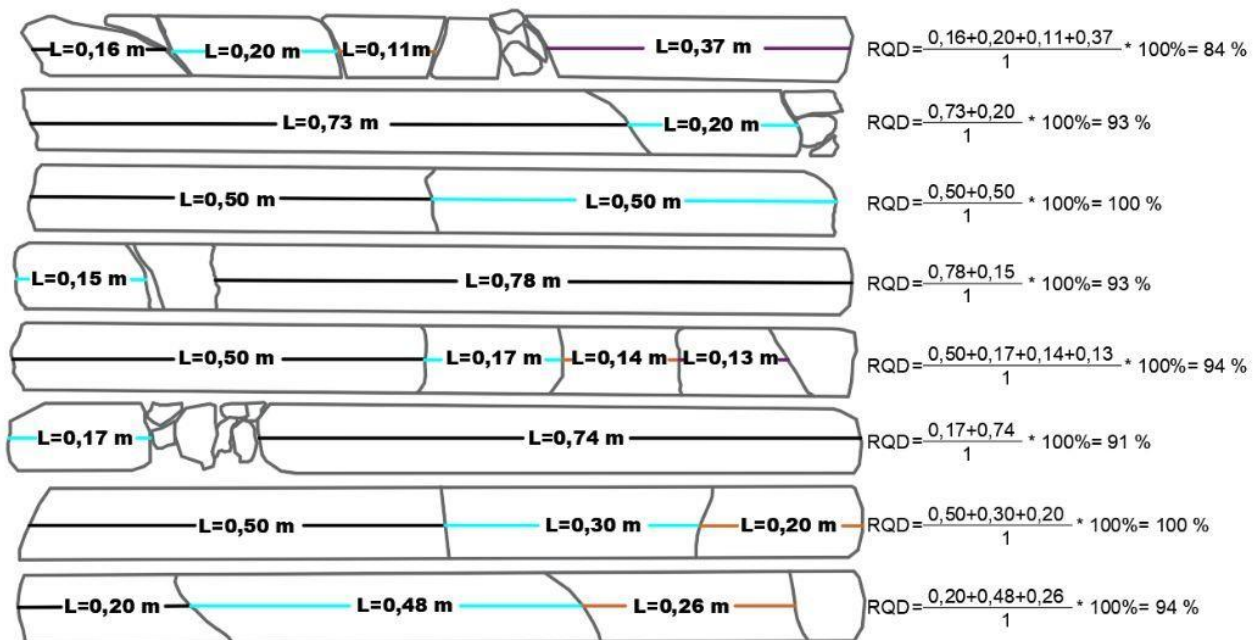
6. Profondeur d'Investigation

La profondeur d'investigation est la distance à laquelle les données du sous-sol sont collectées à partir de la surface. Elle dépend des objectifs du projet et des caractéristiques du site. Les sondages peuvent varier de peu de mètres pour des projets de petite envergure à plus de 30 mètres pour des structures profondes, comme les fondations de gratte-ciel.

En conclusion, les sondages et forages en géotechnique sont essentiels pour comprendre le sous-sol, évaluer les risques géotechniques, et concevoir des fondations solides. Les méthodes de carottages, la densité des sondages, et la profondeur d'investigation varient en fonction des besoins spécifiques du projet. Une planification minutieuse de ces activités est cruciale pour garantir la sécurité et la stabilité des structures construites.

Indice de désignation de la qualité des roches (RQD) :

La désignation de la qualité des roches (RQD) est un indice largement utilisé en géotechnique et en mécanique des roches pour caractériser la qualité des massifs rocheux. Le RQD est un paramètre essentiel pour la classification des masses rocheuses, nécessaire à la conception et à la construction de divers ouvrages d'art tels que des tunnels, des barrages, des mines et des talus.



Il existe plusieurs méthodes de classification des roches en géologie, et le choix de la méthode dépend souvent de l'objectif de l'étude et des caractéristiques des échantillons de roche. Voici quelques-unes des méthodes de classification des roches les plus courantes :

***Classification pétrographique : Cette méthode classe les roches en fonction de leur composition minéralogique et de leur texture. Elle repose sur l'observation au microscope des minéraux constitutifs des roches et de leur arrangement. Les trois principales catégories de roches dans cette classification sont les roches ignées, les roches sédimentaires et les roches métamorphiques.

***Classification géochimique : Cette méthode se base sur la composition chimique des roches. Les analyses chimiques permettent de déterminer la teneur en éléments majeurs et mineurs des roches. Les roches sont souvent classées en fonction de leur composition minéralogique en termes de pourcentages de minéraux spécifiques.

***Classification structurale : Cette méthode se concentre sur les caractéristiques structurales des roches, telles que la présence de fractures, de plis, de failles et de strates. Les roches peuvent être classées en fonction de leurs structures géologiques.

***Classification basée sur l'origine : Cette méthode classe les roches en fonction de leur mode de formation. Par exemple, les roches ignées sont formées par la solidification de la lave ou du magma, les roches sédimentaires sont issues de l'accumulation de sédiments, et les roches métamorphiques sont le résultat de la transformation de roches préexistantes sous l'effet de la chaleur et de la pression.

***Classification par âge géologique : Cette méthode classe les roches en fonction de leur âge, en utilisant des principes de stratigraphie et de datation radiométrique. Les roches sont regroupées en fonction de la période géologique à laquelle elles se sont formées.

Il est important de noter que certaines roches peuvent être classées de différentes manières en fonction de l'approche adoptée. Par conséquent, la classification des roches dépend de l'objectif de l'étude géologique et des informations que l'on souhaite obtenir sur les échantillons de roche.

Chapitre II :

ECHANTILLONNAGES ET CARACTÉRISTIQUES GÉOTECHNIQUES

L'échantillonnage et l'analyse des caractéristiques géotechniques sont des éléments clés dans l'étude et la compréhension du sol et du sous-sol, particulièrement en ingénierie civile et en géologie. Voici un aperçu détaillé de ces concepts :

1. Échantillonnage Géotechnique :

- **Objectif :** L'échantillonnage géotechnique vise à prélever des échantillons de sol ou de roche pour analyser leurs propriétés physiques et mécaniques. Cela permet de déterminer la faisabilité et la sécurité des constructions et des projets d'ingénierie.
- **Méthodes :** Il existe plusieurs méthodes d'échantillonnage, dont l'échantillonnage à la tarière, le sondage carotté, et l'utilisation de pénétromètres. Le choix de la méthode dépend de la nature du projet, du type de sol, et de la profondeur requise.

2. Caractéristiques Géotechniques :

- **Propriétés Physiques :** Ces propriétés incluent la granulométrie, la densité, la porosité, et la teneur en eau. Elles sont fondamentales pour comprendre le comportement du sol sous différentes conditions.
- **Propriétés Mécaniques :** Elles comprennent la résistance au cisaillement, la compressibilité, et la perméabilité. Ces propriétés aident à évaluer la capacité du sol à supporter des structures et à gérer l'écoulement des eaux souterraines.
- **Tests en Laboratoire :** Des échantillons de sol sont souvent analysés en laboratoire pour mesurer précisément ces propriétés. Les tests courants incluent les essais de compression, de cisaillement, et de perméabilité.

3. Importance en Ingénierie :

La connaissance des caractéristiques géotechniques est cruciale pour la conception et la construction d'ouvrages tels que les fondations, les tunnels, les barrages et les routes. Elle aide à anticiper et à gérer les risques liés au sol, comme les tassements, les glissements de terrain, ou les problèmes de drainage.

4. Applications :

En plus de leur rôle dans la construction, ces caractéristiques sont essentielles dans l'évaluation des risques géologiques, l'exploration minière, l'aménagement du territoire, et la gestion des ressources en eau.

En résumé, l'échantillonnage et l'analyse des caractéristiques géotechniques sont des étapes essentielles pour assurer la sécurité et la viabilité des projets d'ingénierie et de construction, ainsi que pour une gestion efficace des ressources naturelles et des risques environnementaux.

Chapitre III : ESSAIS MÉCANIQUES

Les essais mécaniques du sol sont des méthodes utilisées en géotechnique pour évaluer les propriétés mécaniques et physiques du sol. Ils sont essentiels pour la conception et la mise en œuvre de projets de construction et d'ingénierie. Voici une explication des différents types d'essais mécaniques que vous avez mentionnés :

1. Essais par Battage :

- **Principe :** Ces essais impliquent de battre un équipement standardisé dans le sol et de mesurer la résistance du sol à la pénétration. L'exemple le plus courant est l'essai Standard Penetration Test (SPT).
- **Utilité :** Il sert à déterminer la densité relative et la compacité des sols granulaires et la cohésion dans les sols fins.

2. Essais de Pénétration Statique :

- **Principe :** Cet essai mesure la résistance du sol à la pénétration d'une sonde à une vitesse contrôlée et constante.
- **Utilité :** Il est utilisé pour déterminer les propriétés du sol telles que la résistance au cisaillement et la compressibilité.

3. Piézocône (Essai au CPTu : Essai de Pénétration du Cône Piézoélectrique) :

- **Principe :** Le piézocône est une variation de l'essai de pénétration statique, où une sonde équipée de capteurs de pression est enfoncée dans le sol.
- **Utilité :** Il mesure la résistance à la pénétration, la pression interstitielle et la résistance latérale, fournissant des informations détaillées sur la stratigraphie du sol et ses propriétés hydrauliques.

4. Essais Pressiométriques :

- L'essai pressiométrique est une méthode géotechnique visant à évaluer les propriétés mécaniques des sols. Il consiste à introduire de l'eau ou de l'air dans une sonde enfoncée dans le sol tout en mesurant la pression exercée. Cette pression est ensuite utilisée pour déterminer la compressibilité et la résistance du sol.
- L'intérêt de l'essai pressiométrique réside dans sa capacité à fournir des données précieuses pour la conception des fondations et des ouvrages géotechniques. En analysant la réponse du sol à la pression, les ingénieurs peuvent évaluer la capacité portante du sol, sa déformabilité, et ainsi optimiser la conception des structures pour assurer leur stabilité et durabilité. Cela permet de prendre des décisions éclairées lors de la planification et de l'exécution de projets de construction.
- **Principe :** Cet essai implique l'expansion radiale d'une sonde pressiométrique à l'intérieur d'un trou de forage et la mesure de la réponse du sol.
- **Utilité :** Il est utilisé pour déterminer le module de déformation du sol, la résistance au cisaillement, et d'autres propriétés mécaniques.

5. Essais Scissométriques :

- **Principe :** Ces essais, moins courants, impliquent la mesure de la résistance du sol à la déformation ou à la rupture sous une contrainte de cisaillement.

- **Utilité :** Ils aident à évaluer la résistance au cisaillement du sol, cruciale pour la conception des fondations et des pentes.

Importance de ces Essais :

- **Conception de Fondation :** Les données issues de ces essais aident à concevoir des fondations sûres et efficaces pour les bâtiments, les ponts et autres structures.
- **Évaluation des Risques :** Ils sont essentiels pour évaluer les risques de tassement, de glissement de terrain, et d'autres problèmes géotechniques.
- **Planification de Construction :** Ces essais fournissent des informations vitales pour la planification et l'exécution de projets de construction et d'ingénierie.

En résumé, ces essais mécaniques sont cruciaux pour comprendre les propriétés du sol et pour assurer la stabilité et la sécurité des structures construites sur ou dans le sol.

Chapitre IV :

FORAGES DESTRUCTIFS

Les forages destructifs, accompagnés de diagraphies instantanées et différées, sont des techniques couramment utilisées dans les domaines de la géotechnique et de la prospection géologique et pétrolière. Ils offrent des informations essentielles sur la nature et les propriétés des formations géologiques traversées. Voici un aperçu détaillé de ces techniques :

Forages Destructifs

1. **Principe** : Le forage destructif implique la perforation du sol ou de la roche, où le matériau est broyé ou écrasé pendant le processus. Cela contraste avec les forages non-destructifs, comme le carottage, où l'on cherche à extraire un échantillon intact.
2. **Applications** : Ces forages sont utilisés pour des études géologiques, la recherche de ressources naturelles (comme le pétrole et les gaz), et parfois dans le cadre de projets de construction.

Diagraphies Instantanées (Logging While Drilling - LWD)

1. **Définition** : Les diagraphies instantanées sont réalisées en temps réel pendant l'opération de forage. Elles utilisent des outils intégrés dans l'ensemble de forage pour mesurer diverses propriétés géologiques et physiques.
2. **Avantages** : Cette méthode permet d'obtenir des informations presque immédiates sur la formation traversée, ce qui est crucial pour la prise de décision rapide et l'ajustement des stratégies de forage.
3. **Mesures** : Elles peuvent inclure la densité des formations, la porosité, la résistivité électrique, la pression de formation, et d'autres propriétés géophysiques.

Diagraphies Différées (Wireline Logging)

1. **Définition** : Les diagraphies différées sont effectuées après l'achèvement du forage. Des instruments de mesure sont descendus dans le trou de forage sur un câble, ou wireline, pour enregistrer les données.
2. **Avantages** : Ces diagraphies offrent une gamme plus étendue de mesures et sont souvent plus détaillées que les diagraphies instantanées.
3. **Mesures** : Les paramètres mesurés peuvent inclure la résistivité électrique, la radioactivité naturelle, les propriétés acoustiques, et d'autres caractéristiques géophysiques et pétrophysiques.

Importance en Exploration et en Géotechnique

- **Analyse Géologique** : Ces techniques fournissent des informations détaillées sur la stratigraphie, la composition minérale, et les propriétés mécaniques des formations.
- **Applications en Pétrologie** : Elles sont essentielles pour évaluer les potentiels de réservoirs d'hydrocarbures, en déterminant la porosité, la perméabilité, et la saturation en fluides des formations.
- **Sécurité et Efficacité** : En fournissant des informations précises sur les formations traversées, elles contribuent à la sécurité et à l'efficacité des opérations de forage.

En résumé, les forages destructifs combinés aux diagraphies instantanées et différées jouent un rôle crucial dans la compréhension des formations souterraines, particulièrement dans les secteurs de l'exploration pétrolière et gazière, ainsi qu'en géotechnique.

Chapitre V :

INSTRUMENTS ET SUIVI DES OUVRAGES

Le suivi des ouvrages en génie civil, comme les ponts, les barrages, les tunnels, les bâtiments et autres infrastructures, est crucial pour assurer leur sécurité, leur durabilité et leur performance optimale. Pour cela, une variété d'instruments de mesure et de technologies de surveillance sont utilisés. Voici un aperçu de ces instruments et de leur utilisation :

1. Capteurs de Contrainte et de Déformation :

- **Extensomètres** : Mesurent les déformations ou les allongements dans les matériaux.
- **Jauges de contrainte** : Détectent les contraintes dans les structures en mesurant la variation de résistance électrique.

2. Inclinomètres et Accéléromètres :

- **Inclinomètres** : Mesurent les changements d'angle ou d'inclinaison d'une structure par rapport à la gravité.
- **Accéléromètres** : Détectent les accélérations ou les vibrations dans les structures, importants pour l'analyse sismique.

3. Capteurs de Pression et de Force :

- **Cellules de charge** : Mesurent les forces appliquées ou le poids supporté par les éléments structuraux.
- **Baromètres** : Utilisés pour surveiller les variations de pression atmosphérique pouvant affecter certaines structures.

4. Mesure de Déplacement et de Fissuration :

- **Jauges de fissuration** : Suivent l'évolution des fissures dans le béton ou d'autres matériaux.
- **Lasers et capteurs de déplacement** : Mesurent les mouvements ou les déplacements des composants structurels.

5. Capteurs Environnementaux :

- **Thermomètres** : Suivent les variations de température pouvant affecter les matériaux.
- **Anémomètres** : Mesurent la vitesse du vent, cruciale pour les structures élevées comme les gratte-ciels ou les ponts.

6. Technologies de Surveillance à Distance :

- **Systèmes GPS** : Fournissent des mesures précises de déplacement ou de déformation.
- **Imagerie par satellite** : Utilisée pour surveiller les changements à grande échelle et les mouvements de terrain.

7. Systèmes de Gestion de Données :

- **Logiciels spécialisés** : Permettent l'analyse et l'interprétation des données collectées.
- **Systèmes d'alerte précoce** : Avisent les responsables en cas de détection de valeurs anormales.

8. Inspections Visuelles et Manuelles :

- **Drones :** Pour réaliser des inspections visuelles détaillées des zones difficiles d'accès.
 - **Inspections manuelles :** Par des ingénieurs ou des techniciens pour des évaluations plus subjectives.
-

L'utilisation de ces instruments et technologies permet une surveillance continue et une évaluation précise de l'état de santé des structures. Cela contribue à une maintenance proactive, à la prévention des défaillances et à la prolongation de la durée de vie des ouvrages d'ingénierie.

Chapitre V :

ETUDE GÉOTECHNIQUE

L'étude géotechnique est un élément crucial dans le domaine de la construction et du génie civil. Elle est menée par un géotechnicien et comprend plusieurs phases clés. Voici un aperçu de la mission du géotechnicien, de l'enquête préliminaire, et des différentes phases d'une étude géotechnique :

I. Mission du Géotechnicien

1. **Évaluation des Propriétés du Sol** : Déterminer les caractéristiques physiques et mécaniques du sol (tels que la texture, la densité, la porosité, la perméabilité).
2. **Analyse des Risques Géotechniques** : Identifier les risques potentiels comme les glissements de terrain, le tassement, la liquéfaction en cas de séisme.
3. **Conseil en Conception** : Fournir des recommandations sur les fondations, les systèmes de drainage, la stabilisation du sol, etc.
4. **Surveillance et Contrôle** : Superviser les travaux de construction pour assurer la conformité avec les recommandations géotechniques.

II. Enquête Préliminaire

1. **Revue de la Littérature et des Données Existantes** : Collecter les informations historiques et existantes sur la géologie, l'hydrologie, et les précédentes constructions dans la zone.
2. **Inspection Visuelle du Site** : Évaluer les conditions de surface, les signes de problèmes géotechniques (comme des fissures), et l'environnement général.

III. Phases de l'Étude Géotechnique

1. **Phase de Reconnaissance (G1)** :
 - **Objectif** : Évaluer la faisabilité du projet et identifier les grands enjeux géotechniques.
 - **Activités** : Analyse des cartes géologiques, inspections de surface, sondages exploratoires limités.
2. **Phase d'Avant-Projet (G2)** :
 - **Objectif** : Fournir des données détaillées pour la conception du projet.
 - **Activités** : Essais en laboratoire et in situ plus poussés, études de la nappe phréatique, analyses de stabilité.
3. **Phase de Projet (G3)** :
 - **Objectif** : Affiner les recommandations pour la construction.
 - **Activités** : Calculs précis pour les fondations, les soutènements, préconisations sur les techniques de construction.
4. **Phase de Réalisation (G4)** :
 - **Objectif** : Superviser et valider les travaux en cours.
 - **Activités** : Suivi des travaux, vérification du respect des préconisations, tests et contrôles qualité.

5. Phase de Diagnostic (G5) :

- **Objectif** : Évaluer les problèmes géotechniques survenus après construction.
- **Activités** : Analyse des causes, proposition de solutions de réparation ou de renforcement.

IV. Programme de l'Étude Géotechnique

- **Planification des Enquêtes** : Déterminer les types d'essais (forages, essais de pénétration, essais de charge) et leur localisation.
- **Collecte de Données** : Réaliser les essais et mesurer les propriétés du sol et de la roche.
- **Analyse et Modélisation** : Utiliser les données pour modéliser le comportement du sol sous les charges prévues.
- **Rapport et Recommandations** : Rédiger un rapport détaillant les résultats, les analyses et fournir des recommandations concrètes pour la conception et la construction.

En résumé, l'étude géotechnique est un processus complet qui guide la conception et la construction en fournissant des informations essentielles sur le sol et les conditions géologiques du site. Elle est fondamentale pour assurer la sécurité, la durabilité et la viabilité économique des projets de construction.
