

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

**MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

**Université des Sciences et de la Technologie d'Oran
Mohamed BOUDIAF**



Faculté d'Architecture et de Génie Civil

Département de Génie Civil

Polycopié intitulé :

Pathologie des ouvrages géotechniques

Élaboré par :

Mme BOUALLA Nabila (Docteur en Génie Civil / Option Géotechnique- Matériaux,
U.S.T.O)

SOMMAIRE :

Table des matières

AVANT-PROPOS :	6
INTRODUCTION GENERALE :	7
CHAPITRE 1 : DEFINITIONS ET GENERALITES SUR LA PATHOLOGIE DES OUVRAGES	8
1. Introduction :	9
2. Quelques définitions :	9
2.1. Pathologie :	9
2.2. Désordre :	9
2.3. Vice :	9
2.4. Sinistre :	9
2.5. Ruine :	10
2.6. Remède :	10
2.7. La prévention des désordres:	10
2.8. Diagnostic :	11
2.9. Réparation et renforcement :	11
2.9.1. Réparation :	11
2.9.2. Renforcement :	11
3. Etude pathologique :	12
4. Manifestation et familles de pathologies :	12
CHAPITRE 2 :	13
PATHOLOGIES DES FONDATIONS	13
1. Introduction :	14
2. Considération générale :	14
3. Typologies des fondations :	14
3.1. Fondations superficielles et semi-enterrées:	15
3.1.1. Définition :	15
3.1.2. Principe de dimensionnement :	16
3.2. Fondations profondes :	17
3.2.1. Définition :	17
3.2.2. Principes de dimensionnement :	17
4. Conception des fondations :	18
4.1. Gel du sol :	18

4.2. Affouillement du sol :	18
4.3. Environnement :	18
4.4. Présence de singularités dans le sous-sol :	19
4.5. Gonflement de sol :	19
4.6. Végétation :	19
4.7. Installations frigorifiques :	19
4.8. Chaudières et fourneaux :	20
4.9. Joints de tassement et de retrait :	20
4.10. Fondations sur un talus :	20
4.11. Remblais non contrôlés et déchets :	21
4.12. Eaux agressives :	21
5. Précautions à prendre en compte :	22
6. Pathologies liées aux problèmes de fondations :	22
6.1. Tassement du sol :	23
6.1.1. Tassement différentiel :	23
6.1.2. Manifestation des tassements :	25
6.1.3. Mesures à prendre en compte contre le tassement :	25
6.1.3.1. Mesures relatives au sol :	25
6.1.3.2. Mesures relatives aux structures :	27
6.2. Les fissures :	28
7. Problèmes liés aux sols problématiques :	29
7.1. Stabilité des talus:	29
7.2. Terrassements - reprises en sous-œuvre :	29
7.3. Gonflement des sols :	30
7.4. Sols mous :	32
7.5. Variation du niveau de la nappe :	33
7.6. Sols et cavités :	34
7.7. Anciennes carrières :	35
7.8. Liquéfaction des sols :	38
7.9. Construction au voisinage d'un ouvrage existant :	39
7.9.1. Interaction des fondations :	39
7.9.2. Battage de pieux :	40
7.9.3. Frottement négatif sur les pieux :	40
7.9.4. Sollicitation des pieux à la flexion :	40
7.10. Absence de reconnaissance d'étude de sol (ou incomplètes ou erronées) :	41
7.11. Fondations sur remblai :	41

7.12. Fondations sur un remblai surmontant une couche de tourbe :	41
7.13. Bâtiments fondés sur une couche d'assise (remblai) d'épaisseur variable :	42
7.14. Fondations sur d'anciennes carrières :	43
7.15. Bâtiments de grande longueur :	44
7.16. Glissement de la construction :	45
8. Méconnaissance des propriétés et des phénomènes (physiques, chimiques) des sols d'appui :	46
CHAPITRE 3 :	48
PATHOLOGIES DES MURS DE SOUTÈNEMENT	48
1. Introduction :	49
2. Définition :	49
3. Typologies des murs de soutènement :	49
3.1. Les murs considérés comme auto-stables du fait de leur géométrie :	50
3.1.1. Les murs poids ou murs gravitaires :	50
3.1.2. Murs lestés ou murs cantilever :	51
3.2. Les murs dont la stabilité est assurée par d'autres ouvrages :	52
3.2.1. Murs de sous-sol enterrés :	52
3.2.2. Murs maintenus ou retenus par des tirants d'ancrage :	53
3.2.3. Murs auto-stables type « bêche » :	55
4. Fonctionnement d'un mur de soutènement :	56
5. Stabilité d'un mur de soutènement :	56
5.1. Stabilité interne :	56
5.2. Stabilité externe :	57
5.2.1. Stabilité au renversement :	57
5.2.2. Stabilité au glissement :	57
5.2.3. Stabilité au poinçonnement :	57
6. Pathologies des murs de soutènement :	58
6.1. Généralités :	58
6.2. Les facteurs affectant des désordres aux murs de soutènement :	59
6.2.1. Absence d'étude :	59
6.2.2. Absence ou défaut de drainage :	59
6.2.3. Mauvais dimensionnement :	60
6.2.4. Défaut d'exécution de l'ouvrage :	60
6.2.5. Principales dispositions à prendre :	61
6.3. Désordres concernant les murs de soutènement :	62
6.3.1. Les murs enterrés soumis à la poussée des terres :	62
6.3.1.1. Parois de résistance :	62

6.3.1.2. Remblaiement prématuré :.....	63
6.3.1.3. Absence de précautions pendant les travaux :.....	63
6.3.2. Les murs auto-stables massifs (ou murs poids) en maçonnerie :	63
6.3.2.1. Absence ou erreur de conception :	64
6.3.2.2. Absence ou insuffisance de butée en pied de mur — Absence d'ancrage :	64
6.3.2.3. Paroi en maçonnerie mal dimensionnée pour encaisser des contraintes de traction :	65
6.3.2.4. Absence de drainage ou inefficacité de celui-ci par colmatage des drains :.....	66
6.3.2.5. Action de l'eau dans un massif :.....	66
6.3.2.6. Effet du gel sur le terrain, gonflement avec liquéfaction du terrain (en fin de la période de gel) :.....	67
6.3.2.7. Causes diverses :	67
6.3.3. Les murs auto-stables en béton armé (Type cantilever):.....	68
7. Etudes de cas :	71
CHAPITRE 4 :	75
DIAGNOSTIC, INVESTIGATIONS ET METHODES D'AUSCULTATION	75
1. Introduction :	76
2. Diagnostic général :	76
3. Champ d'investigations :	77
4. Etapes du diagnostic :	78
4.1. Avant la première visite des lieux :.....	78
4.1.1. Renseignements généraux et recherche documentaire :.....	78
4.1.2. Notice descriptive :	78
4.1.3. Etude de sol :.....	78
4.1.4. S.I.G : système d'information géographique :.....	79
4.2. L'inspection détaillée :	79
4.2.1. Observation de la structure :	79
4.2.1.1. Nature des fondations et des ferrillages :.....	79
4.2.1.2. Ancrage des fondations :.....	79
4.2.1.3. Observation du sol :.....	80
4.2.3. Observation de l'environnement :.....	81
5. Les investigations approfondies :.....	81
5.1. Mise en observation des dommages :.....	81
5.2. Le recours à un géomètre expert :	82
5.3. Investigations géotechniques :	82
5.3.1. Sondages manuels et destructifs :.....	82
5.3.2. Sondage à la tarière :	83
5.3.3. Essai pénétrométrique :.....	84

Pathologie des ouvrages géotechniques

5.3.4. Essai pressiométrique :	84
5.3.5. Essais sondages à la pelle mécanique :	85
5.3.6. Essais en laboratoire :	86
6. Diagnostic final :	86
6.1. Facteurs de prédisposition et facteurs déclenchant-incidents :	86
6.1.1. Facteurs de prédisposition :	86
6.1.2. Facteurs de déclenchement :	87
6.2. Indices :	88
6.3. Analyse des risques identifiés :	88
7. Méthodes d'auscultation des fondations :	89
7.1. Les essais non destructifs :	89
7.2. Les essais destructifs :	89
7.3. Moyens d'auscultation des fondations :	89
CONCLUSION GENERALE :	100
REFERNCES BIBLIOGRAPHIQUES :	101

AVANT-PROPOS :

« Il n’y a rien de plus instructif qu’une expérience ratée »

Eugene Freyssinet

La durabilité des ouvrages est une caractéristique très importante définie comme étant leur capacité d’assurer la tenue en service prévue durant la conception et la construction d’un ouvrage de génie civil. C’est un point fondamental du cahier des charges vu qu’elle est la garantie d’une sécurité et d’une durée de services accrus de ces ouvrages. Cette durabilité assure également une économie considérable sur le long terme, car de tels ouvrages nécessitent peu ou pas de réparations ultérieures, économisant ainsi des coûts de réparation pouvant être très élevés voire dépassant les coûts initiaux de construction.

C’est dans ce contexte que s’inscrit le diagnostic d’un ouvrage. A partir du moment où des pathologies apparaissent, il est important de diagnostiquer leurs causes, et leurs ampleurs sans que la stabilité de l’ouvrage ne soit remise en cause. Une fois les causes et les pathologies sont diagnostiquées, il est nécessaire de prévoir une réhabilitation pour rétablir les caractéristiques physiques et mécaniques initiales de l’ouvrage. De plus, il est possible de protéger les ouvrages par différents moyens, selon les pathologies et la durée de pérennisation espérée afin de retarder ou limiter des pathologies similaires. Dans notre pays, ces expertises se développent de plus en plus grâce à la volonté des pouvoirs publics et des ingénieurs, de pérenniser l’existant dans un schéma de développement durable.

Dans cette optique, ce projet support pédagogique, destiné aux étudiants de profil géotechnique, est organisé en quatre chapitres. Dans le premier chapitre, nous donnons un rappel sur les définitions élémentaires relatives à la pathologie des ouvrages. Le second et le troisième chapitre comportent un rappel de quelques éléments de base en géotechnique et une description détaillée des pathologies des ouvrages géotechniques les plus courantes, en vue d’insister sur la nécessité des travaux de réparation et de protection pour une longévité dans le temps. Nous introduirons une démarche pour un bon diagnostic dans le troisième chapitre.

INTRODUCTION GENERALE :

L'objectif de ce travail était d'étudier la durabilité des réparations des ouvrages géotechniques. Qu'elle que soit l'importance de l'ouvrage, une connaissance convenable des caractéristiques du sol sur lequel on doit le construire est indispensable. Le plan d'investigations et le choix des techniques de reconnaissance dépendent du type d'ouvrage et de la nature du sol.

La conception de l'ouvrage doit prendre en considération l'impact que celui-ci peut avoir sur l'environnement, aussi bien pendant les travaux d'exécution qu'en phase d'exploitation.

L'entretien et la maintenance de nos structures et infrastructures constituent un défi majeur pour notre société. Les dégradations subies par les ouvrages géotechniques sont liées dans tous les cas à la présence d'eau et, dans les environnements courants, à la corrosion des armatures, qui engendre gonflement de l'acier et épaufrures dans le béton.

Aussi, nous avons mis l'accent sur l'importance du diagnostic dans l'opération de réhabilitation des ouvrages. Nous avons également présenté les différents moyens disponibles pour réaliser un bon diagnostic. Le diagnostic est considéré comme l'étape clé permettant la détermination des types de pathologies dont peut souffrir un ouvrage et leur ampleur. Cette étape va permettre de mettre en œuvre les méthodes de réparation et de protection les plus adaptées. Nous pouvons conclure que le diagnostic est un outil d'aide à la décision au maître d'ouvrage pour la durabilité de son ouvrage.

La prise en compte de l'environnement dans lequel l'ouvrage est construit est fondamentale, non seulement dans le cas de la construction neuve, mais aussi en situation de maintenance et de réparation. Il ressort que la proportion de désordres de fondation affectant les ouvrages de faible importance, telles que les maisons individuelles, est la plus élevée ceci tenant au fait que les études de constructions plus importantes sont, en général, confiées à un bureau d'études ; un organisme spécialisé étant d'autre part chargé du contrôle des études et des travaux.

Si les désordres de fondations sont relativement rares en raison des coefficients de sécurité à appliquer, tant sur les capacités du sol, que sur celles des matériaux (béton, acier), ils ont en revanche parfois des conséquences financières très lourdes.

***CHAPITRE 1 : DEFINITIONS ET
GENERALITES SUR LA
PATHOLOGIE DES OUVRAGES***

Pathologie des ouvrages géotechniques

1. Introduction :

Depuis plusieurs décennies, face à l'accroissement des coûts engendrés par les « sinistres » (effondrements d'ouvrages, désordres de toute nature,...) tous ceux qui participent à l'acte de construire sont sensibilisés de plus en plus aux notions de « pathologie » et de « prévention ». Le choix des mots dans une telle sensibilisation est important ; aussi est-il nécessaire d'en préciser le sens au début de ce mémoire.

2. Quelques définitions :

2.1. Pathologie :

C'est l'étude des désordres et surtout l'étude statistique, systématique et ordonnée des désordres et des sinistres sont en effet, relativement récentes. La signification de ce terme issu de la science médicale est la suivante :

D'après le Robert : « Science qui a pour objet l'étude et la connaissance des causes et symptômes des maladies ». Si l'on applique cette définition aux ouvrages, les maladies seraient les désordres qui, en s'aggravant, donnent lieu à des sinistres ; ces derniers pouvant conduire à la ruine des ouvrages.

D'après le Littré : « Science qui traite de tous les désordres survenus soit dans la disposition des organes, soit dans les actes qu'ils remplissent ». La transposition de ce terme est assimilable à la notion de transformation, réparations après désordres ou sinistres et, à la limite, reconstruction.

2.2. Désordre :

Altération, perturbation, trouble, dérèglement, vice...

2.3. Vice :

La définition de ce mot est plus proche de : défaut, imperfection grave, défectuosité. Le terme 'vice de construction' est très usité. Mais, il s'applique surtout aux ouvrages neufs, plus qu'aux ouvrages dégradés par l'usage ou les agents extérieurs.

2.4. Sinistre :

Événement catastrophique naturel qui occasionne des dommages, des pertes...

Pathologie des ouvrages géotechniques

Ce terme est couramment utilisé en matière d'assurance. C'est en fait l'aggravation des désordres qui conduit aux sinistres et éventuellement à la ruine partielle ou totale d'un ouvrage.

2.5. Ruine :

Une ruine est la grave dégradation d'un édifice allant jusqu'à l'écroulement partiel ou total. C'est destruction d'un ouvrage qui tombe de lui-même ou que l'on fait tomber.

En d'autres termes, la ruine constitue l'état ultime, limite ou final d'une construction ou d'un ouvrage après destruction partielle ou totale.

« Tomber en ruine » signifie « crouler, s'effondrer ». Il y a donc aggravation des dommages puisque l'on arrive à l'effondrement ou à la destruction totale ou partielle de l'ouvrage.

2.6. Remède :

L'origine de ce mot est médicale. Remèdes, désigne tout ce qui est employé au traitement d'une maladie. Un terme analogue est proposé est celui de « solution ».

2.7. La prévention des désordres:

La prévention c'est tout ce que l'on peut faire avant qu'un problème n'arrive, pour l'empêcher justement d'arriver. Il s'agit donc d'alerter, d'attirer l'attention, de signaler, d'informer, de sensibiliser, de prévenir. La prévention c'est le contraire de l'improvisation, il s'agit en fait de réfléchir avant d'agir. De repérer les sources d'ennuis, non pour renoncer à l'action mais pour la maîtriser et la réussir ainsi du premier coup (Tableau 1).

Dans la construction, les erreurs et défauts peuvent apparaître dès la phase de conception ou plus tard lors de l'exécution des travaux. Dans le cas de la conception, on peut facilement rectifier des plans ou des pièces écrites, tant que les ouvrages ne sont pas commencés. Lorsque les erreurs ou les défauts sont détectés en cours d'exécution, la résolution du problème devient plus compliquée et en tout cas plus coûteuse. Il faut alors étudier des solutions de reprise acceptables, ou bien démolir et recommencer.

Toute erreur, mauvais choix ou souci d'économie excessive se traduiront, tôt ou tard, par des désordres ou sinistres difficiles à réparer, le choix des matériaux doit relever du même souci. Le contrôle doit intervenir à différentes phases. Dès la conception en intervenant au niveau des calculs et matériaux choisis ; puis lors des travaux en émettant des observations et réserves une bonne conception des ouvrages est par conséquent fondamentale.

<u>Conception</u>	<u>Matériaux</u>	<u>Mise en œuvre</u>
<ul style="list-style-type: none">- Intégrant sol de fondation.- Choix des matériaux et des techniques.- Calculs corrects.	<ul style="list-style-type: none">- Bonne qualité.- Fabrication fiables et contrôlées (Autocontrôle).	<ul style="list-style-type: none">- Conforme aux règles de l'art (DTU, DTR, etc....).- Correcte (personnel qualifié).- Autocontrôle de l'entreprise.- Contrôle technique.

USAGE NORMAL ⇒ DURABILITE ⇒ ENTRETIEN PERIODIQUE

Tableau 1. Eléments de la prévention active coordonnée.

2.8. Diagnostic :

Le diagnostic se fonde sur l'étude des symptômes, anomalies de structure ou de fonctionnement, et sur la connaissance des pathologies, pour porter un jugement sur l'état et le fonctionnement de l'ouvrage.

2.9. Réparation et renforcement :

Il est important de distinguer entre les termes Réparation et Renforcement. Les deux termes se réfèrent à des modifications effectuées sur un ouvrage, mais dans les contextes différents.

2.9.1. Réparation :

La réparation se réfère à des actions qui améliorent la fonctionnalité des composants défectueux, détériorés ou endommagés par certaines causes dans un ouvrage. Le but de la réparation est de corriger les défauts observés et d'apporter à l'édifice sa forme architecturale d'origine. En général les réparations, dans leur nature non-structurale (injection des fissures dans un élément structural), sont peu probables d'améliorer la résistance de la structure. Les travaux de réparation peuvent concerner le colmatage des fissures, le chemisage de certains éléments porteurs, remise en état des murs non porteurs et cloisons, réparation des corps d'état secondaires et ornements architecturaux etc.

2.9.2. Renforcement :

Le renforcement vise spécifiquement à renforcer la capacité structurelle (résistance, rigidité, ductilité, stabilité et intégrité) qui peut être jugé insuffisant ou vulnérable. Par exemple le

Pathologie des ouvrages géotechniques

renforcement sismique peut effectivement améliorer les performances d'un bâtiment contre les tremblements de terre, et pourrait même satisfaire aux exigences d'un code parasismique.

3. Etude pathologique :

Une étude pathologique est l'étude des désordres affectant un ouvrage ou un matériau en œuvre. Elle comprend :

- L'observation et l'analyse des symptômes et de leur processus de formation, ainsi que des conditions de mise en œuvre ;
- L'établissement d'un diagnostic sur les causes probables et sur les risques d'évolution du désordre ;
- La recherche de remèdes ou traitements curatifs à envisager.

4. Manifestation et familles de pathologies :

Le classement des causes principales de désordres pour les ouvrages correspond au classement type basé sur la division des responsabilités entre les concepteurs (y compris les calculs) et les réalisateurs (exécution sur chantier).

Les pathologies peuvent être classées en plusieurs familles :

- Les dégradations superficielles ;
- Les déformations ;
- Les fissurations ;
- Les dégradations d'ordre structurel.



CHAPITRE 2 :
PATHOLOGIES ***DES***
FONDTATIONS

1. Introduction :

En général, les désordres dus à des problèmes de fondation entraînent des frais importants. Ils sont très variés et d'origines diverses. Leurs effets peuvent aller de la fissuration de la structure jusqu'à sa mise en péril. C'est-à-dire son abandon pur et simple. La construction devenant impropre à sa destination initiale.

Ainsi, dans ce chapitre, nous allons passer en revue les différents cas de pathologie liée aux fondations.

2. Considération générale :

Le rôle des fondations est de transmettre au sol les charges appliquées à une structure et d'assurer sa stabilité. Pour tout système de fondation, on doit procéder à une double vérification :

- Les efforts transmis par la fondation ne doivent pas provoquer le poinçonnement du sol. On prend normalement un coefficient de sécurité égal ou supérieur à 3 par rapport à la charge de rupture.
- Les tassements et les mouvements produits dans le sol sous l'action des charges exercées par les fondations ou par tout autre effet (gonflement des sols, le gel...) ne doivent pas entraîner des désordres inadmissibles dans la structure (fissuration, rupture de canalisations, ...) ou dépasser une certaine limite imposée par la destination de l'ouvrage.

3. Typologies des fondations :

Le transfert des charges, essentiellement celles des verticales, de la structure au sol peut se faire de différentes manières, qui correspondent à deux grandes catégories des structures de fondation, qui à leur tour se composent de différentes typologies de fondation.

On différencie les fondations superficielles et les fondations profondes en fonction de leur élancement (rapport entre la profondeur d'encastrement H et la largeur B de la fondation) (Figure 1):

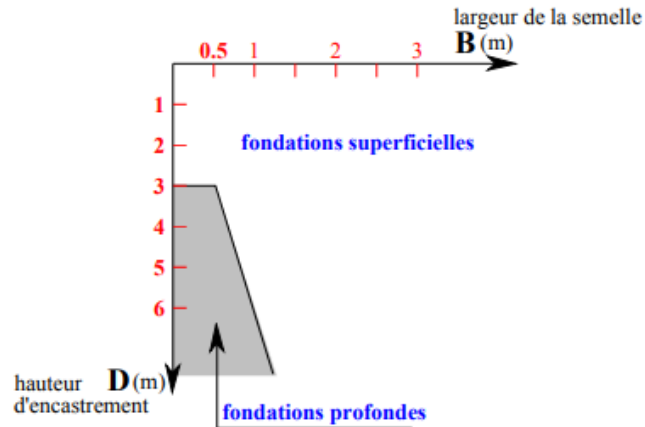


Figure 1. Fondation profonde et superficielle.

3.1. Fondations superficielles et semi-enterrées:

3.1.1. Définition :

Une fondation superficielle est définie par les caractéristiques géométriques décrites ci-après (Figure 5):

- La largeur B d'une semelle est le plus petit côté de la semelle ;
- La longueur L d'une semelle rectangulaire correspond au grand côté. Il convient de distinguer les semelles suivantes :
 - Les semelles circulaires $B = 2R$, R étant le rayon de la semelle,
 - Les semelles carrées $B = L$,
 - Les semelles rectangulaires $B \neq L$,
 - Les semelles continues $B \neq L$.
- La surface A ;
- L'épaisseur h de la semelle ;
- La hauteur d'encastrement (ou profondeur) D est l'épaisseur minimale des terres au-dessus du niveau de fondation. Si un dallage ou une chaussée surmonte la fondation, ceux-ci sont pris en compte dans la hauteur d'encastrement (Figure 2);
- L'ancrage a de la semelle.

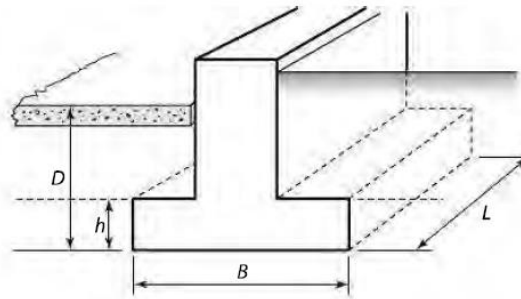


Figure 2. Fondations superficielles.

Une semelle est considérée comme superficielle lorsque D/B est faible (<1.5), et surtout lorsque la justification de la fondation ne prend en compte que la résistance du sol située sous le niveau d'assise. Lorsque D/B est compris entre 1.5 et 5, on parlera de fondation semi-profonde.

Un radier général est une semelle de grande dimension portant tout ou partie d'un ouvrage.

La largeur B est de plusieurs mètres. Les bâtiments fondés sur un radier en béton armé ou le fond d'un réservoir posé directement sur le sol sont des exemples de radiers généraux.

Lorsque le terrain résistant se trouve à une faible profondeur, on établit la fondation directement sur ce sol.

3.1.2. Principe de dimensionnement :

Organisation des vérifications pour une fondation superficielle (Figure 3):

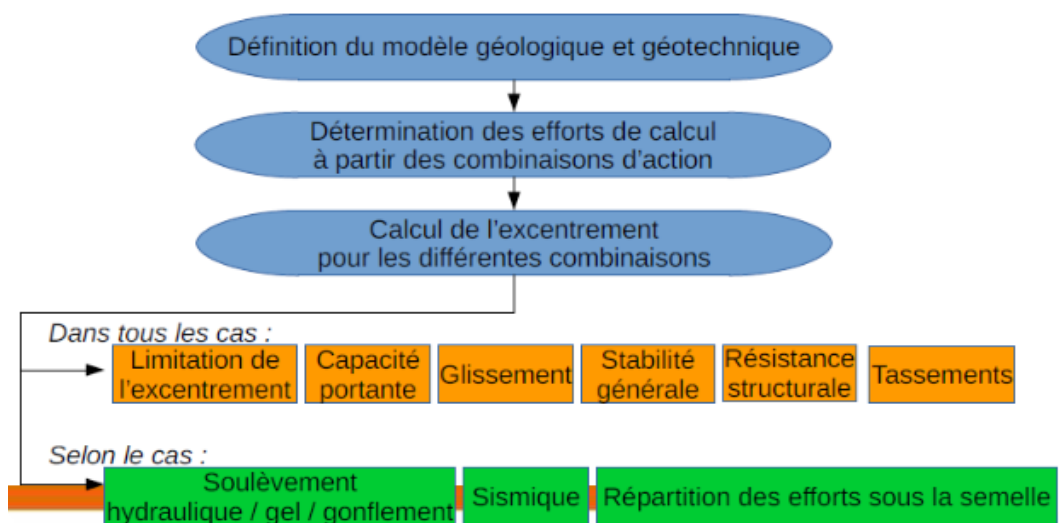


Figure 3. Organisation des vérifications pour une fondation superficielle.

3.2. Fondations profondes :

3.2.1. Définition :

Il arrive souvent que la charge transmise par une fondation ne puisse pas être reprise normalement par les couches superficielles du sol (charge concentrée élevée, mauvais sol, ...). Dans ces conditions, il faut rechercher le bon sol à une grande profondeur. On exécute à cet effet des puits ou des pieux qu'on désigne par fondations profondes.

Les fondations sont dites profondes si une des deux conditions suivantes est respectée : $D/B > 6$ ou $D > 3\text{m}$ (Figure 4).

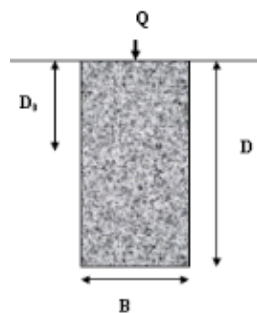


Figure 4. Fondation profonde.

3.2.2. Principes de dimensionnement :

Organisation des vérifications des fondations profondes (Figure 5):

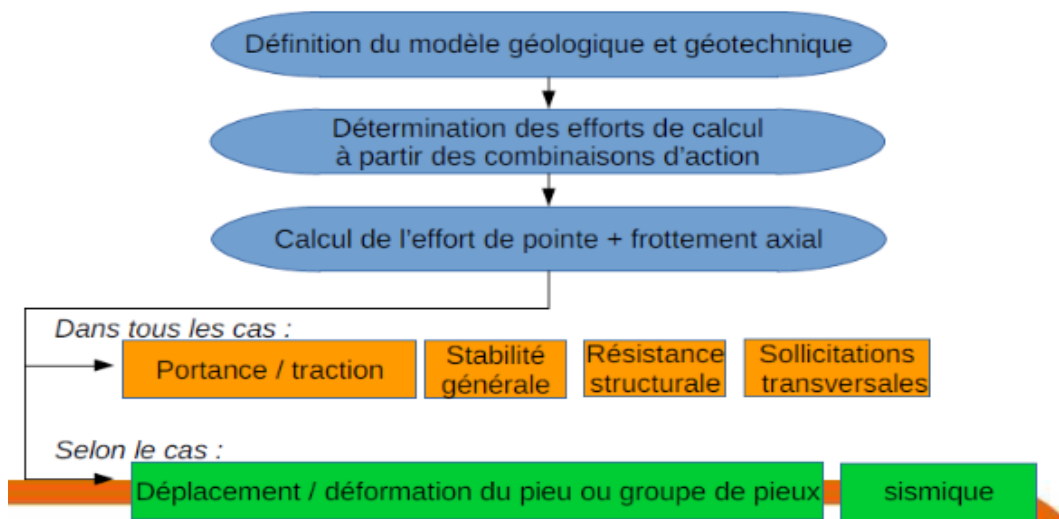


Figure 5. Organisation des vérifications pour une fondation profonde.

Pathologie des ouvrages géotechniques

Le choix entre fondations superficielles et profondes ne peut se faire qu'après un examen général de la structure et du sol. Les principaux facteurs à prendre en considération sont :

- Le prix de revient ;
- La facilité d'exécution;
- La sécurité et la stabilité de l'ouvrage;
- L'impact sur l'environnement.

4. Conception des fondations :

La conception d'une fondation doit tenir compte des effets suivants :

4.1. Gel du sol :

Le sol peut geler lorsque la température extérieure descend au-dessous du zéro, avec augmentation de volume due à la transformation de l'eau en glace. Evidemment, la résistance et la déformabilité du sol peuvent être fortement influencées en particulier par l'alternance rapide des phénomènes de gel et de dégel.

Il y'a aussi un domaine où le gel peut avoir des conséquences néfastes. Il s'agit des revêtements routiers et des couches sous-jacentes.

L'action du gel se fait sentir à une profondeur plus ou moins importante suivant les pays et les climats. Il convient de placer les fondations à une profondeur supérieure à celle que le gel peut atteindre.

4.2. Affouillement du sol :

Il peut être favorisé par :

- Un accroissement de la vitesse de l'eau dû, par exemple, à un resserrement du lit de la rivière (présence d'obstacles, d'ouvrage, ...),
- Les formations de remous.

4.3. Environnement :

Le type de fondation à adopter pour une nouvelle construction ainsi que leur mode d'exécution peuvent dépendre de la présence d'un ouvrage déjà existant à proximité (Figure 2).

Pathologie des ouvrages géotechniques

Ainsi, le battage des pieux peut provoquer des vibrations et, en conséquence, des désordres situant dans le voisinage. Par contre, la technique de parois moulées s'avère être une solution intéressante.

De même il convient d'éloigner au maximum les nouvelles fondations des anciennes. Empiriquement, on admet la règle définie par la figure 6.

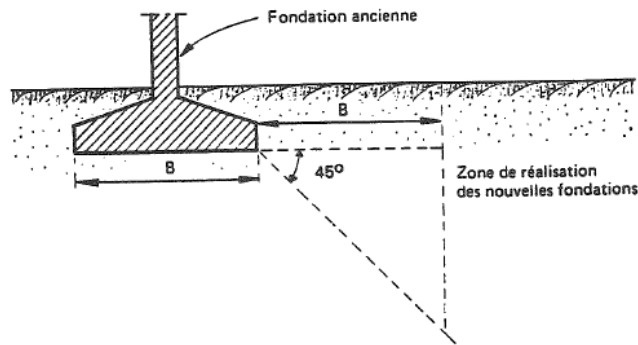


Figure 6. Le type de fondation à adopter pour une nouvelle construction.

4.4. Présence de singularités dans le sous-sol :

Le choix d'une fondation doit tenir compte de la présence de diverses singularités pouvant exister dans le sol (cavités, points durs, failles, ...).

4.5. Gonflement de sol :

La règle suivante est très utile : fonder au-dessous de toute couche susceptible de gonfler et au maximum au niveau de la nappe si celle-ci existe.

4.6. Végétation :

Il y'a lieu de toujours fonder au-dessous du niveau des racines.

4.7. Installations frigorifiques :

Les ouvrages réfrigérés, notamment les installations frigorifiques, sont souvent perturbés par le soulèvement du sol dû au gel.

Ce gonflement peut être évité en isolant l'ouvrage du sol. Une couche de sable grossier ou de grave bien drainé est souvent suffisante.

Pathologie des ouvrages géotechniques

4.8. Chaudières et fourneaux :

Par l'intermédiaire de leurs fondations, les chaudières, les fourneaux et autres installations chauffent souvent le sol à de grandes profondeurs, le dessèchent et provoquent ainsi d'importants tassement dans les sols fins.

Les mesures préventives sont identiques à celles du cas précédent. Dans certains cas, la dessiccation du sol a été évitée par un apport artificiel d'eau.

4.9. Joints de tassement et de retrait :

Un joint de tassement doit séparer intégralement les deux parties d'un même ouvrage y compris les fondations (Figure 7).

Par contre, un joint de retrait ou de dilatation peut être arrêté au-dessus de la semelle de fondation.



Figure 7. Joints de tassement et de retrait.

4.10. Fondations sur un talus :

L'étude de l'implantation des fondations d'un ouvrage sur un versant ne peut pas se limiter uniquement à la détermination des caractéristiques du sol. Elle doit comprendre également l'analyse de la stabilité de l'ensemble du versant avant, pendant et après l'exécution des travaux (Figure 8).

Lorsque le sol d'assise ne peut donner lieu à un glissement d'ensemble, les niveaux des fondations successives doivent être tels qu'une pente maximale de 3 bases pour 2 de hauteur relie les arêtes des semelles les plus voisines.

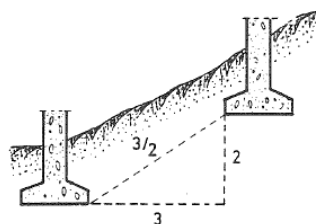


Figure 8. Fondations sur un talus.

4.11. Remblais non contrôlés et déchets :

Les déchets de décharges urbains ou industriels ainsi que les remblais non contrôlés posent de délicats problèmes lorsqu'on est amené à les utiliser comme terrain de construction. Ces dépôts se singularisent par une variabilité élevée des matériaux qui les constituent. La présence d'objets de différentes dimensions perturbe la reconnaissance par sondage. L'existence de matières putrescibles en cours de décomposition peut dégager des gaz nocifs et donner lieu à des nuisances graves.

Les méthodes de traitement à utiliser diffèrent suivant le cas considéré. On peut, en particulier envisager :

- Le pré-chargement ;
- Le pilonnage ;
- La substitution totale ou partielle.

4.12. Eaux agressives :

Une attaque du béton ou du mortier d'ouvrages enterrées (fondations, ...) par des eaux dites agressives provoque un ramollissement ou une désagrégation de ces ouvrages. Ces eaux agressives sont notamment :

a) Les eaux pures :

Elles se rencontrent dans les eaux glacières, les eaux provenant de la fonte des neiges, les eaux de pluie ou encore les eaux qui traversent uniquement des roches peu accessibles à la dissolution, telles que certaines roches basaltiques ou granitiques.

Ces eaux dissolvent les éléments les plus solubles et en particulier la chaux libre quand il s'agit de ciment Portland.

b) Les eaux séléniteuses :

Ces eaux proviennent de sources ayant cheminé dans des roches gypseuses, ou bien des nappes souterraines qui contiennent en solution des sulfates et autres composés du soufre. Les eaux saturées par gypse sont fortement agressives pour les ciments Portland.

Cette attaque se traduit par la formation d'un sel expansif de Candlot provoquant la désagrégation du béton.

Pathologie des ouvrages géotechniques

c) Les eaux de mer :

Les eaux de mer contiennent en moyenne 35 grammes de sel par litre dont : 1.25 g de sulfate de calcium CaSO_4 et 1.65 g de sulfate de magnésium MgSO_4 . Or, ces deux sulfates sont agressifs et le second (MgSO_4) l'est plus que le premier.

d) Les eaux contenant des produits chimiques :

Acides, engrais chimiques ou autres produits évacués avec les eaux usées de des usines.

e) Les eaux stagnantes :

Quand celles-ci sont l'objet de fermentations acides (eaux de marais, de tourbières, ...) ou putrides (décomposition animale ou végétales, eaux d'égouts, ...).

5. Précautions à prendre en compte :

Il est nécessaire que les travaux de fondation ou d'ouvrages enterrés ne soient pas en prise avec des eaux agressives. La résistance à ces derniers peut être obtenue :

- Par une bonne imperméabilité grâce à un fort dosage en ciment supérieur à 350 Kg/m^3 , et à un serrage puissant pour réaliser un béton compact,
- En prenant des ciments à faible teneur en chaux ou des ciments de laitier au clinker ; ces derniers sont parmi ceux qui résistent le mieux aux eaux séléniteuses.
- En prévoyant une protection par un enduit ou une peinture imperméable et inattaquable.

En conclusion, chaque fois qu'on se trouve en présence d'une eau souterraine, il est important d'effectuer une analyse chimique pour connaître son agressivité et définir les mesures qui sont à prendre.

6. Pathologies liées aux problèmes de fondations :

La cause principale des désordres des fondations provient des tassements différentiels des sols porteurs, ce qui cause la perte de la planéité des fondations et la dégradation du mortier constituant la maçonnerie des fondations. Toutefois, diagnostiquer un désordre au niveau des fondations revient à observer de près les désordres apparents sur les murs en superstructure, à savoir : les déformations et les fissures.

6.1. Tassement du sol :

Le sol est un matériau comme les autres, il a aussi une limite élastique, et une certaine aptitude à la plasticité. Ceci nous permet de donner des explications du phénomène des tassements.

Le sol porteur se déforme sous l'action d'une charge. Il y'a une différence de niveau, un tassement par rapport au niveau initial. Si lorsque les charges sont élevées, le sol revient à son niveau initial au bout d'un certain temps, on parle de tassement élastique.

S'il reste un tassement résiduel après levée des charges, on parle de tassements plastiques.

6.1.1. Tassement différentiel :

Quand on parle de tassement différentiel, on désigne le mouvement relatif de différentes parties de la structure qui résulte d'une consolidation inégale du sol d'appui. Cela peut parfois entraîner la ruine de l'ouvrage (Figure 9).

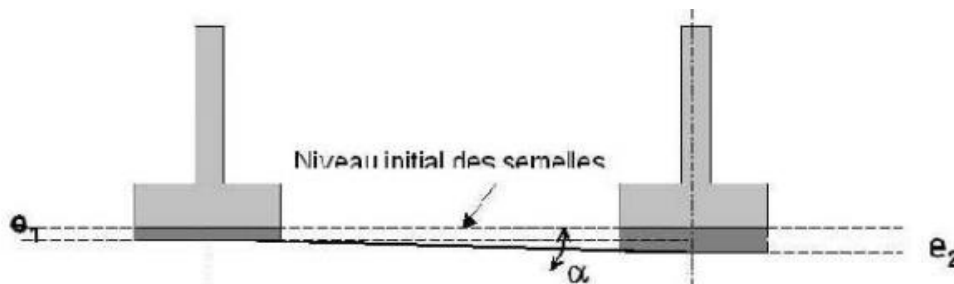


Figure 9. Tassement différentiel.

Le tassement différentiel peut être responsable de dégradation pouvant mener jusqu'à la ruine d'une construction. Le fonctionnement est le suivant : en fonction de la construction du sol d'assise, des différences de comportement peuvent apparaître sous des semelles, de sorte que le tassement absolu e_1 soit dépassé par une semelle. Le tassement de la semelle 2 dépasse le tassement absolu prévu de l'ensemble du sol sous les semelles du bâtiment. Il en résulte un tassement $e_2 > e_1$ appelé tassement différentiel avec une déflexion angulaire α .

Le tassement différentiel peut se présenter, notamment dans les cas suivants :

a) Les fondations supportent des charges inégales :

La partie I de la construction est plus lourde que la partie II. Le tassement en A sera donc plus important qu'en B avec risque de fissuration en C. Il est donc obligatoire de prévoir un joint de tassement séparant totalement les deux parties I et II (Figure 10).

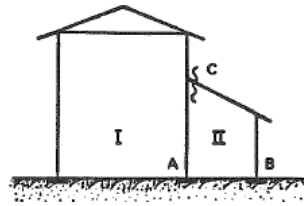


Figure 10. Tassement différentiel pour des fondations supportent des charges inégales.

b) Les fondations ne sont pas d'un même type :

La fondation en A est superficielle et en B elle est sur pieux. C'est une erreur de conception inadmissible (Figure 11).

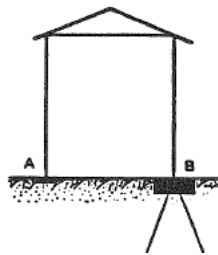


Figure 11. Tassement différentiel pour des fondations de type différent.

c) Le sol est hétérogène sous l'ouvrage :

La présence d'une zone molle C peut donner lieu à un tassement supplémentaire en B. On aurait un phénomène inverse si C était plutôt un point dur (bloc de roche,...) (Figure 12). Une bonne reconnaissance du sol est indispensable avant l'exécution de tout ouvrage.

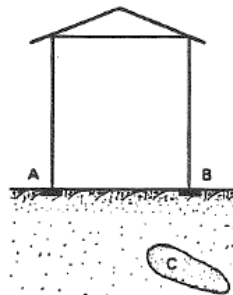


Figure 12. Cas d'un sol est hétérogène sous l'ouvrage.

d) Terrain en pente :

Le terrain naturel étant en pente, on réalise alors une plate-forme en utilisant le déblai en A pour remblayer en B (Figure 13).

Un bâtiment construit à cet endroit peut subir un tassement différentiel. En effet, le remblai en B est plus compressible que le sol en place en A.

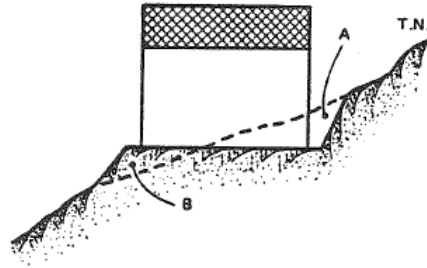


Figure 13. Cas d'un terrain en pente sous l'ouvrage.

6.1.2. Manifestation des tassements :

Les désordres liés à des tassements différentiels non maîtrisés, se manifestent sous forme de fissures :

- À 45° depuis l'angle d'une ouverture ou d'un linteau pour une structure fragile ;
- Par blocs au niveau des joints pour les structures rigides comme des murs en béton banché ;
- En escalier pour les structures en petits éléments maçonnés comme des murs en parpaings ;
- En diagonale (fissures de cisaillement) lors d'un tassement différentiel d'un pignon par rapport au reste du bâtiment ;
- Horizontales dans le cas d'un tassement différentiel de pignon par traction ou gonflement ;
- En escalier par tassement ou gonflement à l'angle ou au centre du bâtiment ;
- Dans un dallage liaisonné aux fondations.

6.1.3. Mesures à prendre en compte contre le tassement :

6.1.3.1. Mesures relatives au sol :

On peut adopter les dispositions suivantes :

a) Réduction de l'importance de la surcharge en prévoyant des sous-sols :

Le poids du terrain excavé vient de diminuer autant les charges apportées par la construction. Si, dans les cas d'un radier général, ce poids est égal à celui de la construction, aucun tassement ne doit normalement se produire.

b) Accélération du tassement par pré-chargement :

On réalise un chargement préalable et provisoire du terrain (remblai, ...) ainsi que des drains verticaux constitués par des tubes crépines, ou par des drains de sable (Figure 14).

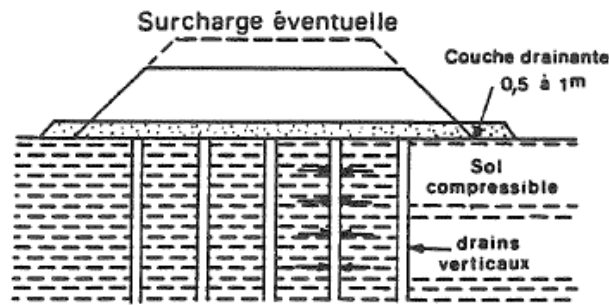


Figure 14. Technique d'accélération du tassement par pré-chargement.

c) Consolidation atmosphérique :

Cette technique constitue une variante de pré-chargement d'un sol argileux par du remblai. Le principe consiste à couvrir la surface à consolider par une couche drainante de sable de faible épaisseur qu'on couvre avec une membrane étanche refermée sur des tranchées étanches sur le pourtour. On crée un vide sous la membrane et la pression atmosphérique joue le rôle de surcharge extérieure. On peut accélérer la consolidation en prévoyant des puits drainants (Figure 15).

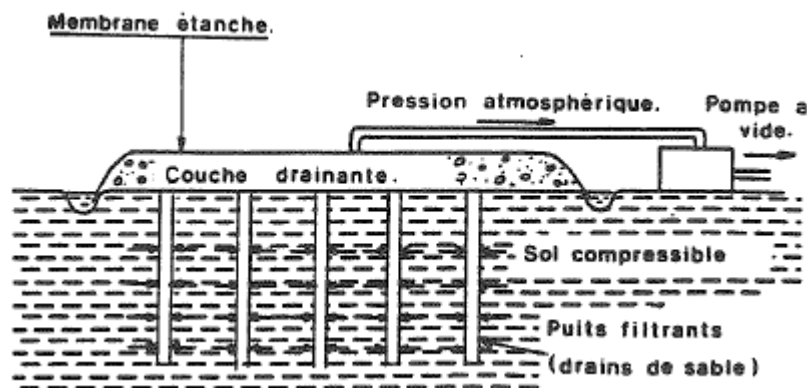


Figure 15. Technique de consolidation atmosphérique.

d) Substitution totale ou partielle des sols de fondations :

Il est fréquent de rencontrer de faibles épaisseurs de sols très mous (tourbe, ...) entraînant des tassements et des problèmes d'entretien importants. On peut très bien envisager de remplacer ces sols par des matériaux plus consistants.

e) Drainage par électro-osmose :

On constate expérimentalement que, si un courant électrique se propage dans le sol depuis une anode jusqu'à une cathode, il y'a rassemblement d'eau à la cathode d'où elle peut être

Pathologie des ouvrages géotechniques

extraite par pompage (Figure 16). Ce phénomène peut être mis à profit dans diverses applications (accélération du tassement, lutte contre l'humidité, stabilisation des talus, ...). Il a été découvert par REUSS en 1808.

La mise en application de cette technique est délicate et elle est d'un emploi rare et coûteux.

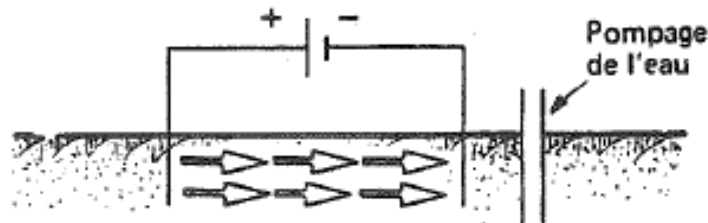


Figure 16. Technique de drainage par électro-osmose.

6.1.3.2. Mesures relatives aux structures :

Examinons le comportement des divers types de structures suivants :

a) Structures massives :

Une structure massive constituant un ensemble monolithique avec ses fondations ne subit pratiquement pas de désordres sous l'action d'un tassement, même si celui-ci entraîne son basculement.

b) Structures isostatiques :

Elles sont capables de suivre le sol dans sa déformation sans que ceci nuise à leur bonne tenue. Un tassement différentiel peut cependant produire l'ouverture des joints de tassement ou de dilatation.

c) Structures hyperstatiques :

L'apparition d'un tassement différentiel peut provoquer des fissures ou des désordres dans la structure, à moins que celle-ci ne soit suffisamment surdimensionnée.

En conséquence, on peut dire que les mesures à prendre dépendent essentiellement de la destination de l'ouvrage et du type de structure adopté. D'une manière générale, il y'a lieu d'avoir à l'esprit les règles suivantes :

- La présence d'un joint de tassement peut constituer une mesure efficace pour réduire l'effet d'un tassement différentiel. Un tel joint doit traverser intégralement l'ouvrage y compris les fondations.

Pathologie des ouvrages géotechniques

- Les structures métalliques supportent mieux les effets du tassement que celles réalisées en béton armé ou en maçonnerie.
- Pour atténuer l'importance du tassement différentiel, il est utile de solidariser les fondations entre elle (longrines, grillage de poutres, ...).

En prenant un grillage serré, on arrive à la limite à la fondation d'un radier général. Cette solution présente le double avantage de mieux répartir la surcharge sur le sol et de réduire l'amplitude ainsi que l'effet du tassement différentiel sur la structure. Si un basculement se produit, il n'y a pratiquement pas apparition de fissures dangereuses.

6.2. Les fissures :

En présence d'un sol déformable, les fondations peuvent subir des mouvements susceptibles d'engendrer des dommages importants tel que (Figure 17):

- Les fissurations diagonales suivant les joints des blocs de maçonnerie.
- Les fissurations horizontales et verticales.

Une fissuration se déclenche à cause de :

- Des charges irrégulièrement réparties aux fondations;
- Un sol compressible sous le niveau d'assise des fondations;
- La fragilité de la superstructure.

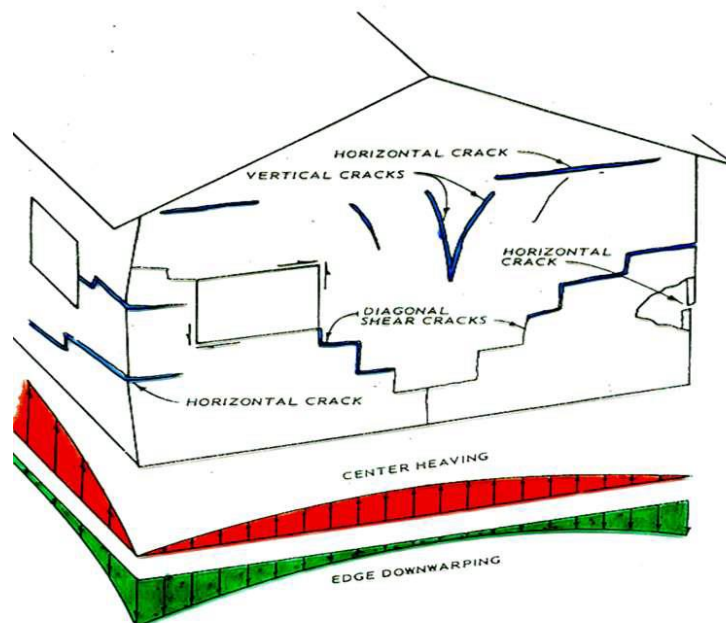


Figure 17. Les fissurations.

7. Problèmes liés aux sols problématiques :

La mécanique des sols permet de déterminer les caractéristiques physiques, mécaniques et hydrauliques des sols. Elle définit les principes d'équilibre limite des sols, la stabilité des talus, ainsi que les actions d'un sol sur un écran (mur). Les applications de la mécanique des sols permettront la résolution des problèmes concernant :

7.1. Stabilité des talus:

Selon la nature du sol superficiel et de différents facteurs (présence d'eau, ruissellement, végétation), un talus naturel ou artificiel, crée pour réaliser un ouvrage (bâtiment, voie de communication), sera plus ou moins stable (Figure 18).

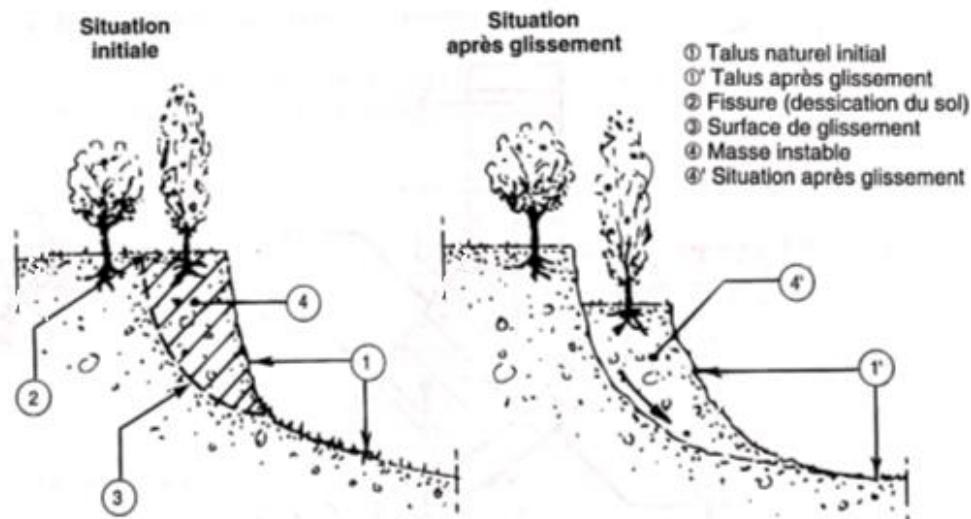


Figure 18. Modification d'un talus naturel par glissement de couches argileuse.

7.2. Terrassements - reprises en sous-œuvre :

Les terrassements nécessaires pour la construction d'ouvrages de différents types correspondent à quatre cas de figure principaux.

1/ Etablissement de plate-forme en déblai :

On retrouve le problème de la stabilité des talus et celui du sol de fondation (charge portante, stabilité et tassements).

2/ Etablissement de plate-forme en remblai :

Problèmes de stabilité des talus et de tassement et stabilité de la plate-forme.

Pathologie des ouvrages géotechniques

3/ Fouilles en tranchée ouverte sans talus avec blindages :

Décompression du terrain et phases d'exécution.

4/ Fouilles en tranchée à proximité d'ouvrages existants :

Reprise en sous-œuvre, parois moulées, risque de décompression des terrains, charges et désordres dans les constructions existantes.

7.3. Gonflement des sols :

Certains sols argileux sont constitués par des minéraux et ont une microstructure qui les rendent fortement rétentifs et très sensibles à la présence de l'eau. Leur volume peut varier d'une façon appréciable avec leur teneur en eau. En période de sécheresse, ils subissent un important retrait provoquant des fissures plus ou moins importantes. Par contre, en période de pluie, ils gonflent et les fissures se referment. Des ouvrages légers construits sur tels sols peuvent subir d'importants dégâts.

Considérons une maison fondée sur un tel sol dont la teneur en eau varie suivant les saisons. Sur les bords de celle-ci, la variation est plus rapide que dans les parties centrales. De ce fait, en période de sécheresse, la maison repose sur sa partie centrale et le pourtour se trouve en porte-à-faux. Durant la période des pluies, c'est le phénomène inverse qui se produit. La fissuration de la construction et même de sa destruction pourraient s'en suivre. Notons que les sinistres peuvent survenir tant par retrait que par gonflement (Figure 19).

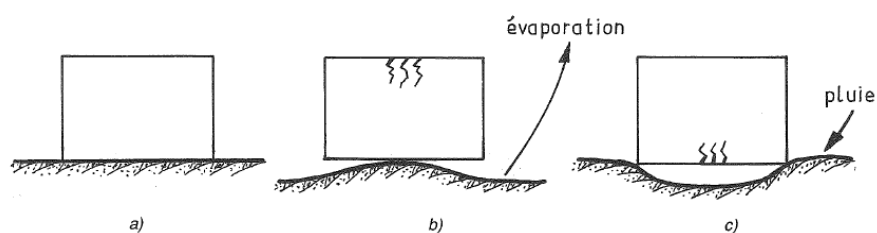


Figure 19. Construction sur des sols gonflants.

En gonflement ou en tassement, la déformation d'un sol d'assise de fondation, en fonction principalement de la rigidité de la structure supportée, peut prendre deux aspects :

- Déformation par flexion ;
- Déformation par cisaillement.

Pathologie des ouvrages géotechniques

En effet, la fissuration de la construction est le résultat des contraintes de cisaillement dans la structure qui sont dues à des moments fléchissant dans les fondations causées par les différences mouvements le long du périmètre de la construction. La forme que prendra la fissuration résultante diffèrera principalement suivant le mode de fondation de l'habitation et évoluera avec le temps.

Mesures préventives :

La localisation et l'importance des dommages dépendent de la conception des fondations et du type de structure. Dans le cas de la construction neuve, les mesures préventives à prendre sont principalement les suivantes :

- Reconnaître le sol et définir son état (teneur en eau, limites d'Atterberg, pression de gonflement, ...),
- Examiner l'environnement immédiat de l'ouvrage (relief du sol, végétation existante, réseau de drainage, niveau de la nappe, ...),
- Analyser les documents existants (cartes géologiques et hydrogéologiques, banques de données, ...),
- Contreventer suffisamment l'ouvrage,
- Fonder profondément afin d'avoir un milieu à teneur en eau quasi constante,
- Prévoir des joints de tassement,
- Lutter contre les arrivées ou les départs de l'humidité (drains brisés, engazonnement du pourtour de la construction, plantation d'arbres rapprochés, ...),
- S'assurer de l'étanchéité des canalisations d'évacuations des eaux pluviales et usées et du bon fonctionnement des systèmes de drainage.

Il est à noter que les structures légères sont plus exposées aux gonflements des sols que les structures lourdes. En effet, elles sont en générale fondées superficiellement et ne donnent lieu qu'à des contraintes modérées sous les fondations. Elles ne peuvent donc pas s'opposer au potentiel de gonflement du sol qu'on peut déterminer par un essai œdométrique : pression de gonflement et amplitude.

Rappelons que les effets d'un gonflement ou d'un retrait du sol sur une structure sont similaires à ceux du tassement.

7.4. Sols mous :

Les sols dits mous sont les sols jugés extrêmement compressibles. Les conséquences de fondations de bâtiments sur sol compressibles sont semblables à celles sur remblais mal compactés.

Les sols compressibles peuvent engendrer deux principaux types de problèmes :

- Des problèmes de stabilité avec des risques de ruptures du sol support entraînant de lourds dommages à l'ouvrage ;
- Des problèmes de tassement aux effets plus lents mais tout aussi néfastes.

Les ruptures prennent généralement deux formes, par poinçonnement ou rupture de type circulaire, comme celle observée pour les remblais routiers.

Les tassements, notamment les tassements différentiels qui sont les plus néfastes pour les constructions et les ouvrages, peuvent engendrer :

- Un phénomène de frottement négatif le long des fondations profondes, en les entraînant vers le bas ;
- Des mouvements horizontaux des phénomènes de flexion des pieux qui peuvent provoquer leur rupture ou le déplacement progressif des appuis ;
- Une fissuration des structures, souvent oblique car elle suit les discontinuités des éléments de maçonnerie ;
- Une distorsion des ouvertures, perturbant le fonctionnement des portes et fenêtres ;
- Un décollement et une fissuration des éléments ;
- Un étirement, mise en compression, voire rupture de tuyauteries ou canalisation enterrées ;
- Un basculement global des structures perturbant leur fonctionnement ou remettant en cause leur exploitation.

Mesures préventives :

- Concevoir un système de fondations qui permet de réduire les tassements et les déformations à des seuils admissibles par la structure, par un choix judicieux du type de fondations et de leur niveau d'ancrage.
- Procéder à un traitement préalable du sol de fondation par le biais de techniques d'amélioration et de renforcement des sols, voici une liste non exhaustive de ce genre de techniques :

Pathologie des ouvrages géotechniques

- Pré-chargement (remblai, réservoir, application du vide, rabattement de la nappe, électro-osmose) ;
- Accélération de la consolidation (drains verticaux, tranchées drainantes, ...) ;
- Renforcement par colonnes (colonnes ballastées, colonnes de sol traitées en place) ;
- Compactage (dynamique, par explosifs, vibro-compactage, ...) ;
- Injections (jet-grouting, solide, résines, ...) ;
- Micropieux.

7.5. Variation du niveau de la nappe :

Une modification dans le régime d'écoulement de l'eau souterraine ou une variation du niveau d'une nappe aquifère peut donner lieu à des mouvements ou des tassements importants et non uniformes dans le sol.

Voici quelques exemples de rabattement du niveau de la nappe :

a) *Pompage de l'eau :*

Le tassement du sol sous la fondation B sera plus important que sous A, d'où risque de désordres dans l'ouvrage (Figure 20.a).

b) *Réalisation d'une fouille :*

La réalisation de la fouille peut rabattre le niveau de la nappe de la position (1) à la position (2) (Figure 20.b).

c) *Végétation :*

Les racines d'un arbre peuvent entraîner le rabattement du niveau de la nappe. En terrain argileux, il est recommandé d'éloigner les plantations des immeubles. On peut admettre que la distance minimale à observer est la hauteur de l'arbre arrivé à maturité (Figure 20.c).

Il est évident que l'assèchement d'une argile par la végétation ne peut se concevoir que consécutivement à la plantation de nouveaux arbres ou au développement de petits arbres préexistants.

La présence d'arbres adultes sur le terrain de construction ne présente, a priori, aucun danger. D'ailleurs, on a intérêt à concevoir les nouveaux ouvrages de manière à respecter la végétation existante.

Pathologie des ouvrages géotechniques

d) Venues d'eau :

Beaucoup de terrain, et en particulier les terrains argileux, voient leurs caractéristiques profondément modifiées par l'eau (diminution de consistance, ...) (Figure 20.d).

Dans les terrains en pente, les eaux de ruissellement viennent naturellement buter contre l'obstacle que constitue le bâtiment récemment construit. Ces eaux trouvent un cheminement idéal dans les remblais de faible compacité ou de mauvaise qualité qui viennent d'être mis en place pour reboucher l'excavation des fouilles, excavation dont l'emprise est toujours supérieure à celle de l'ouvrage. Si l'on y prend garde, les fondations du bâtiment baigneront en permanence dans l'eau. Il est donc indispensable de réaliser en amont du bâtiment un dispositif destiné à éloigner les eaux des fondations : ce rôle est dévolu au réseau de drainage.

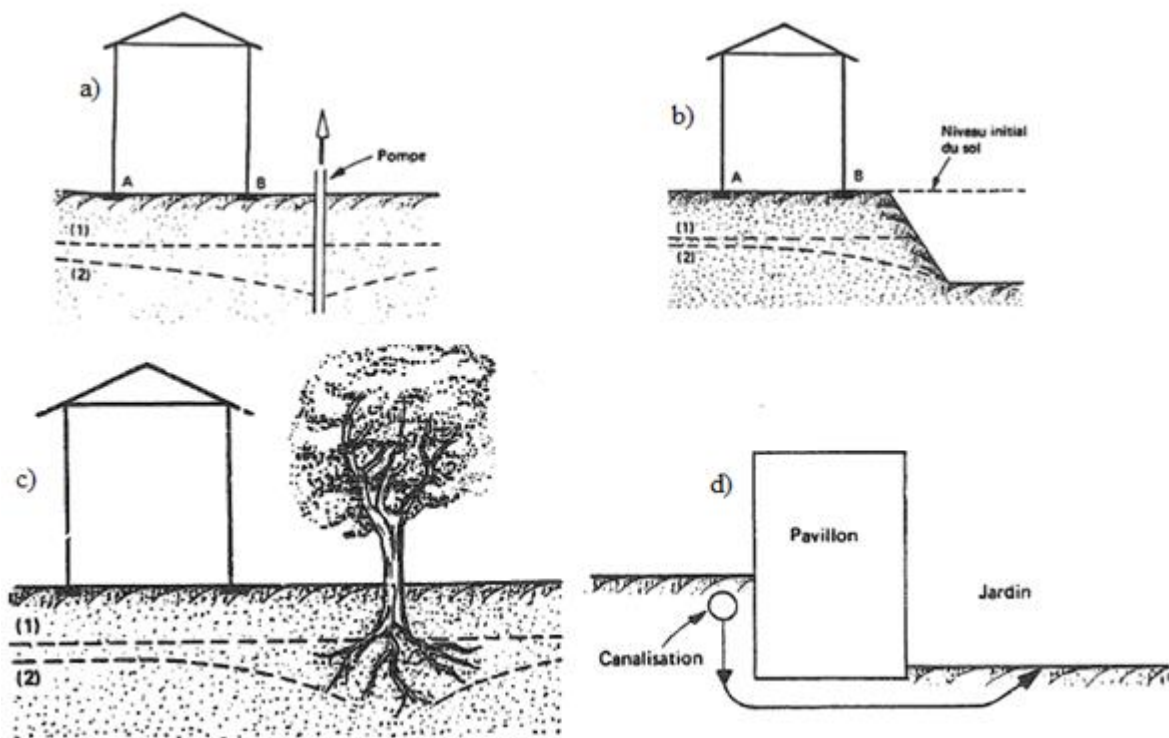


Figure 20. Causes de modification dans le régime d'écoulement de l'eau souterraine.

7.6.Sols et cavités :

La présence de cavités souterraines constitue un véritable danger pour les constructions réalisées en surface. Leur détection n'est pas toujours aisée. La consultation des plans de carrières et des cartes géologiques peut être d'un grand secours. Ces cavités ont essentiellement deux origines :

- Anciennes carrières,

Pathologie des ouvrages géotechniques

- Action de l'eau par érosion ou par dissolution.

7.7. Anciennes carrières :

Les cavités souterraines résultent d'une exploitation, qui porte souvent un banc sédimentaire (charbon, pierre à bâtir, ...), ne sont pas toujours capables de subsister à longue échéance. Malgré toutes les précautions prises lors de l'exploitation, il peut arriver que le banc qui constitue le toit de la carrière s'affaisse, se fissure et s'effondre. Les bancs supérieurs, dont il s'est décollé, se tassent, se fissurent et s'effondrent à leur tour. Il se forme finalement une cavité en forme de cloche, qu'on désigne par fontis, et dont la base est encombrée de matériaux éboulés.

Par altération progressive, un fontis peut continuer à s'agrandir et à s'approcher de la surface du sol. S'il perce, c'est généralement par un effondrement brutal de la voûte qui détermine un entonnoir en surface. A partir du moment où une carrière est soumise à l'action de l'eau ou de l'air, il y a une évolution rapide du processus de dégradation.

Remèdes :

La solution de base consiste à combler les vides proprement dits et à conforter les terrains sus-jacents.

Au plan technique, le traitement des anciennes carrières souterraines est maintenant en point. Il peut être effectué, selon les cas, soit à partir du fond par confortation des ciels ou par bourrages, soit à partir de la surface, au moyen de forages d'injection.

Il est souvent préférable, dans les projets de construction, de prévoir l'assise de la fondation au-dessous de la zone qui a été exploitée de condition, bien sûr, d'avoir pu délimiter celle-ci et d'avoir la certitude qu'il n'existe pas d'autres exploitations plus profondes.

Pouvoir dissolvant de l'eau :

L'infiltration de l'eau dans le sol au travers d'un réseau de fissures peut entraîner progressivement la formation de cavités de grottes, soit par dissolution de certaines roches (gypses, calcaire, ...), soit par érosion mécanique.

La plupart des roches sont insolubles dans l'eau. Cependant, certaines d'entre elles le sont plus ou moins.

Le gel gemme (NaCl) :

Pathologie des ouvrages géotechniques

Le sel gemme est si soluble qu'il ne peut pas subsister en présence d'eau qui se renouvelle. Il est, après le gypse, de loin le plus abondant des sels solubles dans la nature. Il constitue dans certaines régions des masses très importantes qui n'affleurent pratiquement jamais, ce qui pourrait conduire à les sous-estimer.

Le gypse ($Ca SO_4, 2H_2O$):

Le gypse provient de l'hydratation de l'anhydrite. Cette transformation s'accomplit généralement aux affleurements, alors que l'anhydrite peut subsister à une certaine profondeur sous une forme stable. Or, cette transformation s'accompagne d'une augmentation de volume de l'ordre de 60%. Elle est donc de nature à provoquer des désordres dans les ouvrages situés dans le voisinage. Ainsi, dans un tunnel, le gonflement de l'anhydrite contenu dans le sol peut très bien rompre le revêtement. Pour conserver à l'anhydrite sa bonne tenue, il faut le protéger de tout contact avec l'eau.

Il est donc normal que le gypse subsiste en affleurement. Bien qu'il soit moins soluble que le sel gemme, son contact prolongé avec l'eau peut constituer une deuxième source d'ennuis. En effet, les circulations d'eau y déterminent des vides par dissolution, qui s'élargissent et donnent lieu à des affaissements dans le sol.

La résistance mécanique du gypse étant généralement faible et sa dissolution pouvant être rapide, les risques d'éboulement dans les cavités souterraines sont donc considérables.

Le processus de formation de fontis dans les cavités gypseuses est semblable à celui des carrières de calcaire exploitées.

Pour ces vides de dissolution, le seul remède réside dans des injections de bourrage. Toutefois, leur mise en œuvre n'est pas aisée compte tenue, d'une part, de la disposition anarchique des cavités et, d'autre part, du risque de cheminement indéfini du coulis, et ce au détriment du comblement réel des vides sous le projet. Une attention particulière est à porter quand le sol comporte plusieurs niveaux gypseux.

Le calcaire ($CaCO_3$) :

La dissolution de calcaire par les eaux chargées de gaz carbonique CO_2 est l'un des processus essentiels de l'évolution géologique. Il est facile de s'en convaincre en se promenant dans les montagnes au-dessus de la zone de végétation. On y trouve des surfaces sur lesquelles s'écoule

Pathologie des ouvrages géotechniques

l'eau des pluies et des neiges. On voit alors que la surface de ces couches de calcaire, autrefois unie, est devenue méconnaissable. Elle est sillonnée de stries plus ou moins profondes séparées par des crêtes aigues. Ces stries peuvent atteindre jusqu'à plusieurs dizaines de centimètres de profondeur et les crêtes sont parfois en dents de scie. Ce sont là les résultats du travail de l'eau qui s'écoule sur la surface du calcaire en le dissolvant peu à peu. Les formes bizarres s'adoptent qu'adoptent ces surfaces couvrent parfois des champs entiers.

Dans ces régions formées de massifs de calcaire, il se développe ce qu'on appelle le karst. Il est provoqué par le travail de l'eau. Il est caractérisé par un relief buriné avec la formation d'entonnoirs, d'effondrements, de grottes volumineuses, de cours d'eau souterrains et la rareté des bois. L'enfouissement rapide de l'eau de pluie dans les cavernes souterraines provoque le dessèchement du sol. Il n'est point douteux que l'origine primitive de ces vides soit la dissolution à partir d'une circulation dans les fissures. A mesure que celles-ci se sont trouvées élargies, la circulation y a été plus facile, plus abondante, et l'élargissement par dissolution a pu progresser plus rapidement. Lorsque les vides atteignent des dimensions notables, l'érosion mécanique peut, à côté de la dissolution, jouer un rôle important dans l'élargissement des cavités et la formation des pitons isolés.

Les racines des plantes, en respirant, rejettent du CO_2 . Les eaux de pluie peuvent, en les traversant, se charger de gaz carbonique et acquérir ainsi un pouvoir dissolvant assez fort à l'égard du calcaire. Les phénomènes de dissolution du calcaire sont ainsi beaucoup plus actifs sous une couverture végétale que lorsque le calcaire affleure. Dès le premier contact avec l'air libre, une partie du CO_2 peut se dégager donnant lieu dans les grottes à la formation de stalactites et de stalagmites.

La chaux :

L'eau des rivières, jamais saturés en chaux et constamment renouvelée au contact des ouvrages (fondations, piles, ...), tend à dissoudre la chaux libre des mortiers et des bétons.

La dissolution de la chaux libre a pour terme le retour des mortiers et bétons à l'état d'agrégat pulvérulent et la destruction éventuelle de l'ouvrage. On ne peut empêcher le phénomène mais on peut le ralentir en augmentant le dosage en ciment et la compacité du béton en vue de réduire sa perméabilité.

7.8. *Liquéfaction des sols :*

La liquéfaction du sol est un phénomène géologique, généralement brutal et temporaire, par lequel un sol saturé en eau perd une partie ou la totalité de sa portance, permettant ainsi l'enfoncement et l'effondrement des constructions.

Les séismes sont à l'origine de la plupart des désordres liés à la liquéfaction des sols lesquels apparaissent comme des phénomènes induits en matière de risque sismique.

La liquéfaction correspond à un processus de perte de résistance au cisaillement au cours duquel un cumul de pressions interstitielles se manifeste à travers les cycles de sollicitation sismique, au détriment d'une chute de contraintes effectives.

Si le sol est suffisamment perméable, l'augmentation de la pression interstitielle peut se dissiper rapidement et réduire ainsi le risque de liquéfaction. On peut donc augmenter la sécurité par la mise en place de drains. Bien entendu, les injections accordent au sol une meilleure cohésion C de nature à améliorer la stabilité.

La liquéfaction se manifeste selon plusieurs aspects, dont les plus constatés sont :

- Perte de capacité portante du sol de fondation ;
- Glissement des terrains en pente ;
- Ruptures superficielles sous forme de fissures, ou étalement latéral ;
- Développement des forces de poussées ;
- Soulèvement des ouvrages enterrés et rupture des canalisations ;
- Formation de cratères ou « volcans de sable » ;
- Affaissement ou effondrement en surface du sol.

Dispositifs de prévention et traitement des sols contre la liquéfaction :

Les dispositifs de prévention contre la liquéfaction des sols consistent à intervenir dans le sol pour augmenter sa résistance ou sa capacité de drainage ou bien pour réduire l'action sismique, afin d'augmenter le coefficient de sécurité à la liquéfaction.

Ils peuvent également consister à supprimer une condition favorable à la liquéfaction, en supprimant la présence d'eau par rabattement permanent de la nappe ou en substituant le sol en place par un matériau non liquéfiable.

Pathologie des ouvrages géotechniques

Pour éliminer ou réduire les risques de liquéfaction, une ou plusieurs méthodes peuvent être mise en œuvre, dont l'efficacité doit faire l'objet d'un contrôle préalable par des essais et des mesures appropriées, à savoir :

- Un rabattement permanent du niveau de la nappe phréatique.
- Une densification des couches liquéfiables (pré-chargement, compactage dynamique, vibro-compactage, ...).
- Une amélioration de la perméabilité des couches liquéfiables par la réalisation de drains en matériaux grossiers.
- Une substitution aux couches liquéfiables de matériaux appropriés convenablement compactés.

Plusieurs types de renforcements peuvent être envisagés (injection de coulis, injection solide, inclusions souples ou rigides) simultanément dans un site. Les performances des méthodes adoptées pour lutter contre les effets de la liquéfaction dépendent du type de renforcement et de son adéquation avec le site et le projet, des dimensions des zones renforcées, de leur implantation.

7.9. Construction au voisinage d'un ouvrage existant :

Avant d'entreprendre la réalisation d'une nouvelle construction, il est important d'examiner l'état des ouvrages situés à proximité et le type de leur fondation. Ceci peut entraîner des modifications sensibles au projet et imposer même un certain mode d'exécution de l'ouvrage.

En voici quelques exemples :

7.9.1. Interaction des fondations :

La réalisation de l'ouvrage B à proximité de A peut provoquer un tassement différentiel dans ce dernier (Figure 21).



Figure 21. Interaction entre les fondations.

7.9.2. Battage de pieux :

Si l'on prévoit une nouvelle construction sur pieux, l'attention doit être attirée sur les vibrations dues au battage. Celles-ci peuvent provoquer des fissures dans les ouvrages situés à proximité.

En général, le sable est plus sensible que l'argile aux vibrations.

7.9.3. Frottement négatif sur les pieux :

S'il advient que le sol tasse par rapport au pieu qui y est foncé, il charge ce dernier par frottement. On dit alors que le sol exerce sur le pieu un frottement négatif F qui peut être très élevé, voire dangereux. Les désordres qui en résultent sont lents et progressifs.

L'apparition d'un tassement « négatif » peut être provoqué par trois sortes de causes :

- Le tassement des terrains sous leur propre poids, phénomène qui peut être accentué par le rabattement de la nappe phréatique,
- L'influence d'une surcharge extérieure appliquée au terrain,
- Une vibration du sol.

7.9.4. Sollicitation des pieux à la flexion :

Si l'ouvrage existant est réalisé sur pieux, le chargement du sol dans le voisinage peut entraîner, en plus du frottement négatif F , une poussée supplémentaire horizontale Q sur les pieux les sollicitant à la flexion. Celle-ci peut très bien conduire à la rupture des pieux (Figure 22).

Ce phénomène est d'autant plus à craindre que la couche superficielle est molle (vas, ...).

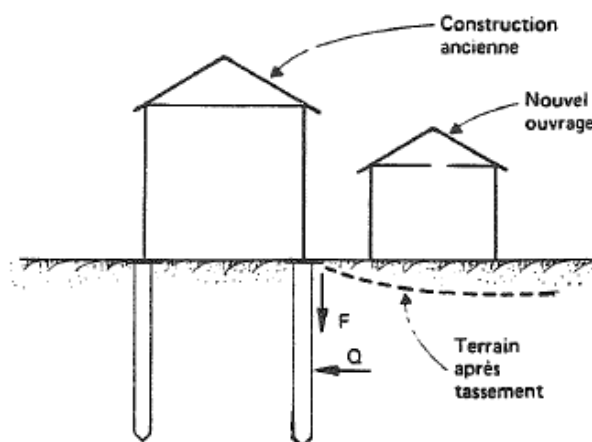


Figure 22. Sollicitation des pieux à la flexion.

7.10. Absence de reconnaissance d'étude de sol (ou incomplètes ou erronées) :

Il est indéniable qu'il s'agit là de l'origine la plus fréquente des désordres de fondation. Concepteurs et projeteurs de l'ouvrage à construire doivent connaître les caractéristiques du (ou des) sol(s) d'assise et du (ou des) sol(s) retenus ce qui suppose qu'il faut au préalable les avoir déterminées par sondages, mesures et essais.

7.11. Fondations sur remblai :

Soit l'exemple d'une maison individuelle de bel aspect n'ayant fait l'objet d'aucune étude de sol préalable au motif que le sol d'appui était, au dire du constructeur, « convenable » (sic), en fait constitué de remblais récents, certes de qualité, mais non compactés et reposant sur 1 m environ de terre végétale (Figure 23).

Bien entendu, des tassements importants, différentiels, d'où de nombreuses fissures nécessitant une reprise en sous-œuvre de l'ouvrage par micropieux.

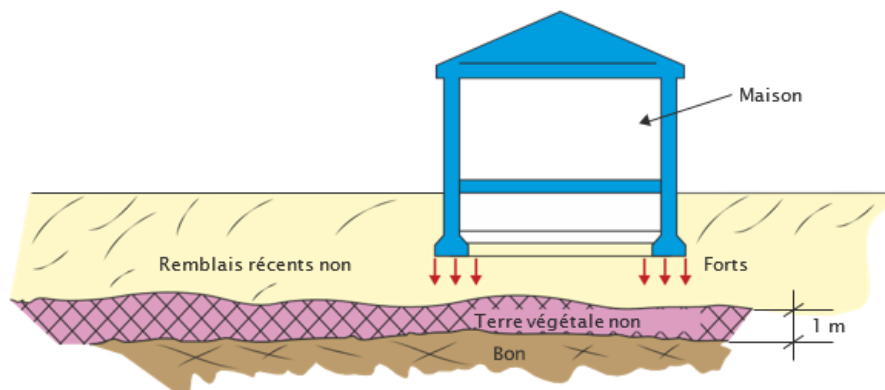


Figure 23. Fondations sur remblais.

7.12. Fondations sur un remblai surmontant une couche de tourbe :

Nous citerons également le cas de cette maison individuelle reposant sur un remblai ancien de très bonne qualité (déchets de quartzite), mais disposé sur une couche de tourbe d'épaisseur inégale et qui fût, bien sûr, affectée de désordres divers, conséquence de tassements différentiels (Figure 24) nécessitant une reprise par micropieux.

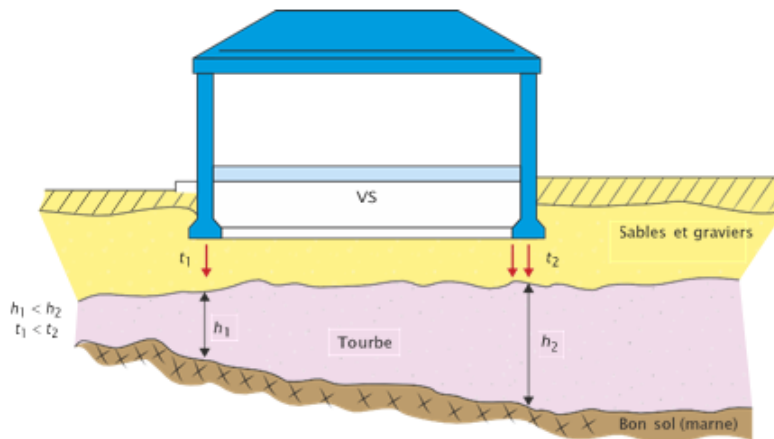


Figure 24. Construction fondée sur remblai (lui-même sur tourbe).

7.13. Bâtiments fondés sur une couche d'assise (remblai) d'épaisseur variable :

L'exemple suivant concerne un bâtiment R + 3 dont la construction ne fut précédée d'aucune étude de sol, si ce n'est du simple constat que le terrain d'assise (sables et graviers) était de « bonne qualité » au dire des réalisateurs.

Avant la fin de la période décennale il apparut que le bâtiment avait pris de la gîte (non uniforme d'ailleurs) mais ce, sans désordres importants (Figure 25).

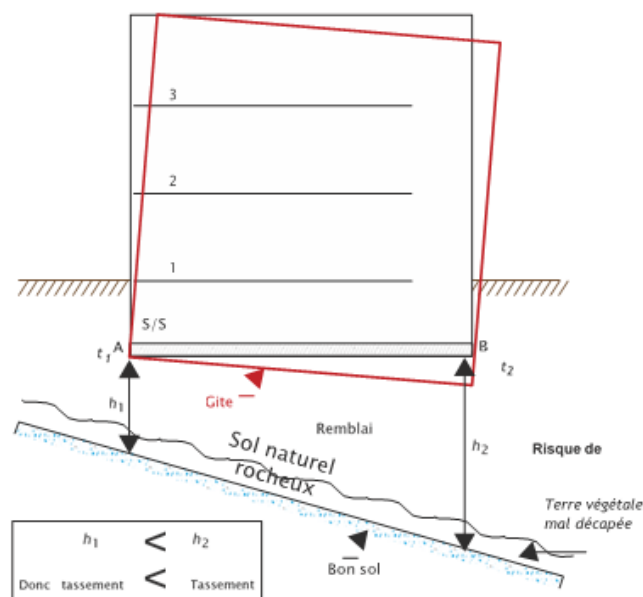


Figure 25. Construction fondée sur remblai lui-même sur un terrain naturel en pente.

Des investigations plus sérieuses cette fois prouvèrent que l'ouvrage reposait sur un remblai comprenant certes des sables et graviers, mais d'épaisseurs inégales et relativement récent. De plus, le terrain naturel – bon sol – était en pente et la couche de terre végétale n'avait pas été

décapée.

A priori, le bâtiment présentait un risque, non seulement de tassements différentiels, ce qui avait bien été le cas, mais également de glissement, ce qui par chance ne s'était pas produit.

D'importants travaux de renforcement de la structure et de reprise en sous-œuvre par micropieux furent nécessaires avant redressement par vérins connectés et blocage de l'ouvrage avec des pieux par précaution.

7.14. Fondations sur d'anciennes carrières :

Il conviendra d'être particulièrement prudent en présence d'anciennes carrières.

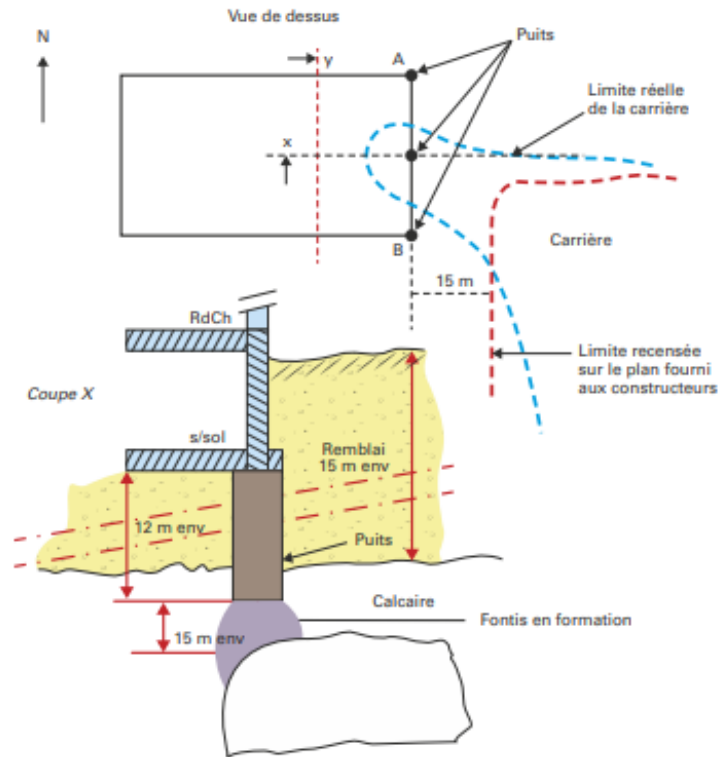
Exemple : Un bâtiment d'habitation R + 5 de dimensions 30 × 15 m environ devait être réalisé à proximité d'une ancienne exploitation, en principe bien répertoriée sur les plans cadastraux. Il fut décidé d'effectuer 4 sondages à 25 m, aux 4 coins du bâtiment, à la suite desquels il fut déterminé de fonder l'immeuble sur 3 files de puits de 12 m reposant sur le calcaire, les couches superficielles étant de qualité médiocre (Figure 26 a).

Les constructeurs pensaient ainsi avoir pris toutes les précautions nécessaires.

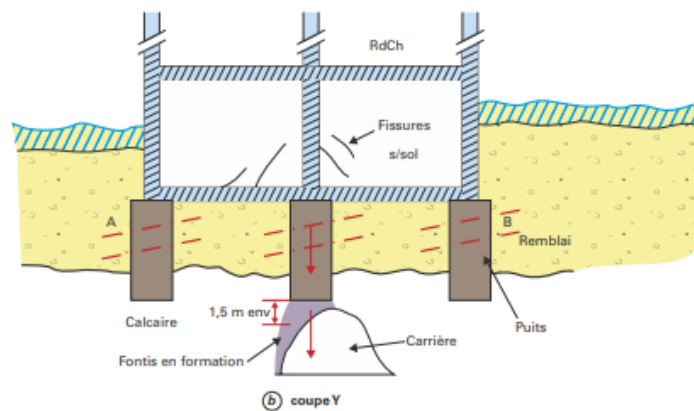
Or, à peine la réalisation du gros œuvre terminée, d'importantes fissures apparurent sur le pignon Est.

Il s'avéra que l'appui du puits central de la file support du pignon Est se situait à moins de 1,5 m du ciel de la carrière et qu'un fontis était en formation (Figure 26 b).

En fait, le contour de la carrière avait été mal reporté sur le plan sur lequel s'étaient appuyés les réalisateurs pour implanter le bâtiment.



a)



b)

Figure 26. Construction réalisée sur une ancienne carrière.

7.15. Bâtiments de grande longueur :

Dans le cas des ouvrages de grande longueur, on ne peut se contenter d'une étude de sol ponctuelle comme le montre l'exemple suivant.

Exemple : Pour un bâtiment de 15 m environ de haut et de 60 m environ de long, un seul sondage avait été effectué. Peu de temps après la fin de la construction apparurent

Pathologie des ouvrages géotechniques

progressivement sur une zone d'une douzaine de mètres de longueur, en partie centrale et inférieure de l'ouvrage, de fines fissures verticales, et de part et d'autre de cette zone des fissures de même type mais en partie haute (Figure 27).

En fait la qualité du sol d'assise n'était pas homogène, le seul sondage effectué n'avait pas permis de mettre en évidence localement, en partie centrale, la présence d'un sol argileux, des tassements différentiels sont donc à l'origine des désordres observés.

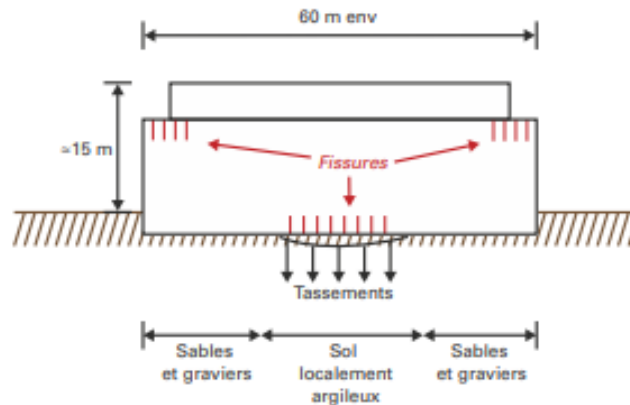


Figure 27. Bâtiment reposant sur un sol d'assise discontinu.

7.16. Glissement de la construction :

De légères venues d'eau dans le terrain d'assise favorisèrent le glissement de l'ouvrage, le phénomène fut difficile à traiter, nécessitant entre autres la mise en œuvre de pieux inclinés. Exemple d'une construction reposait sur un terrain (sables et graviers) dont la qualité n'était pas en cause mais qui, lui-même, recouvrait un terrain rocheux (calcaire) à forte pente (Figure 28).

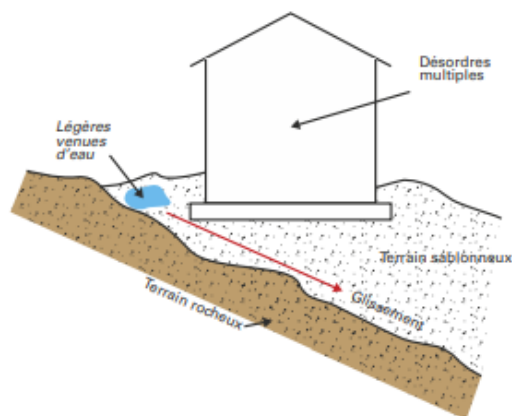


Figure 28. Glissement d'une construction.

8. Méconnaissance des propriétés et des phénomènes (physiques, chimiques) des sols d'appui :

Un dallage qui fait des vagues : cet exemple traite d'un dallage d'entrepôt de plusieurs milliers de mètres carrés, destiné au stockage, construit au début des années 1980 sur un ancien site industriel, à proximité de Paris, au voisinage d'un canal. Le terrain superficiel était, sur plus d'un mètre, un remblai récent constitué de gravats de chantier (Figure 29).

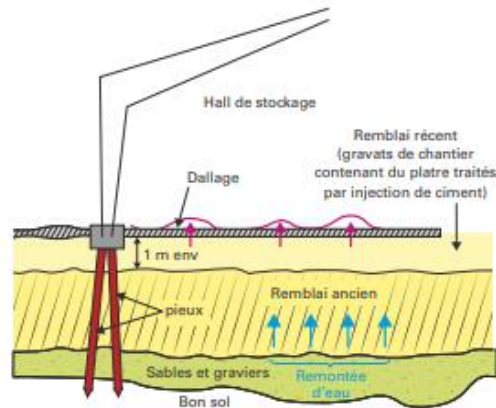


Figure 29. Soulèvement de dallage.

Il fut donc logiquement décidé de fonder les poteaux de l'entrepôt sur puits ou pieux, le dallage devant reposer directement sur le sol après que, sur une épaisseur d'un mètre environ, celui-ci eut été mélangé avec un coulis de ciment.

Au bout de 2 à 3 ans, quelques fissures affectaient le dallage, fissures considérées d'abord sans gravité qui furent attribuées par l'ensemble des intervenants au phénomène de retrait différé, favorisé par une insuffisance de joints de recoupement et d'armatures de peau du dallage. Toutefois, les désordres en question qui, si tel avait été le cas, auraient dû aller en s'estompant, s'aggravaient au contraire rapidement et ce, de manière totalement anarchique ; l'ouverture des fissures augmentaient et des soulèvements localisés du dallage ne tardèrent pas à apparaître.

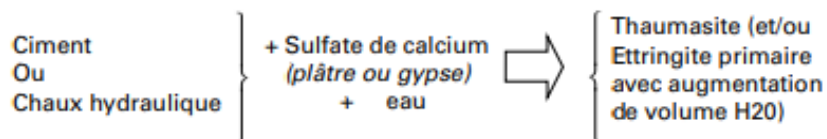
Un an après la première manifestation du désordre, les soulèvements de dallage constituaient des « vagues » atteignant, en certains points, plus de 10 cm et étaient tels qu'il devenait indispensable d'étayer les étagères industrielles (racks), ceux-ci menaçant de s'écrouler avec, évidemment, des risques d'accidents corporels graves pour le personnel d'exploitation. L'entrepôt dut alors être abandonné et reconstruit sur un autre site. L'analyse des prélèvements du sol supportant le dallage permit de détecter la présence de cristaux d'ettringite et de

Pathologie des ouvrages géotechniques

thaumasite, matériaux gonflants, tout d'abord sous forme de traces, mais qui apparurent rapidement en quantité beaucoup plus importante. On a vu précédemment que le terrain en place comprenait des gravats de chantier, donc béton et plâtre, et avait été injecté de ciment. Or, il y avait des circulations d'eau et des remontées de la nappe phréatique de telle sorte que, les eaux se chargent de sulfate provenant des déchets de plâtre et se fixent sur l'un des composants du liant, l'aluminium trétracalcique hydraté, pour former du sulfo-aluminate tricalcique hydraté. C'est l'ettringite primaire appelé aussi « sel de Candlot », de formule : $Al_2O_3, 3CaO, 3SO_4Ca, 32H_2O$.

Phénomène bien connu de tous les vieux maçons qui savent depuis toujours qu'on ne doit pas mélanger plâtre et ciment.

La réaction est la suivante :



Mais, surtout, le phénomène de cristallisation s'accompagne d'une forte expansion (M. Duriez, dans son célèbre « Traité de matériaux de construction » parlait de 300 % ; cette valeur semble aujourd'hui incertaine.) qui a provoqué la fissuration et le soulèvement du dallage. Le principe de réparation fut fort simple, il a suffi de casser le dallage, de substituer au terrain traité, générateur du sinistre, un grave ciment traditionnel, puis de refaire le dallage. Mais, si le coût des travaux de réparation est resté, somme toute, relativement modeste (dallage cassé et repris, puis remblai récent purgé), les pertes d'industrie corrélatives furent, elles, évidemment, d'un tout autre ordre de grandeur (plusieurs dizaines de millions de francs de l'époque).



CHAPITRE 3 :

PATHOLOGIES DES MURS DE SOUTÈNEMENT

1. Introduction :

Les soutènements font appel à une matière technique relativement complexe. Ils dépendent de nombreux paramètres dont ceux de la structure, du terrain, et même des conditions atmosphériques. Cet ensemble d'incertitudes conduit parfois, et faute de maîtrise, à des désordres plus ou moins graves. Les ouvrages de soutènement constituent donc des ouvrages à risque. En général, les pathologies de soutènements génèrent des dégâts importants : matériels et parfois corporels. La connaissance et l'expérience de la pathologie des ouvrages de soutènements permettent la mesure du risque et les contraintes à considérer pour s'en prémunir ou y remédier.

2. Définition :

Un ouvrage de soutènement est une construction qui permet d'occuper avantageusement la surface d'un terrain souvent en pente sans que celui-ci ne s'éboule, il retient le terrain du côté amont et permet de bénéficier de plus d'espace dans le côté aval.

L'utilisation de ces ouvrages est très variable cependant il existe plusieurs types d'ouvrages de soutènement.

3. Typologies des murs de soutènement :

Ces ouvrages peuvent être de hauteur limitée (moins de 2 mètres), mais également présenter des hauteurs de 5 à 6 mètres. Les ouvrages rencontrés sont de plusieurs types et sont classés suivant le mode de fonctionnement ou la morphologie (Figure 30).

Un ouvrage de soutènement doit satisfaire à l'exigence fondamentale de la stabilité examinée:

- Au point de vue de la résistance mécanique des matériaux constitutifs ;
- Au point de vue de la stabilité au renversement ou au basculement ;
- Au point de vue de la stabilité au glissement sur le sol d'assise (du fait de forces obliques ou de composantes horizontales), le soutènement étant d'une manière générale un ouvrage vertical ou pseudo-vertical;
- Au point de vue de la résistance du sol d'assise au niveau de sa fondation, les tassements de celui-ci pouvant compromettre sa stabilité d'ensemble.


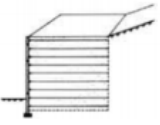

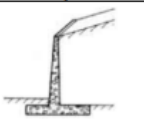
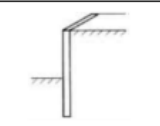
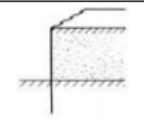
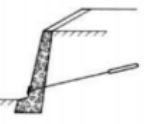
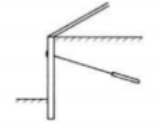
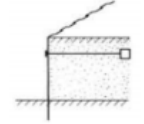
Mode de poussée	Ouvrages de soutènement		
Poids	 Murs poids en béton ou en maçonnerie	 Murs en terre armée	 Ouvrages cellulaires
Encastrement	 Mur cantilever en BA	 Paroi moulée	 Rideau de palplanches
Ancrage	 Mur en béton ancré	 Paroi moulée ancrée	 Rideau ancré

Figure 30. Typologies des murs de soutènement.

Cette exigence s'applique principalement aux murs de type auto-stable. En fonction de ce critère, on peut classer les murs de soutènement en deux catégories principales :

3.1. Les murs considérés comme auto-stables du fait de leur géométrie :

3.1.1. Les murs poids ou murs gravitaires :

Ces murs (Figure 31) comportent essentiellement :

- Une paroi pseudo verticale assurant le soutènement des terres, en maçonnerie lourde (moellons de pierre, briques pleines ou béton banche non armé ou en blocs de béton) ;
- Une semelle de fondation débordante en béton non armé en général.

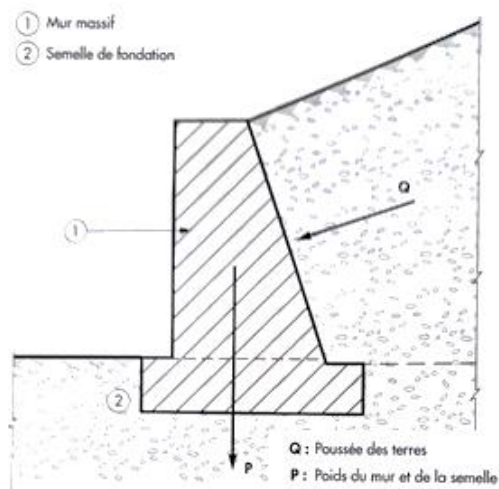


Figure 31. Mur poids ou mur gravitaire.

3.1.2. Murs lestés ou murs cantilever :

Ces murs sont des ouvrages en béton armé. Leur géométrie élémentaire correspond à un T ou un L inverse. Ils présentent, comme les murs poids, une paroi pseudo verticale assurant le soutènement des terres, encastrée sur une semelle débordante à l'avant et à l'arrière du voile vertical (Figure 32).

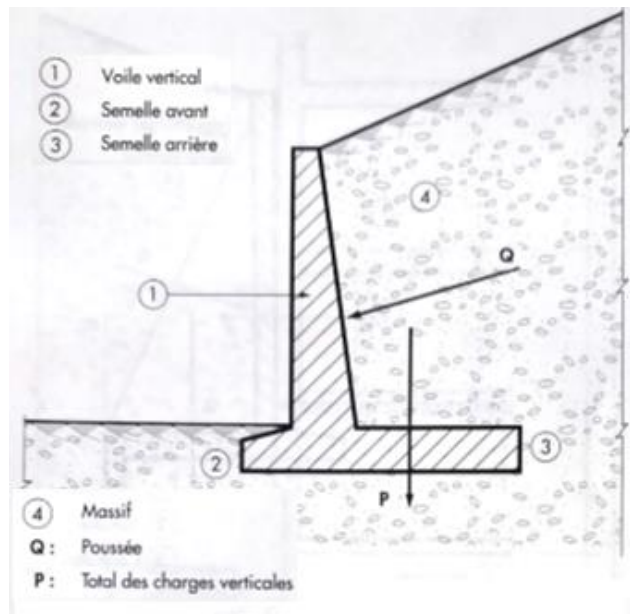


Figure 32. Mur lesté ou mur cantilever.

La stabilité de l'ensemble est assurée par le poids des terres intervenant sur la semelle arrière ou sur des ouvrages complémentaires (chaise de lestage, par exemple). La stabilité de la paroi verticale formant soutènement peut être assurée par des contreforts transversaux pleins ou ajoures (Figure 33).

Ce type de mur est auto-stable par sa conception qui nécessite un dimensionnement et une organisation déterminée par une étude de béton armé. De ce fait, les sinistres correspondants sont relativement peu nombreux (environ 13 % de l'ensemble des cas contre plus de 80 % pour les précédents).

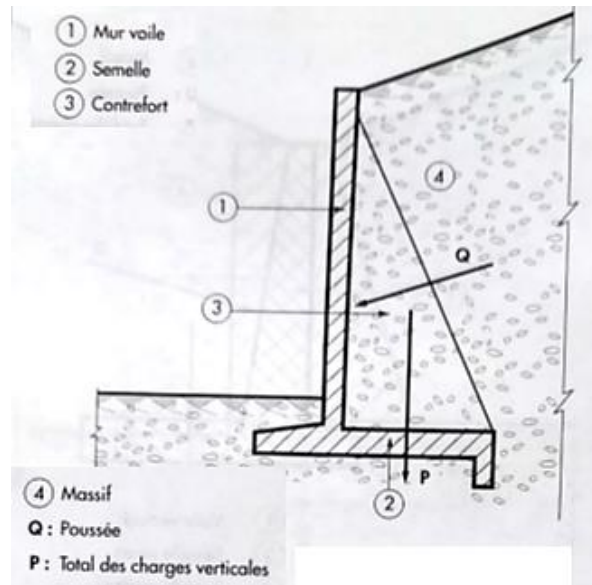


Figure 33. Mur lesté ou cantilever à contreforts transversaux.

3.2. Les murs dont la stabilité est assurée par d'autres ouvrages : (et qui donc, naturellement, ne sont pas auto-stables) :

3.2.1. Murs de sous-sol enterres :

Ce cas fréquent (Figure 34) correspond à un soutènement incorporé à l'infrastructure d'une construction comportant un ou plusieurs niveaux de sous-sol. Le mur limitant la construction coté massif subit la poussée des terres Q et son poids propre P est insuffisant pour assurer la stabilité du soutènement, même avec un seul niveau de sous-sol.

La plupart des accidents interviennent alors que les planchers ne sont pas réalisés, lors du remblaiement des fouilles. Dans ce cas, la stabilité est assurée par les planchers intermédiaires qui constituent une butée, c'est-à-dire un appui pour la paroi verticale soumise à des forces obliques (composante horizontale).

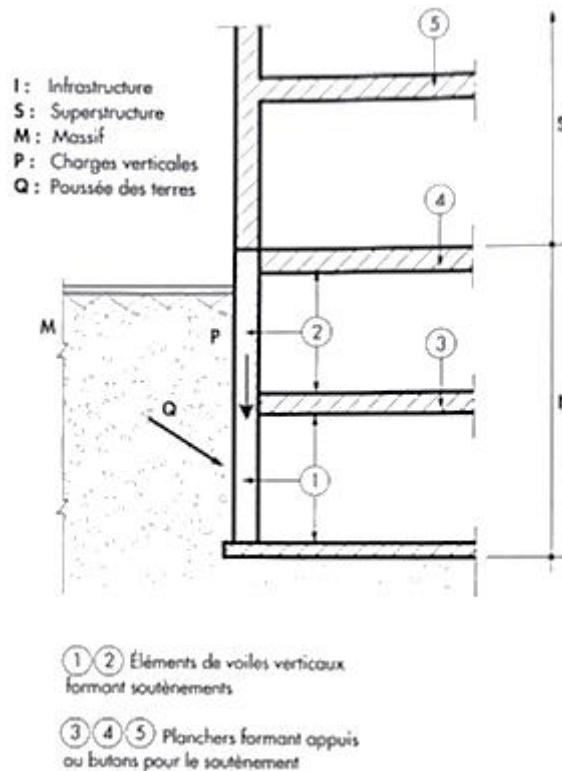


Figure 34. Cas courant de soutènement incorporé.

La stabilité en phase définitive de ce type de mur ne peut être assurée que par le poids du mur augmente des réactions du ou des planchers intermédiaires en considérant le mur entre deux appuis intermédiaires (planchers, dallage) soumis à une flexion composée (effet de la poussée Q et du poids P).

3.2.2. Murs maintenus ou retenus par des tirants d'ancrage :

Ce type de mur (Figure 35) correspond à deux cas d'utilisation :

1/ La paroi constitue un ouvrage provisoire de maintien d'une fouille ouverte nécessitant des parois verticales établies en limite de propriété, en bordure (ou non) de constructions existantes.

Actuellement, les techniques utilisées sont les suivantes :

- Parois moulées dans le sol et ancrées par tirants provisoires ou dans le cas de fouilles étroites, butonnées à différents niveaux.
- Parois berlinoises : elles sont constituées de profils métalliques dans le sol et de parois bétonnées par tranches, ancrées dans le sol par tirants précontraints ou butonnées dans le cas de fouilles de faible largeur.

Pathologie des ouvrages géotechniques

- Parois hurpinoises : la stabilisation provisoire des parements verticaux d'une fouille ouverte est réalisée par projection de béton avec mise en place d'armatures, directement sur le parement mine dans le terrain.

2/ La paroi constitue un ouvrage définitif. La technique souvent utilisée pour les constructions d'infrastructure d'immeuble (sous-sols superposés) est celle des parois moulées préfabriquées ancrées dans le sol et retenues par des tirants précontraints.

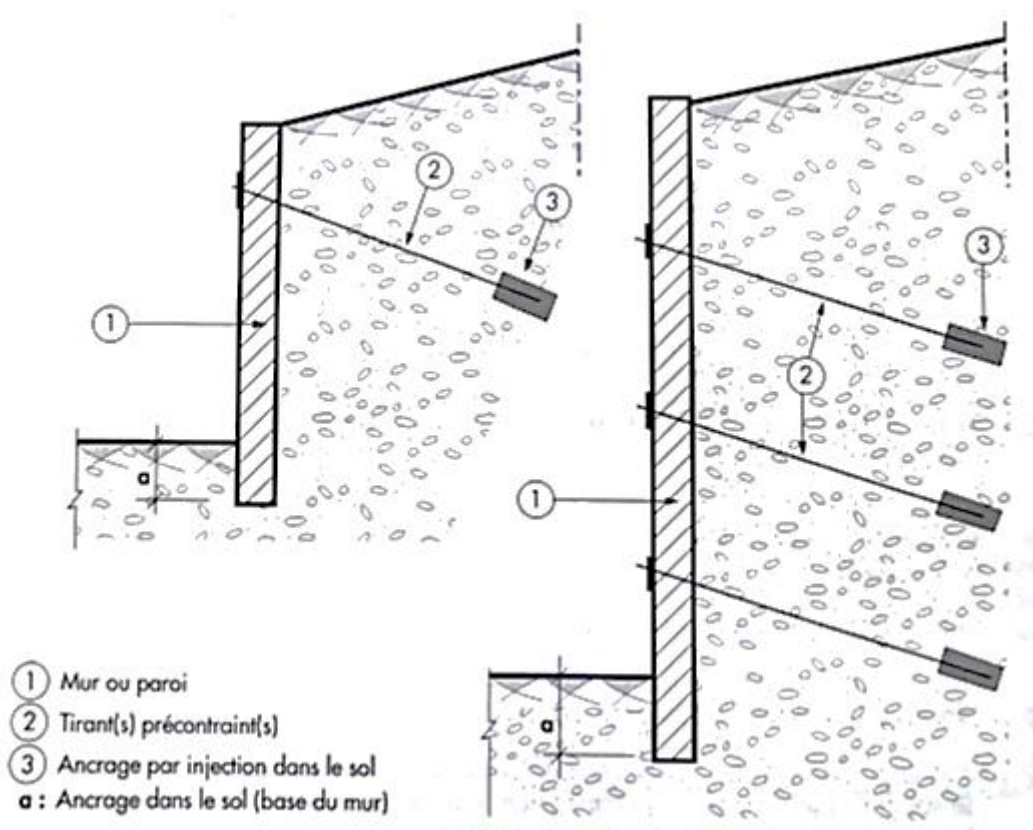


Figure 35. Mur ou paroi de soutènement maintenu par tirants d'ancrage.

Les rideaux de palplanches sont un autre type d'ouvrage de soutènement définitif, surtout utilisés en travaux publics. Le cas type est le mur de quai ancre par tirants et plaques d'ancrages (Figure 36).

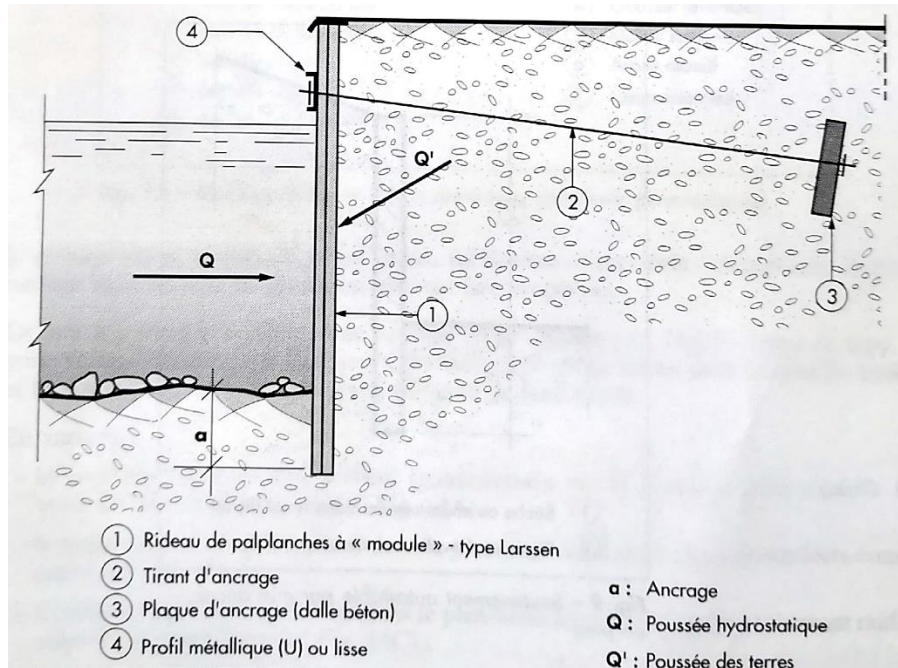


Figure 36. Soutènement définitif par rideau de palplanches ancré en pied et retenu en tête.

3.2.3. Murs auto-stables type « bèche » :

Ce type de mur comporte deux parties:

- Une zone ancrée dans le sol, ou fiche, réalisée par encastrement (paroi moulée) ou par fichage (battage dans le cas d'un rideau de palplanches) ;
- Une zone « active » soutenant les terres du massif à retenir, généralement de hauteur limitée, situé au-dessus du niveau inférieur du massif (Figure 37).

Le mur se comporte comme une console encastree dans le sol sur la hauteur de la fiche et fonctionnant en butée et contre butée. La partie en élévation est soumise à la poussée des terres du massif et subit, de ce fait, des déformations. Afin de limiter ces dernières, le mur doit présenter une rigidité suffisante pour limiter la hauteur libre au-dessus de l'encastrement.

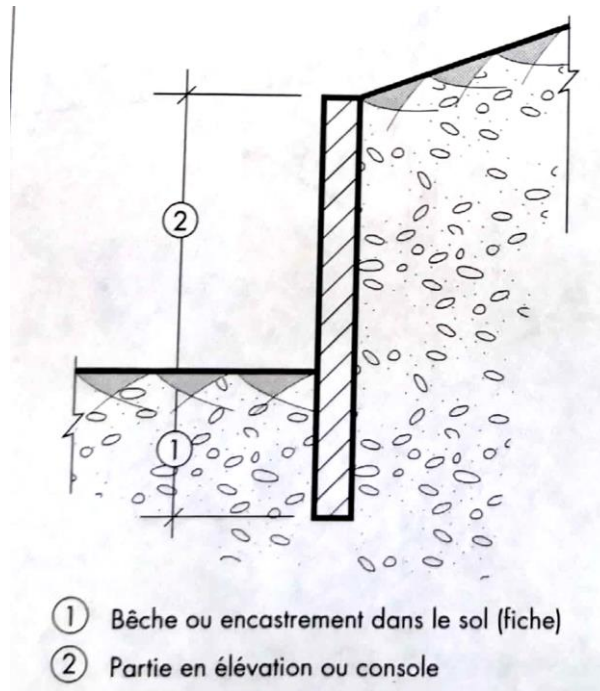


Figure 37. Soutènement auto-stable par un ancré en pied.

4. Fonctionnement d'un mur de soutènement :

Pour stabiliser un massif de sol, on peut aussi s'opposer à la poussée des terres, par la construction d'une paroi ou d'un mur. Dans un massif de sol, le mur permet de réduire l'emprise du talus pour laisser place au passage d'une route ou préserver un bâtiment déjà présent.

5. Stabilité d'un mur de soutènement :

Les ouvrages de soutènements sont soumis à des risques de rupture, sous l'effet des forces exercées par le massif. Il existe différents types de rupture, et donc différents types de stabilité, qui doivent toujours être pris en compte lors de l'élaboration de l'ouvrage. On distingue donc stabilité interne et stabilité externe.

5.1. Stabilité interne :

Un mur doit avoir une stabilité interne, qui passe par la résistance à la rupture des constituants du mur sous l'action des forces exercées par le massif (Figure 38).



Figure 38. Stabilité interne d'un mur de soutènement.

5.2. Stabilité externe :

Il existe trois types de stabilité externe : la stabilité au renversement, la stabilité au glissement, la stabilité au poinçonnement.

5.2.1. Stabilité au renversement :

Un mur de soutènement est soumis à des moments qui sont de nature à le faire tourner par rapport à sa base et le faire renverser. La conception du soutènement doit tenir compte de la valeur du moment moteur produit par les poussées des terres et des surcharges pour l'équilibrer à l'aide d'un moment résistant apporté par le poids du soutènement et celui des terres qu'il déplacerait dès qu'il se met à tourner (Figure 39.a).

5.2.2. Stabilité au glissement :

Le mur peut glisser sur sa base. La poussée des terres et celles des surcharges doit être reprise par le frottement mobilisé à la sous-face de la semelle du mur. A défaut la semelle est munie d'une bêche permettant d'améliorer la résistance au glissement (Figure 39.b).

5.2.3. Stabilité au poinçonnement :

Le mur peut poinçonner par un excès de charges verticales. La conception de la semelle du mur doit tenir compte de ce risque d'instabilité (Figure 39.c).

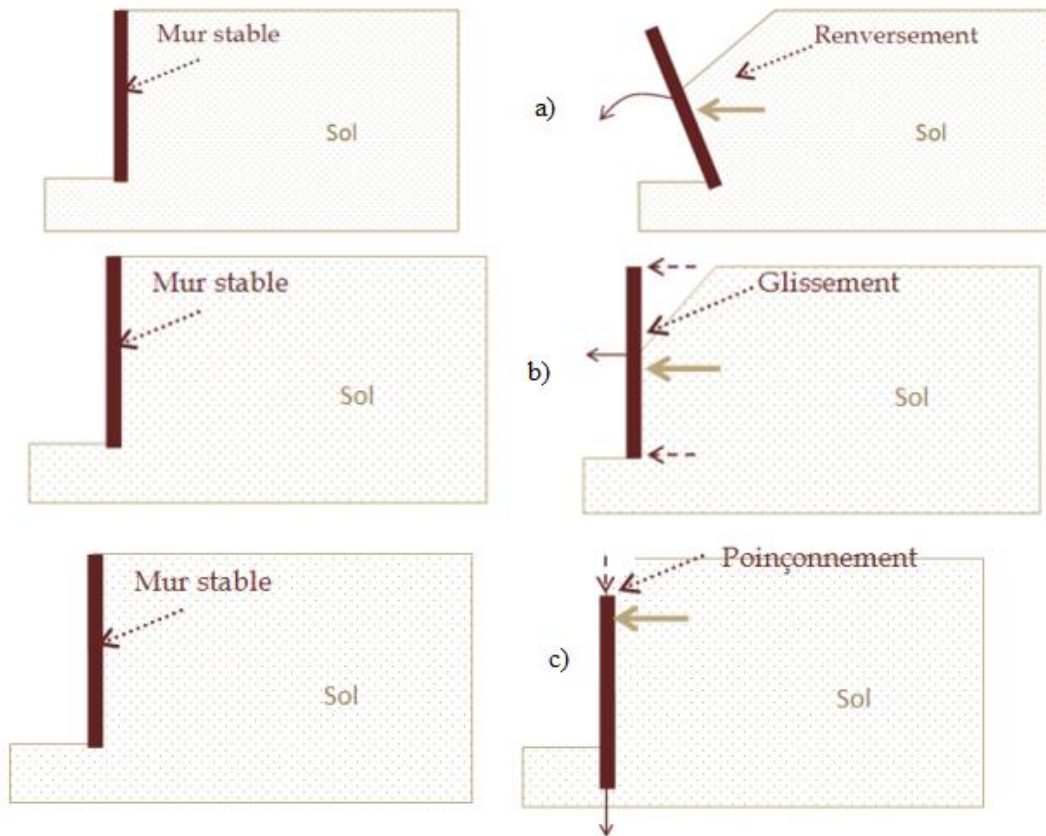


Figure 39. Stabilité externe d'un mur de soutènement.

6. Pathologies des murs de soutènement :

6.1. Généralités :

Les ouvrages de soutènement sont souvent associés aux ouvrages de fondation car ils procèdent des principes analogues déduits de la mécanique des sols.

Le terrain est l'élément le moins bien connu, en raison de son hétérogénéité et de la variation de ses caractéristiques sous l'effet de facteurs défavorables, comme la présence d'eau derrière un ouvrage par exemple. Même si le terrain situé à l'arrière du mur suppose le contenir est connu parce que dans la zone immédiatement situé contre le mur, le « milieu sol » n'est généralement pas ou mal défini :

- Sous l'ouvrage de soutènement, sauf s'il est fondé en profondeur (pieux) ;
- A l'intérieur du massif contenu.

6.2. Les facteurs affectant des désordres aux murs de soutènement :

Ces désordres prennent leur origine à différentes étapes de la conception et de la réalisation de l'ouvrage. Dans le cas général des murs on observe les cas suivants :

6.2.1. Absence d'étude :

Si, d'une manière générale, l'absence d'études est à l'origine de nombreux désordres affectant les ouvrages en béton armé, une telle pratique est, dans le cas des murs de soutènement, à l'origine de désordres de toute nature, souvent graves.

Les exemples suivants, d'ailleurs très divers vont permettre, si besoin e' tait, de s'en rendre compte.

Exemple : Un premier exemple concerne les 2 murs latéraux de l'accès au garage en sous-sol d'une maison individuelle réalisée sans Maître d'œuvre, ni bureau de contrôle par un artisan maçon (Figure 40). Bien que ces 2 murs fussent de faible hauteur (2.50 m environ au maximum) très vite des fissures importantes tant horizontales que verticales apparurent en partie basse, lesquelles ne manquèrent pas d'inquiéter le Maître d'ouvrage.

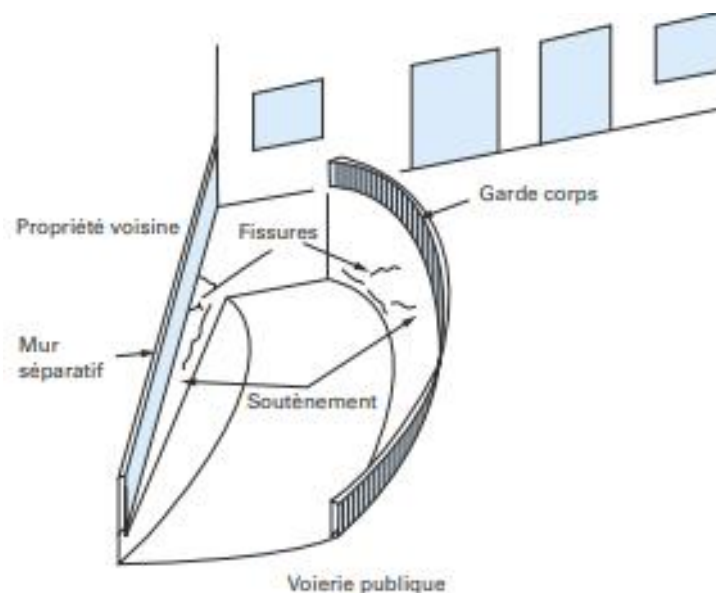


Figure 40. Murs latéraux de l'accès au sous-sol d'une maison individuelle.

6.2.2. Absence ou défaut de drainage :

La présence d'eau, en amont du mur de soutènement, modifie de manière fondamentale les caractéristiques des sols ainsi que l'action des terres de celui-ci. Une faible quantité d'eau

Pathologie des ouvrages géotechniques

produit des tensions capillaires et améliore l'attraction des grains, c'est-à-dire la tenue du terrain.

A l'inverse, une quantité d'eau plus importante dégrade ces tensions capillaires et aggrave la poussée de terre. Il en est de même au niveau du sol d'assise, la dégradation de la cohésion entraîne une réduction de la résistance du sol par rapport au poids du mur et à la poussée de terre, pouvant compromettre la stabilité et l'équilibre du mur.

Pour y remédier, il faut éviter que le mur de soutènement forme un barrage à la circulation des eaux pour éviter l'accumulation des eaux. Vous pouvez alors concevoir :

- Le drainage efficace des terrains en amont du mur de soutènement, complété par la mise en place d'un géotextile avant le remblayage ;
- La pose en partie inférieure du mur d'un drain horizontal reliée à un exutoire visitable ;
- La mise en place de barbacanes, régulièrement réparties, dans la paroi, qui permettent l'écoulement vers l'extérieur des eaux retenues accidentellement en amont (tous les 2 m avec un diamètre de 10 cm minimal ou de 10/20 cm) ;
- Le rejet de tout remblai de type argileux.

6.2.3. Mauvais dimensionnement :

Le mauvais dimensionnement est également source de désordres :

- Mauvaise prise en compte des poussées des terres,
- Des coefficients de frottements internes des terres,
- Absence de prise en compte des poussées hydriques,
- Des contraintes d'exploitations aussi bien sur la partie inférieure que supérieure,
- Contrainte supérieure à celle envisagée sous la semelle...

Il peut induire une sous-estimation des contraintes et un déplacement des points d'applications des efforts. Cela peut conduire à un basculement voire un renversement de l'ouvrage.

6.2.4. Défaut d'exécution de l'ouvrage :

a) *Pour l'ouvrage :*

Pathologie des ouvrages géotechniques

Mauvaise qualité ou positionnement non adapté des armatures (densité trop faible, défaut de continuité), absence de joints de dilatation, temps de prise du béton trop court avant réalisation des phases suivantes.

b) Pour le terrain :

Mauvais talutage en tête, remblaiement par couches trop épaisses, lessivage des particules fines en l'absence de géotextile, fuite de canalisation...

6.2.5. Principales dispositions à prendre :

a) Fondations :

Il y a lieu de dimensionner convenablement la largeur de la semelle de fondation afin :

- De faire travailler le sol à un taux admissible,
- D'assurer la stabilité du mur au glissement le long de sa base et au renversement,
- D'obtenir que la résultante des forces agissant sur le mur (poids propre et poussée des terres) passe par le tiers central de la base de la fondation.

b) Drains :

Il est important de réaliser un bon drainage du remblai pour éviter que l'eau ne se mette en charge derrière le mur de soutènement, particulièrement pendant les périodes de pluies.

A cet effet, on prévoit un remblai perméable (sables et graviers) derrière le mur et on dispose dans celui-ci des barbacanes espacées de 2 à 3 m et munies d'un filtre pour s'opposer à l'entraînement des éléments fins du sol ou d'un drain à la base. Le drain est fortement conseillé quand le terrain d'assise est une argile peu perméable.

On estime 25% des accidents constatés avec les murs de soutènement sont dus à un manque ou à un mauvais fonctionnement des drains. Il suffit de se rappeler que la poussée due à l'eau peut être plusieurs fois celle des terres pour laquelle le mur a été dimensionné.

c) Matériaux à éviter :

La présence de l'argile gonflante derrière le mur peut provoquer des désordres importants. De même, il faut proscrire l'utilisation des remblais gypseux qui attaquent les mortiers et les bétons.

Pathologie des ouvrages géotechniques

d) Réduction de la poussée :

Si le remblai derrière le mur a de mauvaises caractéristiques mécaniques (C, ϕ), on peut réduire l'importance de la poussée en interposant, entre le mur et le remblai, un bon matériau ayant des caractéristiques élevées (gravier,...).

e) Stabilité globale :

Quand il s'agit d'ouvrages importants reposant sur un mauvais sol, il y a lieu d'effectuer un calcul de stabilité globale (sol-mur) par la méthode des cercles de glissement.

6.3. Désordres concernant les murs de soutènement :

6.3.1. Les murs enterrés soumis à la poussée des terres :

Les désordres affectant ce type d'ouvrage concernent donc :

- Les ouvrages définitifs : murs butés ;
- Les ouvrages en cours de travaux (butée de plancher non assurée et remblaiement prématuré).

La pathologie de ce type de mur (enterré ou semi-enterré) ne concerne ici que la stabilité sous l'effet des poussées dues au terrain ou à l'eau. Elle ne vise pas la pénétration de l'eau à travers la paroi.

On cite les différentes causes de sinistres :

6.3.1.1. Parois de résistance :

a) Parois enterrées ou semi-enterrées de faible hauteur :

On distingue :

- Paroi de résistance insuffisante pour équilibrer la poussée des terres en phase définitive. Les manifestations de désordres correspondent à des effondrements ou à des bombements ou fissurations.
- Paroi de résistance insuffisante pour équilibrer la poussée hydrostatique en phase définitive (remontée du niveau de la nappe phréatique ou accumulation d'eau par défaut de drainage). Les manifestations de désordres sont analogues à celles du cas précédent avec, en plus, l'inondation des zones enterrées.

b) Parois enterrées ou semi-enterrées de grande hauteur ($H > 2.50$ m):

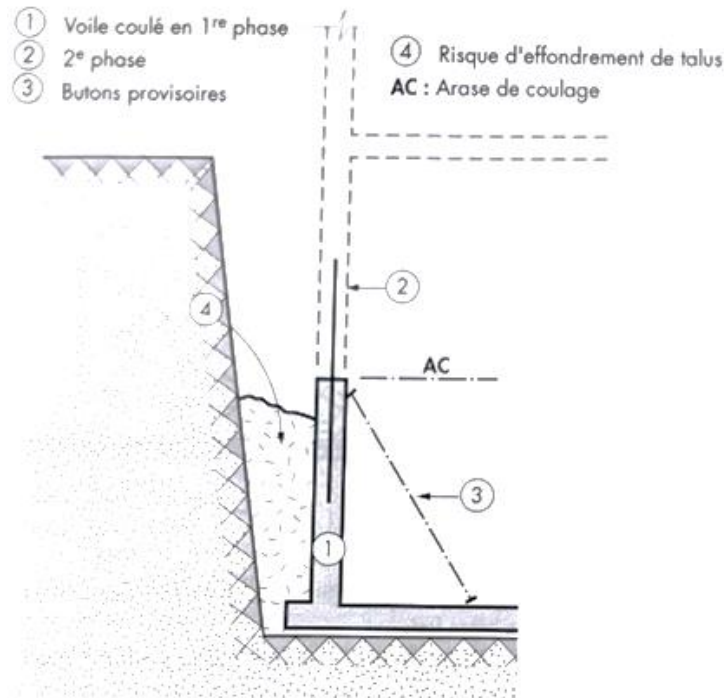


Figure 41. Exécution de paroi extérieure de grande hauteur.

6.3.1.2. Remblaiement prématuré :

Une autre cause de sinistre est le remblaiement prématuré effectué avant la réalisation du plancher constituant la butée supérieure. La manifestation du sinistre est l'effondrement complet du mur.

6.3.1.3. Absence de précautions pendant les travaux :

La réalisation d'une fouille avec talus quasi vertical non protégé peut entraîner, suite à des pluies violentes, l'effondrement du talus et du mur de sous-sol en construction (cas d'un mur non encore buté par le plancher).

De même, un remblaiement contre un mur même buté en tête, réalisé avec compactage par engin lourd peut générer des poussées importantes, notamment sur un mur non ou peu chargé et créer des désordres par fissurations ou bombements susceptibles de mettre en péril le mur par effet de flambage lors du chargement ultérieur du mur par les planchers et les murs en élévation.

6.3.2. Les murs auto-stables massifs (ou murs poids) en maçonnerie :

On distingue les sept causes suivantes :

Pathologie des ouvrages géotechniques

6.3.2.1. Absence ou erreur de conception :

De nombreux murs massifs s'effondrent ou subissent des désordres graves car ils ont été construits sans aucune étude préalable. Cela veut dire que leur dimensionnement a été totalement improvisé, qu'aucun calcul n'a été effectué ou au contraire a été basé sur des hypothèses fausses, ou encore que la fondation n'a pas été adaptée au type de la paroi maintenue (Figure 42).

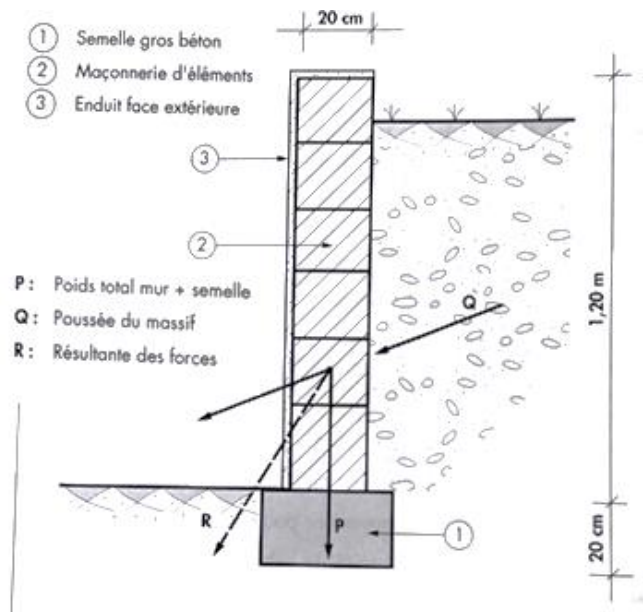


Figure 42. Disposition type de mur instable.

6.3.2.2. Absence ou insuffisance de butée en pied de mur — Absence d'ancrage :

Les désordres des murs de soutènement massifs dus à cette cause sont relativement peu fréquents.

On les trouve principalement dans ceux qui sont fondés sur des pentes et soumis à des poussées hydrostatiques (effet différentiel ou accumulation d'eau à l'arrière du mur par défaut ou insuffisance de drainage) (Figure 43).

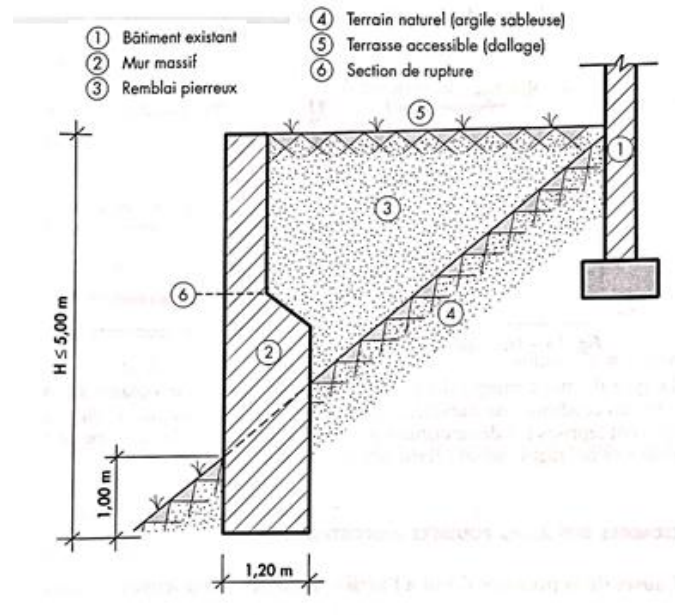


Figure 43. Effondrement d'un mur par butée insuffisante en pied.

6.3.2.3. Paroi en maçonnerie mal dimensionnée pour encaisser des contraintes de traction :

Cas des murs poids avec semelle débordante à l'avant. Le cas des maçonneries subissant des contraintes de traction a été évoqué à la figure 44, pour les défauts de dimensionnement, notamment de murs à redans (parement interne).

D'autres types de murs massifs en béton non armé réalisés avec leur semelle de fondation peuvent présenter des contraintes de traction sur le parement interne (Figure 44).

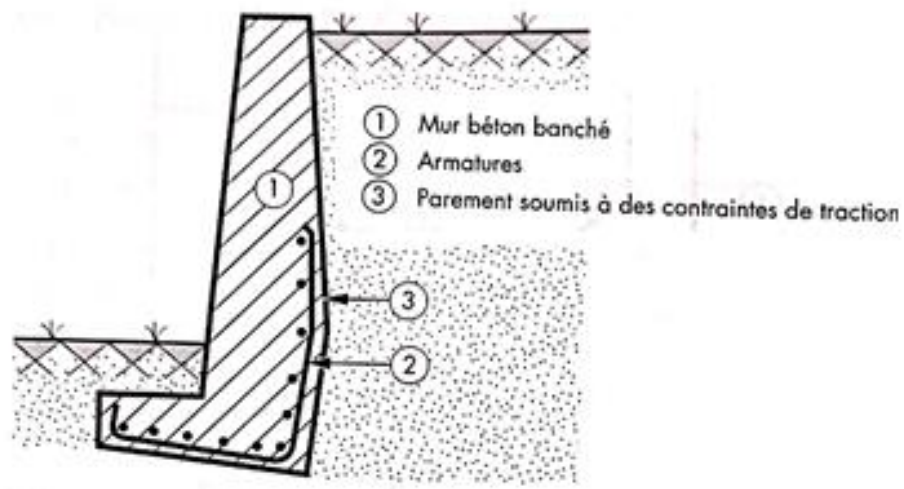


Figure 44. Paroi en maçonnerie mal dimensionnée.

6.3.2.4. Absence de drainage ou inefficacité de celui-ci par colmatage des drains :

Présence de poussées hydrostatiques (non prévues) à l'arrière du mur. Pour la présence d'eau à l'arrière du mur, on distingue les causes suivantes :

- Absence de dispositifs d'évacuation des eaux superficielles ;
- Insuffisance du système d'évacuation des eaux ;
- Colmatage du système de drainage;
- Action du gel;
- Mur construit en bordure d'une rivière, d'un canal ou autre et soumis à des effets de pression et contre-pression.

6.3.2.5. Action de l'eau dans un massif :

L'action de l'eau à l'intérieur d'un massif est généralement une action statique qui intervient (Figure 45):

- Directement, sur la paroi soutenue, sous forme d'une pression hydrostatique normale à la paroi (sans effet de frottement comme la poussée des terres) ;
- Indirectement, par déjaugage du terrain.

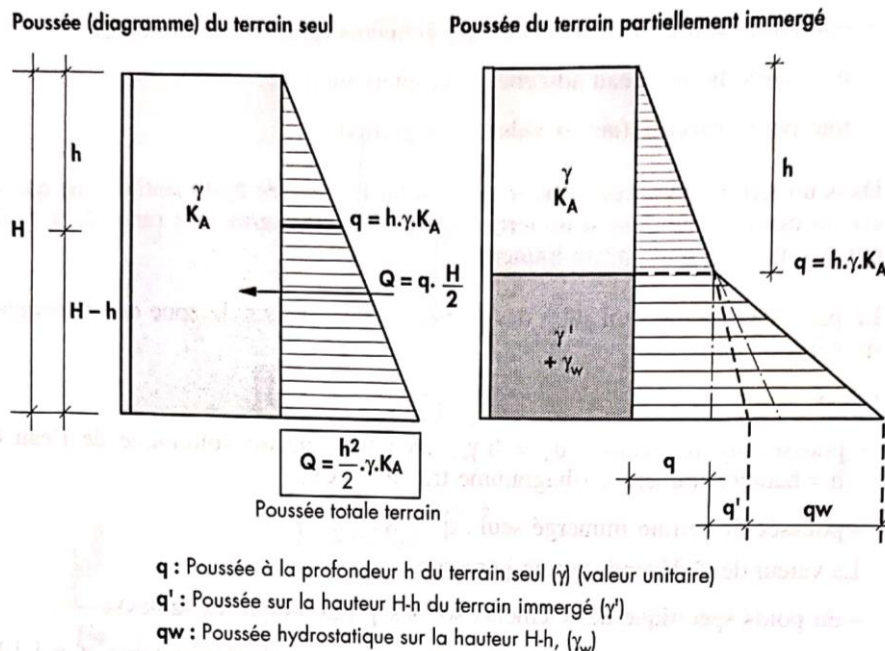


Figure 45. Diagramme des poussées sur un mur de soutènement.

6.3.2.6. Effet du gel sur le terrain, gonflement avec liquéfaction du terrain (en fin de la période de gel) :

Par temps froid ou très froid, l'eau d'un terrain peut se transformer en glace. Le phénomène s'accompagne d'une augmentation de volume de 10 % environ n'agissant que sur l'eau incluse. Les conséquences dommageables pour un mur de soutènement se situent :

- Au niveau des fondations : Si celles-ci sont peu profondes (mises hors gel non respectée), le sol de fondation et l'ouvrage peut se soulever. Les désordres se produisent au dégel, à la suite du ramollissement et de la désagrégation du sol. La semelle avant, généralement peu enterrée, se trouve dans des conditions défavorables car les contraintes transmises au sol sont maximales. Le ramollissement de celui-ci peut amorcer un phénomène de basculement du mur;
- Au niveau de la partie de soutènement : si le terrain petit geler travers le mur, le sol s'expansé et engendre des poussées supplémentaires très élevées pour les murs.

6.3.2.7. Causes diverses :

- Terre-plein anormalement surcharge;
- Mur établi sur une pente, effet de glissement ;
- Affouillement en pied de la fondation, etc.
- Rotation de la paroi par poussée du massif (Figure 39);

Exemple : Le mur en béton banche a subi une légère rotation, probablement due à un tassement de la semelle de fondation et à l'effet de la poussée du remblai constitué de sable de dune (Figure 46 a, b).

Le mouvement relatif au droit d'un joint du mur avec un bâtiment situé sur le même alignement a provoqué une fissure avec arrachement (Figure 46 c).

D'autre part, ce même mouvement a provoqué une fissure de rupture sur un mur vertical perpendiculaire au mur de soutènement (Figure 46 d) bordant un escalier.

Dans la même zone de mur, le soutènement maintenant le terre-plein contre l'escalier (Figure 39) s'est fissuré au droit de l'escalier, c'est-à-dire dans la zone des poussées verticales, la volée d'escalier constituant une butée (Figure 46 e)

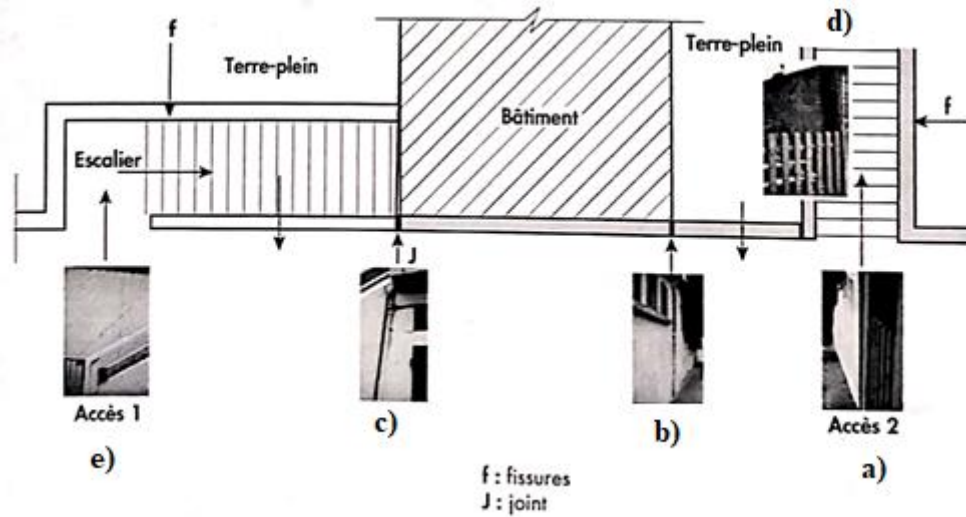


Figure 46. Plan schématique de situation.

6.3.3. Les murs auto-stables en béton armé (Type cantilever):

On distingue les sept causes suivantes :

- Conception d'ensemble inadaptée au sol d'assise (stabilité générale) (Figure 47).

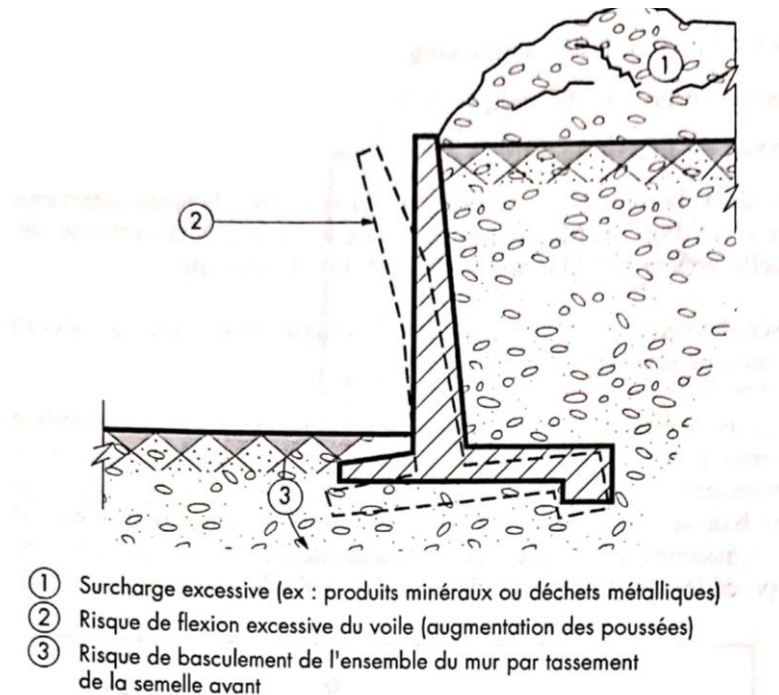


Figure 47. Basculement d'un mur auto-stable (Cantilever) par surcharge excessive sur le terre-plein.

- Conception, calcul et réalisation du voile erronés ou déficients (Figure 48).

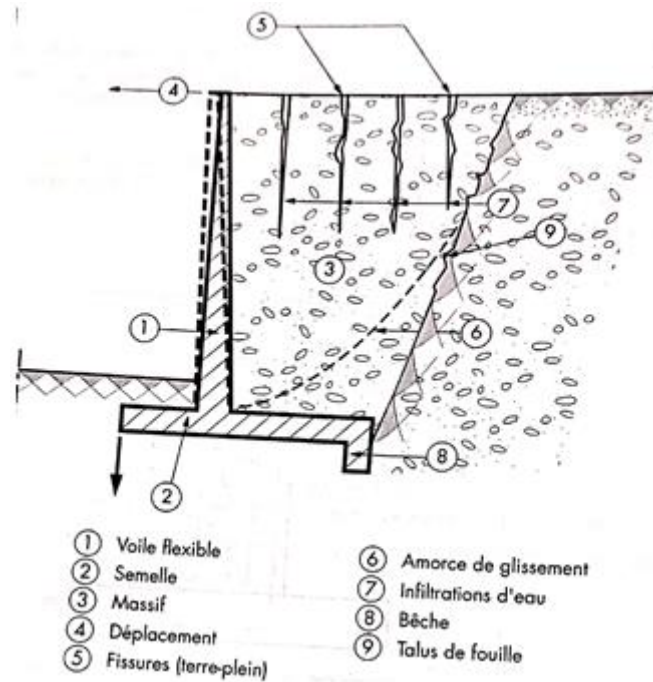


Figure 48. Amorce de basculement d'un mur auto-stable résultant d'une déformation excessive du voile.

- Dimensionnement de la fondation insuffisant.
- Dispositions de ferrailage incorrectes (Figure 49).

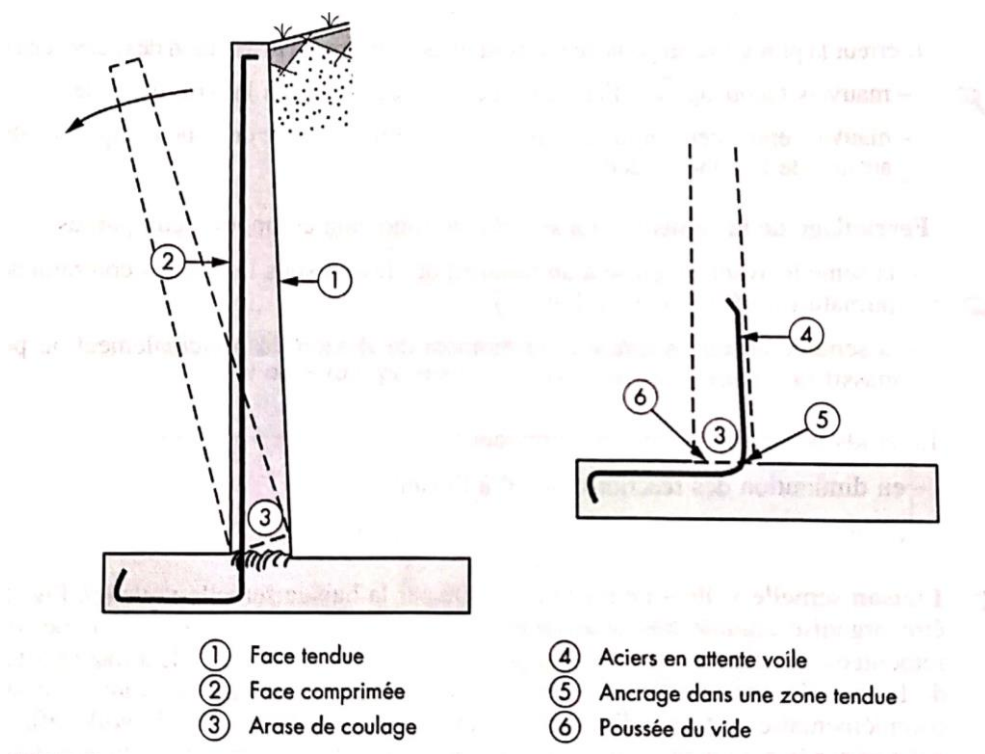
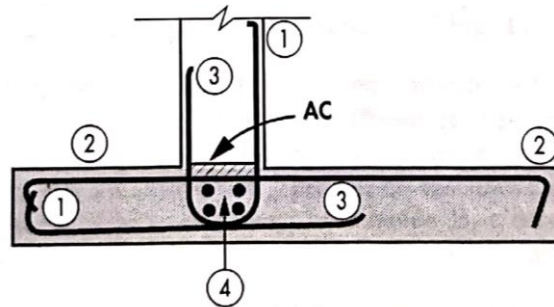


Figure 49. Disposition d'armatures conduisant à la ruine de l'ouvrage.

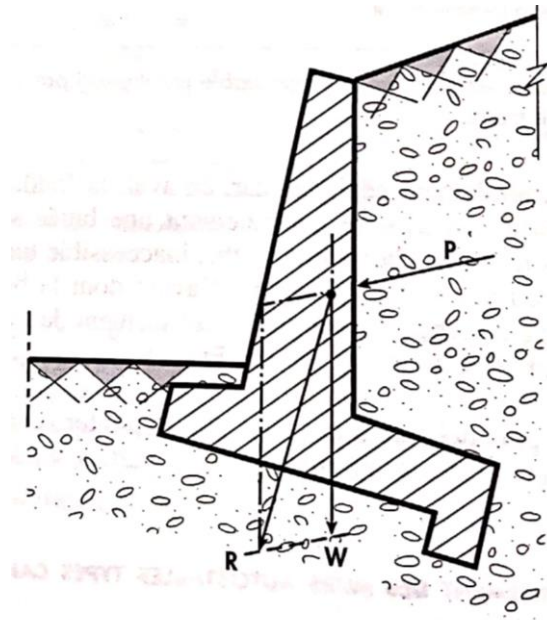
- Liaisons voile/semelle défectueuses (Figure 50).



- ① Armature principale semelle avant avec attente pour le voile
 - ② Armature principale semelle arrière prolongée (ancrage) sur semelle arrière
 - ③ Armature complémentaire de liaison avec attente pour le voile
 - ④ Aciers longitudinaux (chaînage-répartition)
- AC : Arase de coulage

Figure 50. Liaison semelle-voile.

- Stabilité au glissement non assurée (Figure 51).



- P : Poussée massif
- W : Poids total (mur + terrain sur semelle)
- R : Résultante générale

Figure 51. Stabilité au glissement d'un mur auto-stable type cantilever, par inclinaison de la semelle de fondation.

- Absence de drainage (ou colmatage).

- Causes diverses :

- Effet de gel;
- Tassement de fondations ;
- Travaux sur existants (surélévation) ou surcharges sur terre-plein ;
- Affouillement en pied;

Pathologie des ouvrages géotechniques

- Construction sur une pente ;
- Effets de poussées hydrostatiques (conséquence d'un mauvais drainage).
- Action des séismes.

7. Etudes de cas :



Figure 52. Cas N 1.

Constat :

- Mur de 5m de hauteur effondré sur 12 ml
- Trois niveaux de murs de moellons construits à trois époques différentes
- Poursuite de l'extrémité du mur par un voile béton armé
- Fortes pluies dans les jours avant le sinistre

Causes du sinistre :

- Mur sous dimensionné pour être rehaussé
- Mauvais ferrailage de la partie BA et défaut d'encastrement
- Drainage inopérant
- Remblai médiocre



Figure 53. Cas N 2.

Constat :

- Mur de 7 m de hauteur effondré sur 25 ml
- Trois niveaux de murs moellons construits à trois époques différentes
- Les deux niveaux supérieurs se sont effondrés

Pathologie des ouvrages géotechniques

- Mur fondé à plus de 2 m de profondeur dans des tufs compacts
- Pas de fortes pluies dans les jours avant le sinistre

Causes du sinistre :

- Mur sous dimensionné pour être rehaussé malgré la présence de contreforts internes
- Drainage inopérant
- Remblai médiocre



Figure 54. Cas N 3.

Constat :

- Effondrement et basculement du mur de soutènement en béton armé en tête de versant

Causes du sinistre :

- Origine extérieure (glissement aval ayant généré un déchaussement des fondations)
- Mur mal fondé (absence d'encadrement dans les terrains durs en place)
- Ferrailage plus ou moins insuffisant



Figure 55. Cas N 4.

Constat :

- Mur de 5 m de hauteur effondré sur 40 ml

Pathologie des ouvrages géotechniques

- Mur en béton armé rehaussé par un voile en agglos légèrement ferraillé
- Fortes pluies dans les jours avant le sinistre

Causes du sinistre :

- Rehausse sous dimensionné et mal conçue
- Béton de mauvaise qualité
- Ferrailage insuffisant
- Drainage inopérant, en particulier barbacanes colmatées
- Remblai médiocre



Figure 56. Cas N 5.

Constat :

- Mur de 2,5 m de hauteur entre deux habitations
- Mur en béton très peu ferraillé
- Pluies importantes dans les jours précédant le sinistre

Causes du sinistre :

- Béton de mauvaise qualité très mal ferraillé et probablement non encastré
- Absence total de drainage
- Remblai médiocre



Figure 57. Cas N 6.

Pathologie des ouvrages géotechniques

Constat :

- Mur de 7 m de hauteur effondré sur 35 ml
- Trois niveaux de murs : moellons, béton massif, béton armé, construits à trois époques différentes
- Le niveau supérieur s'est effondré
- Fortes pluies dans les jours avant le sinistre

Causes du sinistre :

- Mauvais encastrement du voile supérieur dans les anciens murs d'assise
- Drainage inopérant
- Remblai médiocre : trop vigoureusement compacté



Figure 58. Cas N 7.

Constat :

- Mur moellons de 4.5 m de hauteur par 1,4 m de largeur en pied (et 1 m en tête) effondré sur 30 ml
- Extrémité avec surélévation en agglos
- Le mur s'est effondré sur les 2/3 de sa hauteur
- Fortes pluies dans les jours avant le sinistre

Causes du sinistre :

- Pas de vérification de la possibilité de surélever le mur
- Ferrailage vertical du mur en agglos sous-dimensionné
- Drainage insuffisant, voire inopérant
- Remblai médiocre



CHAPITRE 4 :

***DIAGNOSTIC, INVESTIGATIONS ET
METHODES D'AUSCULTATION***

1. Introduction :

Le patrimoine bâti, que ce soit dans le monde ou en Algérie représentant l'un des actifs les plus coûteux d'un pays, se dégrade et demande à être réhabilité. Les opérations de préservation et de maintenance du parc d'ouvrages sont extrêmement coûteuses, et il est impératif de rechercher des méthodes précises et des technologies innovatrices qui permettent une maintenance et une réhabilitation qui soient économiques et rentables et qui participent au développement durable de la société. Aujourd'hui, de nombreux ouvrages montrent des signes importants de dégradations principalement liés aux problèmes de fondations. Or, il apparaît que si ces pathologies avaient été prises en compte suffisamment tôt, les solutions de maintenance et de réparation auraient permis d'augmenter la durée de vie de l'ouvrage et d'éviter son remplacement précoce.

2. Diagnostic général :

Etablir un diagnostic général d'une construction existante est d'une importance majeure dans tout projet de réhabilitation, notamment dans le cas où il n'est qu'après avoir pris connaissance de l'état réel dans lequel se trouve la construction concernée que le maître d'ouvrage peut envisager de prendre les décisions les mieux indiquées quant à la conduite de l'opération de réhabilitation mener. A partir d'un document de synthèse élaboré par un diagnostiquer après investigations précisant les points faibles et les points forts de la bâtisse, il peut être proposé les priorités et les options de travaux à réaliser.

Dans le cadre d'une réhabilitation, il est opportun de prévoir une mise en conformité aux conditions d'usage et de confort actuels. Sur la base de rapport de diagnostic établi, le maître d'ouvrage en connaissance de cause, pourra décider s'il y'a lieu de démolir l'édifice, ou en cas de réhabilitation de fixer les priorités et le programme des travaux à entreprendre.

Avant d'envisager toute intervention sur un ouvrage existant, il est impératif de procéder à une analyse la plus complète possible des causes des désordres relevés et de leur étendue. L'opération de diagnostic débute par une visite préliminaire qui apporte les premières observations et peut conduire à des investigations approfondies qui permettent de mieux cerner les insuffisances et désordres pour orienter la démarche dans la nature et le choix des solutions de réparation ou de renforcement à mettre en œuvre.

Pour parvenir à un diagnostic satisfaisant, il convient d'identifier la typologie de la construction concernée, les matériaux utilisés et leur agencement dans l'édifice. Dans ce but, il

Pathologie des ouvrages géotechniques

est important d'examiner et d'étudier l'historique du bâti, de consulter tous les documents d'archives disponibles (plans, photos d'époque, rapport technique etc.). Ensuite, il faut en complément préciser les caractéristiques de la construction telle que la nature des matériaux constitutifs de l'ouvrage, les dimensions, le système constructif (fondations, murs, planchers, ...). Si des améliorations de confort ou de transformations sont envisagées, il y'a lieu d'étudier la situation et les répercutions prévisible sur le bâti. Dans tous les cas, il faut considérer les travaux et les aménagements dans un cadre global qui intègre l'ensemble de la construction pour permettre de réaliser des travaux de façon cohérente.

3. Champ d'investigations :

Il est important pour le maître d'œuvre de connaître les différents types d'investigations d'une étude de diagnostic :

a) Le questionnement :

Il s'agit d'une enquête menée auprès des actuels ou anciens occupants de l'ouvrage pour noter tous les dysfonctionnements et anomalies connues de celui-ci.

b) L'observation :

C'est la première étape et l'examen le plus simple. Il est généralement accompagné d'un reportage photo et sa conclusion détermine la nécessité ou non de lancer des investigations plus poussées.

c) La prise de mesures :

Il s'agit d'examen plus poussés consistant en la mesure de la résistance et des performances de l'ouvrage.

On mesurera la stabilité de l'ouvrage, son isolation phonique et thermique, ses systèmes d'aération, les taux d'humidité des pièces et la conformité des installations électriques.

d) L'auscultation :

Lorsque celle-ci est possible et suffisante, elle permet d'éviter les sondages et autres procédés destructeurs tels les sondages et prélèvements.

Pathologie des ouvrages géotechniques

e) Le sondage :

Il s'agit de percer les zones inaccessibles et les sols de la construction pour pouvoir observer et/ou prélever des échantillons de la zone concernée.

f) Le prélèvement :

Le but est d'analyser à posteriori et en laboratoire, les éléments douteux ou d'obtenir des précisions sur la composition et la résistance de certains matériaux.

4. Etapes du diagnostic :

4.1. Avant la première visite des lieux :

4.1.1. Renseignements généraux et recherche documentaire :

Certaines informations peuvent être précieuses comme la date d'ouverture du chantier (DOC) quand les fissures arrivent durant la première année. Si l'ouverture des fouilles est réalisée en automne et que la réception a lieu en printemps, les argiles sous les fondations se sont peut-être hydratées accidentellement durant l'hiver. L'adresse de l'ouvrage sinistré peut fournir des indices et le nom de certains lieux et parfois évocateur.

4.1.2. Notice descriptive :

La lecture de la notice descriptive permet d'apprécier la nature des travaux effectués qui peuvent potentiellement être à l'origine des sinistres : déboisement, dessouchage, plateforme, raccordements, réseaux EP, drainage, remblais-talutage en terrain en pente, assainissement automne, géothermie, etc. cette identification avant la première expertise permet de convoquer les entreprises impliquées dans ces ouvrages et leurs sous-traitants et de vérifier en priorité la bonne exécution de ces travaux hors assiette des garanties.

4.1.3. Etude de sol :

L'étude de sol est encore trop souvent absente des constructions dont l'adaptation au sol est à risque. Lorsque l'étude de sol existe, la lecture préalable des facteurs de risque identifiés par le géotechnicien et des préconisations associées orientent les investigations de la première expertise.

Pathologie des ouvrages géotechniques

4.1.4. S.I.G : système d'information géographique :

Le SIG permet de gérer des données géographiques liées et des attribues arrêtés au préalable (Ex : type de structures, classification du niveau de dégradation, pathologies enregistrées à une date précise, évolution de la pathologie après une durée, interventions recommandées, intervention réalisées, ...etc.) constituant ainsi une base de données du cadre bâti existant.

Cette base de données vise :

- La mise en place d'un instrument d'identification, d'information, d'analyse, d'évaluation et de diagnostic global et cohérent du cadre bâti.
- A affiner la stratégie globale de gestion et de planification urbaine.
- La classification des ouvrages.

Ceci se fait par l'intégration de ces informations dans la base de données afin de :

- Gérer les conclusions voulues avec des thèmes représentatifs,
- Créer des cartes de présentation,
- Créer de nouvelles bases de données à travers les conclusions recommandées,
- Cartographier des données qualitatives et quantitatives,
- Analyse des résultats.

4.2. L'inspection détaillée :

Pour bien mener une étude diagnostique, cinq points doivent être examinés : la structure, le sol, l'environnement, les ouvrages annexes et les dommages.

4.2.1. Observation de la structure :

4.2.1.1. Nature des fondations et des ferrailages :

Des informations importantes sur les fondations et la nature des ferrailages sont à recueillir auprès du maçon. Quelques mots de lui permettent de juger de la rigidité de la structure, de la nature des ferrailages ou du mode de liaisonnement des armatures entre les différents ouvrages en béton armé.

4.2.1.2. Ancrage des fondations :

L'ancrage de la fondation est la distance entre le dessous de la fondation et le terrain naturel. Pour apprécier l'assise de la construction, il est nécessaire de connaître différents ancrages :

Pathologie des ouvrages géotechniques

- L'ancrage de la semelle par rapport au terrain naturel originel : selon le nombre de rangs de parpaings et la profondeur de terrassement des semelles, la construction est posée sur le terrain de surface ou sur un sol profond plus stable. La connaissance de ce point est primordiale lorsque le terrain est en pente : si la plateforme réalisée est horizontale, les fondations amont et aval sont ancrées à la même profondeur par rapport à la plateforme horizontale et sans redan, alors la fondation aval et n'est pas ancrée dans la même couche de terrain que la fondation amont ;
- L'ancrage de la semelle par rapport au terrain actuel, taluté après travaux pour apprécier la protection au RGA (Le risque RGA, ou retrait-gonflement des argiles).
- En cas de sous-sol partiel : il est nécessaire de savoir comment a été géré le report des charges à la jonction sous-sol/R+0.

4.2.1.3. Observation du sol :

Les mouvements de sol agissent sur les structures, ils mettent en évidence les défauts de conception et d'exécution des ferraillements des ouvrages en béton armé. La photographie numérique permet aux propriétaires de suivre les différentes étapes de leur construction. La consultation des photos de chantier, lors de la première expertise, est toujours riche d'enseignement (Figure 59 ,60).



Figure 59. Craquelure de dessiccation du sol argileux en fin d'été.



Figure 60. Les déblais argileux des terrassements ont été régalés sur le terrain.

4.2.3. Observation de l'environnement :

La pente du terrain évoque plusieurs facteurs de risque : ancrage des semelles de fondation dans des couches de sol de caractéristiques différentes, circulation d'eau de ruissellement de surface et d'eau profonde, circulation d'eau par la tranchée des raccordements. Cet aspect du terrain est à prendre en compte aussi bien lors de la première visite de la construction que préalablement sur la base d'une enquête documentaire (cartes ou courbes de niveaux). L'objectif est de décrire la configuration de l'environnement de la construction et plus particulièrement :

- La topographie du terrain : sens de la pente et pourcentage ;
- La végétation dans son ensemble autour de la construction.

5. Les investigations approfondies :

5.1. Mise en observation des dommages :

Prenons pour exemple un mouvement du sol qui s'est manifesté par l'apparition des fissures dans les maçonneries et leurs répliques sur les éléments d'équipements.

L'expertise va donner une photographie de l'état de la construction à un instant donné et les investigations vont tenter de retracer le film du développement du mouvement et des fissures (Figure 61).

L'ouverture des fissures est monitorée par des fissuromètres classiques en plastique ou moins courant : la mise en observation commence. Si les mouvements cessent en fin de période d'observation, un simple matage et un agrafage des fissures redonnent de la solidité à la structure.

Les hypothèses posées sur la ou les origines du mouvement doit être vérifiées par des investigations complémentaires. Lorsque le souffle des fissures correspond à celui d'une maçonnerie cassée soumise au retrait-gonflement été-hiver (entre 0 et 1mm), l'assise des fondations peut être protégée par un large trottoir ou par une géomembrane de plus 1.50m. Si les fissures évoluent de manière significative (plus de 1mm), cette évolution doit être figurée sur un graphe afin de suivre le mouvement du sol et de la structure.

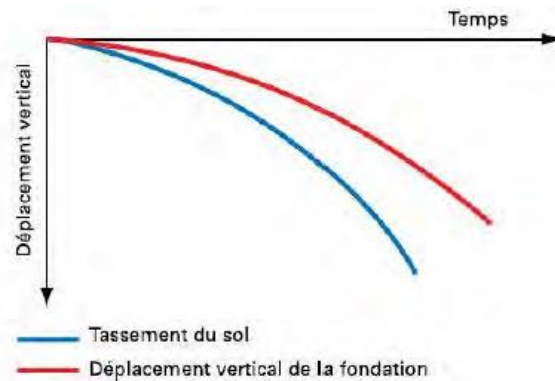


Figure 61. Evolution des fissures, évolution du sol et de la structure.

5.2. Le recours à un géomètre expert :

Le géomètre est d'une aide précieuse pour localiser les mouvements des structures horizontales et verticales. Son intervention permet de visualiser avec précision les dégâts, de limiter les travaux aux zones atteintes, etc. Ses vues en plan et celles d'élévations en couleur valent généralement mieux qu'un long discours pour justifier la localisation du mouvement.

5.3. Investigations géotechniques :

Une étude de sol permet d'établir l'influence du sol dans la genèse des dommages et de procéder à une analyse des risques selon la mission diagnostic G5 définie dans la NF P94-500. La stratégie d'implantation et de réalisation des sondages retenue doit être à même de déterminer l'épaisseur des différentes couches de terrain et leur hétérogénéité. Le géotechnicien utilise des moyens mécaniques pour mesurer les caractéristiques du sol et procède à des prélèvements de sol remanié ou intact pour des essais en laboratoire. Il existe un grand nombre d'essais in situ.

Les sondages les plus courants sont les sondages à la tarière et à la pelle mécanique, les sondages pénétrométriques et pressiométriques. Les essais doivent être réalisés en nombre suffisant sous ou à proximité immédiate de la construction en fonction du contexte géologique de la parcelle et de son environnement.

5.3.1. Sondages manuels et destructifs :

Les sondages manuels sur les fondations et les dallages donnent des indications sur l'adaptation au sol de l'infrastructure, de la semelle et du plancher bas.

Pathologie des ouvrages géotechniques

Figure 62 représente un type de sondage manuel sur une semelle de fondation pour la mesure de la profondeur d'ancrage, l'épaisseur et le centrage de la semelle, la nature du ferrailage et du libage de fondation.



Figure 62. Sondage manuel sur une semelle de fondation.



Figure 63. Affaissement de 9cm de l'isolant sous dallage et du remblai d'assise du dallage.



Figure 64. Défaut de calage du treillis soudé situé en partie basse du dallage.

5.3.2. Sondage à la tarière :

Les sondages avec une tarière de 63 mm établissent un profil du sol. L'outil peut être à main pour des forages de moins de 2 m ou être une tarière mécanique pour des profondeurs plus importantes. Ce type de forages provoque le remaniement du sol sous donne de copeaux. Seuls les essais sur sol remaniés pourront être entrepris en laboratoire (Figure 65,66).



Figure 65. Sondage à la tarière mécanique.



Figure 66. L'argile est plastique et très fine.

5.3.3. Essai pénétrométrique :

L'essai pénétrométrique dynamique (selon les normes NF P94- 114, NF P94- 155 et NF EN ISO 22476- 2), plus simple, définit les épaisseurs des couches et l'hétérogénéité du site en recoupant la résistance dynamique de l'enfoncement d'une pointe (R_d) avec l'identification de la nature des terrains traversés obtenue lors des sondages à la pelle ou à la tarière (Figure 67). Le matériel utilisé, léger, peut être portatif ou mécanique selon la profondeur des couches étudiées. Une pointe normalisée guidée par un train de tiges est enfoncée dans le sol par battage. Les résultats obtenus permettent de déterminer la résistance à la pénétration des sols. Les valeurs mesurées sont très largement influencées par la teneur en eau des terrains.



Figure 67. Sondage au pénétromètre.

5.3.4. Essai pressiométrique :

L'essai pressiométrique est réalisé selon (NF P194- 110- 1) dans un forage soigneusement calibré. Les variations de volume d'une sonde dilatable, qui exerce une pression sur les parois du forage, et celles des déformations du terrain sont enregistrées (Figure 68). L'essai proprement dit donne lieu à l'exécution de plusieurs paliers de mesures espacés de 1 à 1,50m. Les caractéristiques mécaniques essentielles du terrain, le module de déformation E (module pressiométrique) et la pression limite de rupture (p_l) sont calculées à partir des diagrammes de chargement obtenu à chaque niveau.

Pathologie des ouvrages géotechniques

Cet essai est indispensable pour déterminer le frottement latéral q_s en vue du dimensionnement des micropieux à une profondeur de reconnaissance supérieure de 5m à la profondeur estimée de ceux-ci.



Figure 68. Essai pressiométrique.

5.3.5. Essais sondages à la pelle mécanique :

Les essais à la pelle mécanique sont trop peu souvent employés en expertise. Pourtant, l'ouverture des fouilles permet de confirmer les résultats des autres essais de sol et d'affiner les informations sur l'agencement des différentes couches géologiques (à partir du sol en place remanié) et sur l'épaisseur et l'hétérogénéité des strates. Ces sondages permettent aussi de prélever les matériaux intacts (norme NF EN ISO 22 475- 1) et noter la présence des venues d'eaux (Figure 69,70), observations impossibles avec le sondage à la tarière.



Figure 69. Veine d'eau découverte en amont de la construction à l'origine du mouvement différentiel.



Figure 70. Arrivée d'eau par la tranchée des raccordements.

5.3.6. Essais en laboratoire :

Les essais en laboratoire ont deux objectifs : déterminer si les sols sont sensibles au retrait-gonflement et quantifier l'effet d'une variation de la teneur en eau sur les déformations de l'échantillon. L'identification des sols concerne les grandeurs physiques des matériaux en donnant la masse volumique (NF P94- 050), l'indice des vides, le degré de saturation, la minéralogie des argiles.

Pour présenter la courbe granulométrique du sol, il faut établir les dimensions des différentes particules qui le composent et la proportion de fines, à l'aide de deux techniques : le tamisage (NF P94-056) pour les particules de dimensions supérieures à 80... et la sédimentométrie (NF P94-057) pour les particules inférieures à 2... la réaction aux variations hydriques de la partie fine conditionne la consistance de l'argile, qu'elle soit liquide, plastique, solide avec retrait ou solide sans retrait. Les limites d'Atterberg sont les limites conventionnelles des changements en ces différents états pour classer les sols suivants un diagramme de plasticité.

6. Diagnostic final :

Les causes des sinistres sont toujours les mêmes : le tassement ou le mouvement différentiel. De ce fait, une partie de la construction bouge alors que l'autre reste stable. Dans le cadre de la démarche diagnostique, l'erreur la plus courante consiste à se limiter au seul constat du mouvement de la construction (les fissures) sans en rechercher leurs origines. Or, un diagnostic ne peut être posé sans investigations poussées qui vont permettre de confirmer ou d'infirmer les premières observations visuelles.

6.1. Facteurs de prédisposition et facteurs déclenchant-incidents :

Le terme de « facteur aggravant », souvent rencontré dans les rapports d'expertise, cible un peu vite la « présence d'argile sous les fondations », à l'origine des fissures, elle-même aggravée par des venues d'eau accidentelles ou la succion des racines des arbres. Il apparaît donc important de préciser le sens des termes employés, donc de distinguer les facteurs de prédisposition des facteurs de déclenchement de la variation de la teneur en eau.

6.1.1. Facteurs de prédisposition :

Les facteurs de prédisposition sont ceux liés à la nature intrinsèque du sol comme :

- Les couches de sols contenant une fraction argileuse importante dont le volume de la structure minéralogique en feuillet varie en fonction de sa teneur en eau ;

Pathologie des ouvrages géotechniques

- Les plateformes en déblais-remblais ;
- Les sols hétérogènes (graves d'un côté, argiles d'un autre) ;
- Les sols remaniés par un dessouchage et/ou un débroussaillage avec des engins mécanique puissants ;
- La stratification des différentes couches de sol préjudiciable à une assise des fondations aval et amont dans un terrain homogène ;
- La présence d'une nappe phréatique, dont les variations de niveau auront une incidence sur les pressions interstitielles. Une baisse du niveau entraîne une augmentation de contraintes effectives dans le sol et le possible tassement des sols de surface ;
- L'existence de circulation d'eaux souterraines temporaires à faible profondeur. L'infrastructure de la construction fait alors barrage à ces circulations d'eau naturelles avec des terrains en pente ;

Les fragilités de la structure sont des facteurs de prédisposition révélés lors d'un mouvement différentiel, du fait :

- D'un défaut d'assemblage des éléments en béton armé de renfort de maçonneries ;
- D'un excentrement de fondation suite à un défaut d'implantation ;
- De la géométrie générale de la construction induisant des charges et des niveaux d'assise différentiels (sous-sol partiel, construction avec un étage partiel et des ailes en rez-de-chaussée, par exemple) ;
- D'un défaut de compactage de la forme sous dallage.

Les facteurs de prédisposition induisent les risques mais ne suffisent pas à les déclencher.

6.1.2. Facteurs de déclenchement :

Les facteurs de déclenchement ont une incidence sur les variations de teneur en eau des sols, mais n'ont d'effet que si le sol est intrinsèquement prédisposé. Des conditions climatiques exceptionnelles, avec une période sèche très marquée apparaissant après une période humide très arrosée, sont révélatrices de ces prédispositions.

Les facteurs déclenchants peuvent être anthropiques, par exemples :

- La construction d'une infrastructure : elle fait écran aux circulations d'eau naturelle à faible profondeur ;
- Les aménagements extérieure (trottoirs, terrasse, voiries, drainage, etc.) : ils perturbent les écoulements superficiels des eaux météoriques ;

Pathologie des ouvrages géotechniques

- Le talutage des terres : il ramène les eaux de ruissellement vers la construction ;
- Les pompages dans la nappe à proximité d'une construction : ils perturbent localement l'équilibre statique des terrains en place ;
- La fuite d'un regard d'eaux pluviales, le raccordement intempestif d'un drain sur un regard de pied de chute des eaux de toiture, les fourneaux de raccordement aux réseaux des concessionnaires, voire une rupture de canalisation : ils provoquent des hydratations accidentelles des argiles sensibles (même faiblement), donc le gonflement des sols d'assise. Des quantités d'eaux importantes et localisées peuvent entraîner les fines d'un sol grenu et la liquéfaction des sols argileux avec perte de portance et, tôt ou tard, un mouvement différentiel ;
- La succion des racines et des radicelles d'une végétation : elle provoque l'assèchement et la dessiccation rapide et localisée des terrains argileux sensibles aux RGA.

Pour déterminer si les facteurs sont déclenchants ou aggravant, il faut, par exemple, avoir au préalable supprimé la succion des racines ou repris l'étanchéité du regard : les facteurs sont déclenchants si l'évolution des dommages a cessé.

6.2. Indices :

Les éléments complémentaires suivants, qui peuvent être des sous-diagnostics, contribuent à établir le bon diagnostic final :

- Des informations liées aux conditions de chantier recueillis auprès du maître d'ouvrage et du maçon ;
- Le diagnostic de bon sens du sol, associé à une étude de sol G5 si le besoin s'en fait sentir ;
- Le diagnostic de la structure et de son aptitude à supporter les sollicitations liées aux mouvements des sols ;
- L'influence des travaux annexes et de l'environnement sur la stabilité de la construction ;
- Les « aveux » des fissures intérieures et extérieures qui vont en dire long sur la forme du mouvement de la structure pour répondre à celui du sol ;
- Le délai d'une mise en observation pour se donner le temps de poser un bon diagnostic.

6.3. Analyse des risques identifiés :

Avec ou sans investigations approfondies, le produit de sortie du diagnostic est une analyse des risques sol-structure-environnement basée sur la liste des facteurs de risques naturels et anthropiques, eux-mêmes regroupés en facteurs de prédisposition et de déclenchement du tassement ou de la variation de teneur en eau.

Pathologie des ouvrages géotechniques

Il convient de savoir si le sinistre entre dans les garanties du contrat et s'il est futur et certain.

7. Méthodes d'auscultation des fondations :

Avant d'entreprendre l'investigation, on établit un inventaire des équipements disponibles devant servir aux essais, aussi bien pour des tests non-destructifs que pour les essais avec prélèvement. Les types des tests à effectuer et l'étendue de l'investigation (qui peut être localisée à certaines zones spécifiques ou peut concerner l'ensemble de la structure) doivent être correctement détaillée. Les limites et la portée des tests doivent être bien comprises. Les essais couramment effectués sur les bâtiments dans le cadre d'un diagnostic technique sont regroupés selon le plan établi dans les paragraphes suivants.

7.1. Les essais non destructifs :

Le matériau est testé sans causer d'endommagement à la structure. Les essais non-destructifs sont classés suivant leur degré de sophistication, allant du plus simple qui consiste à donner quelques coups de marteau à la surface d'un élément de structure, aux techniques basées sur les signaux ultrasoniques traversant le matériau ; les analyses de ces tests sont effectuées pour la plupart à l'aide d'instruments idoines. Il faut rappeler que ces tests sont normalisés.

7.2. Les essais destructifs :

La structure est testée jusqu'à un certain niveau de rupture pour permettre de recueillir des informations sensées être utilisables sur des bâtiments similaires. Les essais de chargement destructifs sont spécifiques et font l'objet d'un cahier de charge.

7.3. Moyens d'auscultation des fondations :

Selon la norme Règlementation pour les fouilles (1980), on a :

Ouverture de fouilles :

a) Objectif :

Détermination de la géométrie d'une fondation superficielle : épaisseur, profondeur, dimensions. Vérification de la présence d'une fondation profonde et détermination des dimensions de la section des éléments. Pour les fondations anciennes d'ouvrages en maçonnerie, détermination du type et de l'état de la fondation. Examen de la constitution interne d'un soutènement. Observation du sol, accompagné éventuellement de prélèvements d'échantillons.

Pathologie des ouvrages géotechniques

a) Principe :

Excavation contigüe à l'ouvrage à des emplacements sélectionnés. L'excavation pourra être menée par des moyens mécanisés à distance de l'ouvrage mais devra être manuelle à proximité de l'ouvrage. La dimension minimale d'une telle fouille est de 1m pour permettre l'excavation manuelle et l'observation. Il est nécessaire de prendre des précautions pour ne pas compromettre la stabilité de l'ouvrage : pas de déchaussement des fondations, limiter la longueur de fouille ouverte simultanément (travail par plots successifs). Toutes les dispositions doivent être prises pour assurer la sécurité des intervenants et du public.

b) Domaine d'application :

Dans le cadre d'un programme de reconnaissance de divers types ou parties d'ouvrages : soutènements, fondations, buses, ponts, barrages, écluses, etc. Notamment en l'absence de plans. Également utile pour la reconnaissance interne des ouvrages en maçonnerie.

Carottage de pieu :

Selon la norme XP P 94-202, on a :

a) Objectif :

- Prélèvement du matériau constitutif du pieu pour essais en laboratoire,
- Détermination de la longueur du pieu,
- Observation du contact pieu/sol en pointe,
- Création d'une réservation dans le pieu pour mettre en œuvre des méthodes d'auscultation non destructives.

b) Principe :

Prélèvement d'une carotte du matériau constitutif du pieu. Ce carottage est réalisé soit sur quelques dizaines de centimètres à la base du pieu en utilisant un tube de réservation traversant le pieu et prévu à l'origine, soit sur toute la longueur du pieu.

c) Domaine d'application :

Cette méthode s'applique à l'auscultation d'un élément de fondation vertical (pieu, barrette, etc.) En béton armé ou non, ou en mélange de sol et ciment. Cet élément de fondation doit être accessible en tête. Le carottage peut éventuellement se pratiquer à travers une semelle ou une longrine, à condition de repérer les aciers de la semelle ou de la longrine et de repérer également la position des pieux. La méthode peut être appliquée pour des pieux en site aquatique en utilisant une carotteuse positionnée sur un ponton. La méthode peut être associée à une méthode

Pathologie des ouvrages géotechniques

de forage par broyage du béton (drill) si, par exemple, l'objectif est de prélever une carotte en pointe de pieu.

Auscultation d'un pieu par impédance:

Selon la norme NF P94-160-4 (Mars 1994), on a :

a)Objectif :

Localisation et détermination de la nature des défauts de structure des pieux de fondation profonde, et détermination de leur longueur.

b)Principe :

L'examen d'auscultation par impédance consiste à transmettre à la partie supérieure de la fondation, un choc mécanique à l'aide d'un marteau instrumenté. Ce choc donne naissance au droit des discontinuités géométriques et mécaniques et des interfaces pieu-sol à une onde transmise et à une onde réfléchi. On mesure au moyen d'un accéléromètre placé également en tête de pieu, le signal des ondes qui se sont réfléchies. La méthode associe la mesure de force (donnée par le marteau) à un traitement mathématique du signal obtenu par réflexion, et on étudie l'évolution de l'admittance en fonction de la fréquence afin de mesurer l'impédance caractéristique.

c)Domaine d'application :

L'auscultation par impédance s'applique à des éléments de fondation profonde en béton armé d'élanement compris entre 10 et 30 et de largeur inférieure à un mètre (de type pieu de bâtiment et d'ouvrage d'art courant). La méthode ne peut pas s'appliquer pour les parois moulées et pour les barrettes.

Auscultation d'un élément de fondation par transparence :

Selon la norme NF P 94-160-1 (2000), on a :

a)Objectif :

Cette méthode permet de suivre les variations de qualité du béton et de localiser précisément les défauts détectés sur toute la hauteur d'éléments de fondations profondes existantes, à condition d'avoir préalablement réalisé des forages parallèles dans la fondation à ausculter.

b)Principe :

Pathologie des ouvrages géotechniques

Cette méthode, qui est le plus souvent appliquée lors du contrôle de construction de fondations (à condition qu'elles aient été pré-équipées de tubes de réservation), consiste à mesurer le temps de propagation des ondes ultra sonores longitudinales entre deux (ou plusieurs) forages réalisés à l'intérieur de l'élément de fondation. Deux sondes sont disposées à un même niveau dans les forages qui doivent être remplis d'eau, l'une comme émettrice d'une onde ultra sonore, l'autre comme réceptrice. Il s'agit de mesurer de façon continue, au niveau du récepteur, le temps de propagation de l'onde dans le béton et la variation de l'amplitude du signal acoustique reçu. Une chaîne de mesure détermine ces valeurs sur toute la hauteur auscultée. Une variante de la mesure consiste à fixer une sonde à une profondeur donnée et à déplacer verticalement l'autre sonde de façon à obtenir des informations plus spatiales.

c) Domaine d'application :

L'auscultation sonore s'applique à l'auscultation de tous les types d'éléments de fondation en béton à partir du moment où l'on peut réaliser les forages nécessaires à l'accueil des sondes d'auscultation (pieux en béton, puits et barrettes, parois moulées, ainsi que les massifs en béton). L'auscultation d'un élément de fondation par la méthode sonore permet, entre les points d'émission d'une impulsion et de réception d'un signal, de détecter des singularités localisées et d'apprécier l'homogénéité du béton.

Auscultation d'un élément de fondation profonde par méthode sismique parallèle :

Selon la norme NF P 94 160-3 (mai 1993), on a :

a) Objectif :

Détermination de la longueur d'un élément de fondation profonde.

b) Principe :

Après réalisation d'un forage parallèle à l'élément à ausculter, le principe consiste à émettre une onde sismique en tête du pieu ou sur un élément solidaire du pieu, puis à mesurer à l'aide d'un capteur sismique que l'on déplace dans ce forage les temps de parcours de l'onde pour différentes positions du capteur.

c) Domaine d'application :

Cette méthode s'applique à l'auscultation d'un élément de fondation vertical : micro pieu, pieu battu, pieu foré, puits, barrette, paroi moulée ou palplanche. Cet élément de fondation doit

Pathologie des ouvrages géotechniques

être accessible en tête, éventuellement à travers une semelle ou une longrine. La méthode est particulièrement bien adaptée au cas des éléments situés en totalité dans des sols meubles et homogènes.

Auscultation d'un élément métallique de fondation par réflexion :

Selon la fiche C6-7-Guide_Auscultation_Ouvrage_Art-Cahier_Interactif_Ifsttar, on a :

a) Objectif :

Expertise des éléments métalliques utilisés en fondations ou en soutènements. Détermination de la hauteur de fiche d'un pieu métallique, d'un palpieu ou d'un élément constituant un rideau de palplanches métalliques.

b) Principe :

L'auscultation par réflexion repose sur la génération d'une onde mécanique en tête de l'élément métallique, réalisée en provoquant un choc à l'aide d'un marteau permettant d'obtenir un régime vibratoire compatible avec l'élément ausculté. L'onde mécanique se réfléchit au droit des discontinuités mécaniques (rupture de cordon de soudure, déchirure) et en pointe de l'élément métallique ; elle permet également de révéler des variations de frottement latéral. Un accéléromètre, placé en tête de l'élément contrôlé, capte les réflexions des ondes mécaniques. Le traitement du signal est effectué dans le domaine temporel ou fréquentiel, il repose sur l'analyse de l'évolution de la vitesse particulière de l'onde réfléchie. La localisation altimétrique de discontinuités mécaniques éventuelles bien franches (par exemple la rupture d'un cordon de soudure bout à bout) et la fiche de l'élément sont estimées en fonction de la vitesse particulière de l'acier comprise entre 5 000 et 5 200 m/s.

c) Domaine d'application :

L'auscultation par réflexion s'applique à des éléments métalliques et rideaux de palplanches dont la tête est accessible (non coiffée ou libérée de la poutre de couronnement). La méthode est applicable à tout type de profilé. La profondeur d'exploration est fonction de l'énergie du choc et du type de sol rencontré ; la méthode permet d'ausculter la plupart des éléments rencontrés de longueur comprise entre 10 et 30 mètres.

Auscultation d'un pieu par réflexion des ondes :

Selon la norme NF P94-160-2 (Novembre 1993), on a :

Pathologie des ouvrages géotechniques

a) Objectif :

Détermination de la nature et de la localisation des défauts de structures des pieux de fondation profonde.

b) Principe :

L'examen d'auscultation par réflexion des ondes consiste à transmettre à la partie supérieure de la fondation, un choc mécanique à l'aide d'un marteau. Ce choc donne naissance au droit des discontinuités géométriques et mécaniques et des interfaces pieu-sol à une onde transmise et à une onde réfléchi. On mesure au moyen d'un capteur (en général un accéléromètre) placé également en tête de pieu, la vitesse des ondes qui se sont réfléchies en fonction de la profondeur de la fondation. L'analyse du graphe enregistré sur une tablette PC, permet de déterminer la longueur d'une fondation, de détecter les défauts (bulbes, strictions, fracturations, hétérogénéités, etc.) Et d'en déterminer les profondeurs.

c) Domaine d'application :

L'auscultation par réflexion des ondes s'applique aux éléments de fondation profonde en béton armé d'élanement compris entre 10 et 30 et de largeur inférieure à un mètre (de type pieu de bâtiment et d'ouvrage d'art courant). La méthode ne peut pas s'appliquer pour les parois moulées et pour les barrettes.

Diagraphie nucléaire à radioactivité provoquée en forage :

a) Objectif :

Mesure de la densité du milieu ausculté ou de sa teneur en eau en profondeur le long d'un tube scellé dans le sol ou dans un élément de fondation (en béton ou en maçonnerie) en vue de détecter des anomalies (qualitatif) ou d'obtenir des mesures de ces deux paramètres (quantitatif).

b) Principe :

Après réalisation d'un forage dans lequel on place un tubage (PVC ou métallique), le principe consiste à mesurer in situ, sur toute la profondeur du forage, la densité ou la teneur en eau des matériaux environnant le forage dans un rayon de quelques décimètres.

Pathologie des ouvrages géotechniques

La mesure se fait à différentes profondeurs à l'aide d'une sonde à radioélément que l'on déplace dans le forage. Le principe de mesure utilise l'effet de la rétrodiffusion du rayonnement sur les matériaux ; il existe deux types de sondes :

- La sonde gamma gamma, qui utilise le phénomène de diffusion Compton des rayonnements gamma par la matière. Le principe consiste à envoyer un flux de photons gamma émis par une source radioactive et à mesurer le flux de photons rétrodiffusés par le matériau environnant ; le flux reçu dépend de la densité du matériau environnant ;
- La sonde neutron neutron, qui utilise le phénomène de ralentissement des photons rapides par les noyaux du matériau environnant, et notamment ceux de l'hydrogène. Le principe consiste à envoyer des neutrons rapides émis par un radioélément à l'extrémité de la sonde et à compter les neutrons thermiques réémis par le matériau à l'aide de deux détecteurs ; le flux reçu dépend de la teneur en eau du matériau. Les flux, mesurés par des comptages de neutrons ou de photons, fournissent des contrastes de densité ou de teneur en eau, ce qui correspond à une vision qualitative.

Un résultat quantitatif peut être obtenu par étalonnage en laboratoire sur des matériaux de teneur en eau et de densité parfaitement connus.

c) Domaine d'application :

Cette technique permet d'avoir une connaissance en profondeur des caractéristiques en place de masse volumique et de teneur en eau, et d'en suivre leur évolution. Elle s'applique traditionnellement à un sol ou à une fondation.

Inclinomètre en forage :

Selon la norme NF P94 -156 (Octobre 1995), on a :

a) Objectif :

Mesure de déplacements horizontaux en profondeur le long d'un tube scellé dans le sol ou dans un élément de fondation profonde.

b) Principe :

Après réalisation d'un forage dans lequel on scelle un tube spécifique, le principe consiste à déterminer sur toute sa longueur la position déformée du tube qui est liée aux déplacements horizontaux du sol ou de la fondation qui l'environne. Cette déformée est obtenue en mesurant

Pathologie des ouvrages géotechniques

à l'aide d'une sonde (que l'on déplace dans ce forage à partir de la base) les angles d'inclinaison du tube par rapport à la verticale pour différentes positions de la sonde. Cette méthode de mesure nécessite d'avoir un point fixe qui est généralement la base du forage. La sonde circule dans le tube axialement mais est bloquée latéralement par un système de ressorts. Elle comprend deux accéléromètres verticaux disposés perpendiculairement l'un par rapport à l'autre. Elle doit être étanche à l'eau et insensible aux pressions d'eau existant dans le forage. Pour éliminer les erreurs, on réalise deux mesures successives en effectuant un premier aller-retour de la sonde dans son tube avec une orientation fixée, puis en la tournant de 90° autour de son axe pour un second aller-retour. Les mesures sont réalisées à des profondeurs fixées qui sont généralement tous les 50 cm.

c) Domaine d'application :

Permet de détecter l'évolution des déplacements horizontaux, des glissements ou basculements d'une structure ou d'un terrain en place.

Mesure par extensomètre en forage :

Selon la norme Pr NF EN ISO 18674-2, on a :

a) Objectif :

Mesure de déplacements verticaux en profondeur le long d'un tube scellé dans le sol ou dans un élément de fondation profonde.

b) Principe :

Après réalisation d'un forage dans lequel on scelle un tubage télescopique comprenant des bagues de couplage métalliques d'un espacement connu, le principe consiste à déterminer la position relative de ces bagues qui est liée aux déplacements verticaux du sol ou de la fondation qui l'environne. Les variations de déformations verticales sont obtenues en déplaçant dans ce forage à partir de la base supposée fixe une sonde qui mesure la distance exacte entre 2 bagues successives. Les dispositifs sont en grande majorité magnétiques avec des bagues scellées lors du forage et l'utilisation d'une sonde magnétique. Les dispositifs mécaniques avec une connexion physique sont peu répandus. La sonde circule dans le tube axialement. Elle comprend deux capteurs de déplacement espacés de la même distance que celle existant initialement entre les bagues. Les bagues de couplage et les capteurs de déplacement forment

Pathologie des ouvrages géotechniques

des circuits inductifs oscillants. La sonde transmet des signaux en fréquence proportionnels à la distance relative entre deux bagues.

c) Domaine d'application :

Cette technique permet d'avoir une connaissance de l'évolution du profil de tassement en profondeur. Elle s'applique traditionnellement à un sol ou à une fondation, mais peut être appliquée dans des structures aériennes comme des barrages, des bajoyers d'écluse ou des pylônes, etc. Elle peut également s'appliquer dans des directions non verticales.

Mesure de niveau d'eau par piézométrie en forage :

Selon la norme NF P 94-157-1, on a :

a) Objectif :

Mesure du niveau de la surface libre d'une nappe en profondeur ou de la pression d'une nappe captive.

b) Principe :

Après réalisation d'un forage, on descend dans celui-ci un tube piézométrique crépine sur une longueur minimale de 2 m et bouché à sa partie inférieure. L'espace annulaire compris entre le tube et la paroi du forage est comblé avec un matériau filtre sable). Dans le cas où la nappe est captive (en charge), la réalisation d'un bouchon étanche s'impose autour du tube piézométrique au niveau des couches imperméables traversées. La mesure ponctuelle de la profondeur d'eau se fait au moyen d'une sonde équipée d'une électrode que l'on descend axialement dans le tube ; lorsque l'électrode entre en contact avec l'eau elle s'allume et donne ainsi la position de la surface de la nappe. Dans le cas d'une nappe captive, la valeur de la remontée d'eau donne une mesure indirecte de la pression d'eau existant dans la nappe. Il existe également des capteurs de pression qui peuvent permettre une acquisition en continu des niveaux d'eau en forage.

c) Domaine d'application :

Permet de connaître la profondeur du niveau de la nappe phréatique dans les sols au voisinage de l'ouvrage, mais aussi dans les barrages en terre, digues, etc. Permet de détecter

Pathologie des ouvrages géotechniques

des fuites à proximité d'ouvrages hydrauliques (écluses, digues, canaux, etc.) A condition de placer un nombre suffisant de forages.

Technique radar :

a) Objectif :

Localisation de vides (karsts ou caves) de taille métrique à pluri-métrique, ou de discontinuités (fractures, etc.) Dans les sols et les roches.

b) Principe :

Émission d'impulsions électromagnétiques qui se réfléchissent partiellement sur des interfaces ou des hétérogénéités présentant des contrastes électromagnétiques avec le sol. Les échos sont enregistrés sous forme de traces temporelles.

c) Domaine d'application :

Géophysique de sub-surface sur les 10 à 40 premiers mètres.

Tomographie sismique en forage Cote:

a) Objectif :

Détermination de la géométrie d'un élément de fondation profonde.

b) Principe :

Après réalisation de 2 forages (au minimum) de part et d'autre de l'élément à ausculter et plus profonds que l'élément de fondation, le principe consiste à émettre une onde sismique dans un des forages à différentes profondeurs et à mesurer le temps de parcours dans l'autre forage par des capteurs placés à différentes profondeurs.

Les variations du temps de parcours des ondes traversant l'élément de fondation permettent, à partir de la connaissance de la vitesse sismique dans le sol et le matériau du pieu, d'évaluer la géométrie de l'élément de fondation profonde.

c) Domaine d'application :

Pathologie des ouvrages géotechniques

Cette méthode s'applique à l'auscultation d'un élément de fondation profonde isolé : pieu, puits, barrette, paroi moulée ou palplanche. La méthode est particulièrement bien adaptée au cas des éléments situés en totalité dans des sols meubles et homogènes. Elle peut aussi servir à vérifier la qualité des travaux de renforcement de sols (par exemple par jet-grouting). L'objectif est de prélever une carotte en pointe de pieux.

Tomographie radar entre forages :

a) Objectif :

Localisation de vides (karsts ou cavités), ou de fractures dans les sols entre deux forages.

b) Principe :

Émission d'impulsions électromagnétiques qui se réfléchissent partiellement sur des hétérogénéités présentant des contrastes électromagnétiques avec le béton. Les échos sont enregistrés sous forme de traces temporelles.

c) Domaine d'application :

Géophysique de sub-surface sur les 10 – 40 premiers mètres.

CONCLUSION GENERALE :

Les ouvrages en géotechniques sont nécessaires au bon fonctionnement de notre société, ils doivent être capables de reprendre les efforts qui leur sont appliqués tout au long de leur vie, il devient nécessaire de s'assurer de leur bon état, et dans le cas échéant, de leur réparation. En effet, les ouvrages subissent des altérations dues au temps mais aussi à l'environnement auquel ils sont exposés.

A travers ce cours, nous avons mis l'accent sur l'importance du diagnostic dans l'opération de réhabilitation des ouvrages. On a cité les désordres des ouvrages géotechniques, sont relativement rares en raison des coefficients de sécurité à appliquer, tant sur les capacités du sol, que sur celles des matériaux (béton, acier), ils ont en revanche parfois des conséquences financières très lourdes.

Nous avons également présenté les différents moyens disponibles pour réaliser un bon diagnostic. Le diagnostic est considéré comme l'étape clé permettant la détermination des types de pathologies dont peut souffrir un ouvrage et leur ampleur. Cette étape va permettre de mettre en œuvre les méthodes de réparation et de protection les plus adaptées. Nous pouvons conclure que le diagnostic est un outil d'aide à la décision au maître d'ouvrage pour la durabilité de son ouvrage.

REFERNCES BIBLIOGRAPHIQUES :

Absi, E. (1993, September). PATHOLOGIE DES FONDATIONS ET DES OUVRAGES EN TERRE. In Annales de l'Institut Technique du Batiment et des Travaux Publics (No. 516 (SF220)).

AUSCULTATION D'UN ELEMENT DE FONDATION – PARTIE 5 : Méthode par diffusion nucléaire à rayonnement gamma.

Balay, J. (1988). MECANIQUE DES SOLS-PAROIS MOULEES-ANCRAGES. TECHNIQUES DE L'INGENIEUR-CONSTRUCTION, 100(C-252).

Bouafia, A. (2000). MECANIQUE DES SOLS APPLIQUEE: PROBLEMES RESOLUS. Office des publications universitaires.

Cassan, M, (2005). LES ESSAIS DE PERMEABILITE SUR SITE DANS LA RECONNAISSANCE DES SOLS, Presses de l'école nationale des Ponts et Chaussées.

CIMENTS PORTLAND RESISTANT AUX EAUX SELENITEUSES. Autor(en):. [s.n.]. Objekttyp: Article. Zeitschrift: Bulletin du ciment. Band (Jahr): 26-27 (1958-1959).

[CGS1 92]. Centre National de Recherche Appliquée en Génie Parasismique, "RECOMMANDATIONS TECHNIQUES POUR LA REPARATION ET LE RENFORCEMENT DES OUVRAGES", premier semestre 1992.

[CGS2 92]. Centre National de Recherche Appliquée en Génie Parasismique," CATALOGUE DES METHODES DE REPARATION ET DE RENFORCEMENT DES OUVRAGES", Deuxième semestre 1992.

Coignet J. LA MAISON ANCIENNE: CONSTRUCTION, DIAGNOSTIC, INTERVENTIONS. Paris: Eyrolles. (2006), p 71.

Costet, J., Sanglerat, G., Biarez, J., & Lebel, P. (1969). COURS PRATIQUE DE MECANIQUE DES SOLS. Dunod.

Costet, J., Sanglerat, G., Lyon, E. C. (1988). COURS PRATIQUE DE MECANIQUE DES SOLS. II. CALCUL DES OUVRAGES.

Cote P., Lagabrielle R. (1986) – LA TOMOGRAPHIE SISMIQUE COMME METHODE DE RECONNAISSANCE DETAILLEE DU SOUS-SOL – EXEMPLE D'APPLICATION AU CONTROLE DES INJECTIONS. – Revue Française de Géotechnique, N°36 , , pp 47-53.

Das, B. M. (2011). PRINCIPLES OF FOUNDATION ENGINEERING, Cengage Learning. Cengage Learning.

Delefosse, J. (2019). PATHOLOGIES DES FONDATIONS Article Techniques de l'ingénieur-construction C 7301.

Pathologie des ouvrages géotechniques

Duquoc, B. (2006). ENTRETENIR SA MAISON EN 10 LEÇONS «CHANTIERS PRATIQUES». Paris: Eyrolles, p 8.

Ejjaaouani, H. (2008). INTERACTIONS DES FONDATIONS ET DES SOLS GONFLANTS: PATHOLOGIE, CALCULS ET ETUDES EXPERIMENTALES. THESE DE DOCTORAT DE L'ENPC, SPECIALITE: GEOTECHNIQUE.

Ferber V., Delfaut A. (2000) – APPLICATION DES SONDES DE DIAGRAPHIES NUCLEAIRES DANS LE DOMAINE DU CONTROLE DES FONDATIONS PROFONDES ET DES COMBLEMENTS DE CAVITES SOUTERRAINES. – Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées n°228. Septembre-Octobre 2000.

Fredet, J., Laurent, J. C. (2018). GUIDE DU DIAGNOSTIC DES STRUCTURES DANS LES BATIMENTS D'HABITATION ANCIENS: OUVRAGES TYPES, CAPACITE STRUCTURALE, PATHOLOGIES (P. 1). Éditions Le Moniteur.

FONDATIONS DE PONTS EN SITE AQUATIQUE EN ETAT PRECAIRE : GUIDE POUR LA SURVEILLANCE ET LE CONFORTEMENT. – Direction des Routes et de la Circulation Routière, Guide technique LCPC-SETRA, Décembre 1980, 167p.

Gigan, J. P. (1986). APPLICATIONS DU CLOUAGE EN SOUTENEMENT–PARAMETRES DE CONCEPTION ET DE DIMENSIONNEMENT DES OUVRAGES. Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 143, 51-64.

Godart, B., Le Roux, A. (1995). ALCALI-REACTION DANS LE BETON: MECANISME, PATHOLOGIE ET PREVENTION. Article Techniques de l'ingénieur, C, 2, 252.

Grisoni J.-C., Mino T., Thorin R., Unvois J.-P. – LES DIAGRAPHIES NUCLEAIRES DEVELOPPEES DANS LES LPC. APPLICATION AUX ETUDES DE SITES ET AU SUIVI DU COMPORTEMENT D'OUVRAGES DIFFICILES. – Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées n°168 - Juill-Août 1990.

Hubert, B., Philliponat, B., Payant, O., Zerhouni, M. (2019). FONDATIONS ET OUVRAGES EN TERRE. Manuel professionnel de géotechnique du BTP, Editions Eyrolles.

Lagabrielle, R. (2007) – DIAGRAPHIES ET GEOPHYSIQUE DE FORAGE. Techniques de l'Ingénieur, Référence C225, Chapitre 7, mai 2007.

Légrand, J., Millan, A., Renault, J. (1993). REGLES TECHNIQUES DE CONCEPTION ET DE CALCUL DES FONDATIONS DES OUVRAGES DE GENIE CIVIL. Cahier des clauses techniques générales applicables aux marchés publics de travaux, Fascicule No.

Logeais, L. (1971). PATHOLOGIE DES MURS DE SOUTENEMENT. ANN. ITBTP-SERIE GROS OEUVRE (10), (285).

Madiou, H., Lechani, M., Hannachi, N. (1997). PATHOLEX-AN EXPERT SYSTEM FOR A PATHOLOGY IN THE CONSTRUCTION: CASE OF DROUGHT. Journal of Structural Control, 4(2), 79-85.

Philliponat, G. (1979). FONDATIONS ET OUVRAGES EN TERRE.

Pathologie des ouvrages géotechniques

Philipponnat, G., Hubert, B. (2016). FONDATIONS ET OUVRAGES EN TERRE. Eyrolles.

Rogers, J. D., Chung, J. W. (2016). APPLYING TERZAGHI'S METHOD OF SLOPE CHARACTERIZATION TO THE RECOGNITION OF HOLOCENE LAND SLIPPAGE. *Geomorphology*, 265, 24-44.

SimonnoT, T., Juillié, Y. (2015). MURS ET ECRANS DE SOUTÈNEMENT.

Schlosser, F. (1975). OUVRAGE DE SOUTÈNEMENT-POUSSEE ET BUTEE. *Techniques de l'ingénieur-construction*, 100(C-242).

Schlosser, F. (1995). MURS DE SOUTÈNEMENT. Ed. Techniques Ingénieur.

Schlosser, F., Jacobsen, H. M., Juran, I. (1984). LE RENFORCEMENT DES SOLS. *Revue française de géotechnique*, (29), 7-33.

Thorin R., Grisoni J.-C., Unvois J.-P., Mino T. – LES DIAGRAPHIES NUCLEAIRES DEVELOPPEES PAR LES LPC. APPLICATION AUX ETUDES DE SITES SENSIBLES : CAS DES VERSANTS GYPSEUX. – *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées n°165* - Janv-Fév 1990

Norme :

NF P94-160-4 (Mars 1994) – SOLS : RECONNAISSANCE ET ESSAIS – AUSCULTATION D'UN ELEMENT DE FONDATION – PARTIE 4 : METHODE PAR IMPEDANCE. « Contrôle de l'intégrité des éléments de fondations profondes de structures de génie civil et de bâtiments – pieux forés, barrettes et parois moulées – méthodes d'auscultation » – Guide technique LCPC, avril 2006.

NF P 94-160-1 (2000) : SOLS : RECONNAISSANCE ET ESSAIS – AUSCULTATION D'UN ELEMENT DE FONDATION – PARTIE 1 : METHODE PAR TRANSPARENCE.

« CONTROLE DE L'INTEGRITE DES ELEMENTS DE FONDATIONS PROFONDES DE STRUCTURES DE GENIE CIVIL ET DE BATIMENTS : METHODES D'AUSCULTATION. » – Techniques et méthodes des laboratoires des ponts et chaussées, Guide technique, LCPC, janvier 2006, 50p. AVSP 2000 : Système d'auscultation des éléments de fondations profondes en béton. Matériel LPC, LCPC (<http://media.lcpc.fr/ext/pdf/prod/mlpc/avsp.pdf>).

NF P94 -156 (Octobre 1995) SOLS : RECONNAISSANCE ET ESSAIS – MESURES A L'INCLINOMETRE. BIGOT G. – LES MESURES A L'INCLINOMETRE – *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées n°210*, Juillet-Août 1997, NIT 4152, pp 127-131.

Pr NF EN ISO 18674-2 : RECONNAISSANCE ET ESSAIS GEOTECHNIQUES – SURVEILLANCE GEOTECHNIQUE PAR INSTRUMENTATION IN SITU – PARTIE 2: MESURAGES DES DEPLACEMENTS LE LONG D'UNE LIGNE : EXTENSOMETRES.

NF P 94-157-1: Sols : Reconnaissance et Essais – Mesures piézométriques – Partie 1 : Tube ouvert.

Pathologie des ouvrages géotechniques

NF P 94 160-3 (mai 1993) : SOLS : RECONNAISSANCE ET ESSAIS – AUSCULTATION D’UN ELEMENT DE FONDATION – PARTIE 3 : METHODE SISMIQUE PARALLELE (M.S.P).

NF P94-160-2 (Novembre 1993) : SOLS : RECONNAISSANCE ET ESSAIS – AUSCULTATION D’UN ELEMENT DE FONDATION – PARTIE 2 : METHODE PAR REFLEXION.

Norme XP P 94-202 : « SOLS : RECONNAISSANCES ET ESSAIS - PRELEVEMENT DES SOLS ET DES ROCHES. METHODOLOGIE ET PROCEDURE.

Sites internet :

https://courses.ex-machina.ma/downloads/gc3/S9/BAT/Pathologie/Fondations_profondes.pdf

<http://www.planete-tp.com/histoire-r238.html>

<https://educnet.enpc.fr/course/view.php?id=252>

https://educnet.enpc.fr/pluginfile.php/98894/mod_resource/content/1/Auscultation-structure.pdf

<http://www.entp.edu.dz/revue/files/article/15/article%207.pdf>

<https://blog.hamil.fr/2018/02/13/les-etudes-de-diagnostic/>

<https://qualiteconstruction.com/fiche/glisement-de-sols-et-desordres-des-murs-de-soutenement-en-milieu-tropical/>

<https://maconnerie.bilp.fr/guide-mur-soutenement/part-1-generalite/les-regles-de-predimensionnement>

<https://docplayer.fr/16071850-Guide-pathologies-des-batiments-la-pathologie-des-fondations-superficielles-diagnostic-reparations-et-prevention.html>

<https://www.cmimarseille.org/sites/default/files/newsite/library/files/fr/PATHOLOGIES%20DES%20B%C3%82TIMENTS-3-2.pdf>

risquesnaturels.re/pdf/murs_soutenement.pdf

gc.univ-batna2.dz/sites/default/files/dept-gc/files/cours_chapitre2_pathologie_des_fondations.pdf

<https://www.cmimarseille.org/sites/default/files/newsite/library/files/fr/PATHOLOGIES%20DES%20B%C3%82TIMENTS-3-2.pdf>

https://www.le-pont.com/wordpress/wp-content/uploads/2017/04/1-ouvrages_soutenements_saliba.pdf

geo.univ-batna2.dz/sites/default/files/geo/files/pathologie_des_constructions.pdf