



Ministère de l'Enseignement Supérieur & de la Recherche Scientifique  
Université Dr. MOULAY Tahar de Saida  
Faculté de Technologie

---

**Département de Génie Civil & Hydraulique**

**Polycopié de cours**

# **Pathologies des Ouvrages**

## **GEOTECHNIQUES**

**Préparé par :**

Dr. Abdelkrim SEKKEL  
Maître de Conférences « B » en Génie Civil

Septembre 2020

# Pathologies des Ouvrages

## GEOTECHNIQUES

Ce manuel de cours traite les différentes Pathologies des Ouvrages Géotechniques, les techniques de leur diagnostic et les moyens de réparation mises en œuvre.

En effet, le géotechnicien est formé pour bâtir des infrastructures stables et durables. De l'avant-projet sommaire jusqu'à la réception définitive d'un projet, son intervention à différentes phases est de mise.

Néanmoins et malgré la rigueur et la prudence, les désordres ne manquent pas et peuvent se manifester en phase chantier, juste après sa réception voire plusieurs mois ou des décennies après.

A cet effet, le **géotechnicien** doit maîtriser les outils de diagnostic afin de mener à bien sa mission d'expertise, et déterminer les causes et les circonstances des sinistres, en recensant toutes les pathologies produites et celles susceptibles de se produire afin de proposer des solutions et des recommandations de sécurité.

Des erreurs de conceptions aux fautes d'exécutions, des pathologies de fondations à celles des ouvrages de soutènements et les problèmes liés aux sols, retrait, gonflement, présence de nappe phréatique, sols instables, ...etc.

Tout est expliqué à travers ce polycopié de cours riche et entièrement consacré à l'**expertise géotechnique**.



**Dr. Abdelkrim SEKKEl**

Maître de conférences, Enseignant chercheur

Département : Génie Civil & Hydraulique, Faculté de Technologie

Université : Dr MOULAY Tahar, Saida, 20000, Algérie

Laboratoire : Génie Civil & Environnement (L.G.C.E)

Mail : sek\_abd@yahoo.fr



# **Pathologies des Ouvrages**

## **GEOTECHNIQUES**

---

**Abdelkrim SEKKEL**

**2020**

# | Avant-Propos

---

Au cours du cursus universitaire, on apprend aux étudiants à assimiler les principes de base, puis et à les mettre en application aux travaux dirigés et pratiques. On les forme à réaliser un travail correct selon les règles de l'art de construire.

Une fois le diplôme obtenu et le **géotechnicien** recruté, la réalité peut être différente. Certes, un bon niveau de formation assure une bonne qualification dans la gestion des projets de construction, mais au vu du nombre d'intervenants, de responsabilités et d'aléas liés au génie civil, des erreurs se produisent sur chantiers. Qu'elles soient causées par un défaut de calcul, de conception ou de réalisation, de mauvaise compréhension des fondements de la mécanique des sols ou d'imprudence, les désordres se manifestent en phase chantier, après sa réception, voire plusieurs mois ou des décennies après.

A cet effet, le géotechnicien doit maîtriser les outils de diagnostic afin de mener à bien sa mission d'expertise, et déterminer les causes et les circonstances des sinistres, en recensant bien entendu toutes les pathologies produites et celles susceptibles de se produire, afin de proposer des solutions et des recommandations de sécurité.

Ce manuel de cours traite les différentes Pathologies des Ouvrages Géotechniques, les techniques de leur diagnostic et les moyens de réparation mises en œuvre. Il confère au géotechnicien une méthodologie de réflexion et une feuille de route pour gérer ses missions d'expertise.

Des erreurs de conceptions aux fautes d'exécutions, des pathologies de fondations à celles des ouvrages de soutènements et les problèmes liés aux sols, retrait, gonflement, présence de nappe phréatique, sols instables, ...etc. Tout est expliqué à travers ce polycopié de cours riche et entièrement consacré à **l'expertise géotechnique**.

# Table des matières

---

|                               |     |
|-------------------------------|-----|
| Avant-Propos .....            | i   |
| Table des matières .....      | ii  |
| Liste des Figures.....        | v   |
| Liste des Tableaux.....       | vi  |
| Symboles & Abréviations ..... | vii |
| Introduction générale .....   | 1   |

## Chapitre 1      Pathologies, Définitions & Outils de Prévention ..... 4

|            |                                                 |           |
|------------|-------------------------------------------------|-----------|
| <b>1.1</b> | <b>Introduction .....</b>                       | <b>5</b>  |
| <b>1.2</b> | <b>Définition de la pathologie .....</b>        | <b>6</b>  |
| <b>1.3</b> | <b>Autres définitions .....</b>                 | <b>6</b>  |
| 1.3.1      | Désordre .....                                  | 6         |
| 1.3.2      | Sinistre .....                                  | 6         |
| 1.3.3      | Ruine .....                                     | 6         |
| 1.3.4      | Réparation .....                                | 6         |
| 1.3.5      | Rénovation urbaine .....                        | 6         |
| 1.3.6      | Restauration .....                              | 7         |
| 1.3.7      | Réhabilitation .....                            | 7         |
| <b>1.4</b> | <b>Pathologies de l'art de construire .....</b> | <b>7</b>  |
| <b>1.5</b> | <b>Survenue des sinistres .....</b>             | <b>8</b>  |
| <b>1.6</b> | <b>Prévention des désordres .....</b>           | <b>8</b>  |
| 1.6.1      | Objectifs de la prévention .....                | 9         |
| 1.6.2      | Modes d'intervention.....                       | 9         |
| 1.6.3      | Eléments de la prévention active.....           | 10        |
| <b>1.7</b> | <b>Evaluation des désordres.....</b>            | <b>11</b> |
| <b>1.8</b> | <b>Origine des désordres .....</b>              | <b>12</b> |
| 1.8.1      | Actions mécaniques .....                        | 12        |
| 1.8.2      | Actions hygrothermiques .....                   | 12        |
| 1.8.3      | Actions chimiques et biologiques .....          | 13        |
| 1.8.4      | Interactions.....                               | 13        |
| <b>1.9</b> | <b>Conclusion .....</b>                         | <b>13</b> |

## Chapitre 2 Pathologies des fondations..... 14

|            |                                                                    |           |
|------------|--------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>2.1</b> | <b>Introduction .....</b>                                          | <b>15</b> |
| <b>2.2</b> | <b>Expertise géotechnique .....</b>                                | <b>16</b> |
| 2.2.1      | <i>But de l'expertise géotechnique .....</i>                       | 17        |
| 2.2.2      | <i>Démarche d'une expertise géotechnique .....</i>                 | 17        |
| <b>2.3</b> | <b>Pathologies typiques des fondations.....</b>                    | <b>18</b> |
| 2.3.1      | <i>Altérations des matériaux.....</i>                              | 19        |
| 2.3.2      | <i>Désordres provoqués par les mouvements du sol d'assise.....</i> | 19        |
| 2.3.3      | <i>Charges supplémentaires.....</i>                                | 27        |
| 2.3.4      | <i>Charges inégales .....</i>                                      | 28        |
| 2.3.5      | <i>Agressions des fondations .....</i>                             | 28        |
| 2.3.6      | <i>Erreurs d'exécution .....</i>                                   | 30        |
| 2.3.7      | <i>Insuffisance de la capacité portante .....</i>                  | 31        |
| 2.3.8      | <i>Méfais de l'eau.....</i>                                        | 31        |
| 2.3.9      | <i>Mitoyenneté : interaction des constructions voisines.....</i>   | 32        |
| 2.3.10     | <i>Causes diverses.....</i>                                        | 34        |
| <b>2.4</b> | <b>Méthode de résolution d'une pathologie de fondation .....</b>   | <b>36</b> |
| <b>2.5</b> | <b>Réparation et consolidation .....</b>                           | <b>36</b> |
| 2.5.1      | <i>Réparation des matériaux .....</i>                              | 37        |
| 2.5.2      | <i>Techniques de reprise en sous-œuvre .....</i>                   | 37        |
| <b>2.6</b> | <b>Principes géotechniques .....</b>                               | <b>41</b> |
| 2.6.1      | <i>Principe n° 1.....</i>                                          | 41        |
| 2.6.2      | <i>Principe n° 2.....</i>                                          | 41        |
| 2.6.3      | <i>Principe n° 3.....</i>                                          | 42        |
| 2.6.4      | <i>Principe n° 4.....</i>                                          | 42        |
| 2.6.5      | <i>Principe n° 5.....</i>                                          | 42        |
| <b>2.7</b> | <b>Exemples de pathologies de fondations .....</b>                 | <b>42</b> |
| 2.7.1      | <i>Exemple 1 .....</i>                                             | 42        |
| 2.7.2      | <i>Exemple 2 .....</i>                                             | 43        |
| 2.7.3      | <i>Exemple 3 .....</i>                                             | 44        |
| <b>2.8</b> | <b>Conclusion .....</b>                                            | <b>45</b> |

## Chapitre 3 Pathologies des murs de soutènement..... 46

|            |                                                                       |           |
|------------|-----------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>3.1</b> | <b>Introduction .....</b>                                             | <b>47</b> |
| <b>3.2</b> | <b>Principales causes des sinistres.....</b>                          | <b>48</b> |
| 3.2.1      | <i>Sinistres causés par l'eau .....</i>                               | 48        |
| 3.2.2      | <i>Sinistres causés par un mauvais dimensionnement .....</i>          | 48        |
| 3.2.3      | <i>Sinistres dans l'ouvrage .....</i>                                 | 48        |
| 3.2.4      | <i>Sinistres dus à une faute dans le déroulement des travaux.....</i> | 48        |
| 3.2.5      | <i>Causes diverses.....</i>                                           | 49        |
| <b>3.3</b> | <b>Règles à respecter pour construire un mur de soutènement .....</b> | <b>52</b> |

|            |                                                                                                                  |           |
|------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.3.1      | <i>Étude de sol</i> .....                                                                                        | 52        |
| 3.3.2      | <i>Conception par un bureau d'études</i> .....                                                                   | 52        |
| 3.3.3      | <i>Bonne réalisation des fondations, bien enterrées</i> .....                                                    | 52        |
| 3.3.4      | <i>Qualité des matériaux</i> .....                                                                               | 52        |
| 3.3.5      | <i>Système de drainage efficace</i> .....                                                                        | 52        |
| 3.3.6      | <i>Qualité drainante du remblai</i> .....                                                                        | 53        |
| 3.3.7      | <i>Étanchéité de la paroi contre terre</i> .....                                                                 | 53        |
| 3.3.8      | <i>Entretien régulier</i> .....                                                                                  | 53        |
| <b>3.4</b> | <b>Cas pathologiques</b> .....                                                                                   | <b>53</b> |
| 3.4.1      | <i>Stabilité au renversement non assurée ou insuffisamment assurée sous l'action de la poussée des terres...</i> | 53        |
| 3.4.2      | <i>Désordres résultant de l'absence ou de l'insuffisance du système de drainage</i> .....                        | 56        |
| 3.4.3      | <i>Fautes commises lors du remblaiement</i> .....                                                                | 58        |
| 3.4.4      | <i>Travaux venant compromettre ultérieurement la stabilité d'un mur de soutènement</i> .....                     | 59        |
| 3.4.5      | <i>Stabilité du mur au renversement non assurée</i> .....                                                        | 61        |
| 3.4.6      | <i>Désordres résultant de l'absence ou de l'insuffisance du système de drainage</i> .....                        | 62        |
| 3.4.7      | <i>Fautes commises lors du remblaiement</i> .....                                                                | 64        |
| <b>3.5</b> | <b>Étude de cas</b> .....                                                                                        | <b>65</b> |
| 3.5.1      | <i>1<sup>er</sup> cas</i> .....                                                                                  | 65        |
| 3.5.2      | <i>2<sup>ème</sup> cas</i> .....                                                                                 | 66        |
| 3.5.3      | <i>3<sup>ème</sup> cas</i> .....                                                                                 | 66        |
| 3.5.4      | <i>4<sup>ème</sup> Cas</i> .....                                                                                 | 67        |
| <b>3.6</b> | <b>Conclusion</b> .....                                                                                          | <b>69</b> |
|            | Conclusion générale.....                                                                                         | 70        |
|            | Références bibliographiques .....                                                                                | 72        |
|            | Index .....                                                                                                      | 74        |

# Liste des Figures

## Chapitre 2 Pathologies des fondations..... 14

|                                                                                                                        |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure 2.1. Fondations sur dénivelé [7].....                                                                           | 20 |
| Figure 2.2. Fondations sur sol compressible [7].....                                                                   | 21 |
| Figure 2.3. Assèchement de l'argile [7] .....                                                                          | 21 |
| Figure 2.4. Argile molle [7].....                                                                                      | 21 |
| Figure 2.5. Rabattement de nappe par pompage [13] .....                                                                | 22 |
| Figure 2.6. Rabattement de nappe par excavation [13].....                                                              | 22 |
| Figure 2.7. Rabattement de nappe par présence d'arbres [13].....                                                       | 22 |
| Figure 2.8. a. Mur de clôture en béton préfabriqué/ b. Mur de clôture en maçonnerie/ c. Cuves sans couverture [5]..... | 23 |
| Figure 2.9. d. Bâtiment sur sol homogène très compressible/ e. Bâtiment sur sol hétérogène/ f. Tour de pise [1] .....  | 23 |
| Figure 2.10. Chargement identique sur semelle différentes [8] .....                                                    | 24 |
| Figure 2.11. Tassement et fissurations liés à la sécheresse [7] .....                                                  | 25 |
| Figure 2.12. Dispositif de drainage des eaux de circulation saisonnières [14] .....                                    | 26 |
| Figure 2.13. Protection d'une construction par géomembrane [14].....                                                   | 27 |
| Figure 2.14. Incidence de la proximité des arbres sur les constructions [14].....                                      | 27 |
| Figure 2.15. Chargement supplémentaire par remblai [13].....                                                           | 28 |
| Figure 2.16. Charges inégales [13] .....                                                                               | 28 |
| Figure 2.17. Fissures par sulfatation du béton [7] .....                                                               | 29 |
| Figure 2.18. Sulfatation du béton [7].....                                                                             | 29 |
| Figure 2.19. Exécution de remblais [1] .....                                                                           | 30 |
| Figure 2.20. Fissures en escalier suite à un défaut de portance du sol [6].....                                        | 31 |
| Figure 2.21. Effet de la mitoyenneté [1].....                                                                          | 32 |
| Figure 2.22. Fondations superficielles du bâtiment existant .....                                                      | 33 |
| Figure 2.23. Fondations profondes du bâtiment existant.....                                                            | 34 |
| Figure 2.24. Soulèvement des fondations par effet de gel [15].....                                                     | 35 |
| Figure 2.25. Liquéfaction du sol lors du séisme de Nigata au Japon 1967 [1] .....                                      | 35 |
| Figure 2.26. Colmatage de drain par ocre [7] .....                                                                     | 35 |
| Figure 2.27. Reprise en sous- œuvre par puits [14].....                                                                | 38 |
| Figure 2.28. Reprise en sous-œuvre par micropieux [14] .....                                                           | 39 |
| Figure 2.29. Reprise en sous-œuvre par jet grouting [14] .....                                                         | 40 |
| Figure 2.30. Bâtiment d'habitation et passage couvert en maçonnerie [5] .....                                          | 43 |
| Figure 2.31. Groupe de pavillons [5].....                                                                              | 44 |
| Figure 2.32. Bâtiments mitoyens [5].....                                                                               | 45 |

## Chapitre 3 Pathologies des murs de soutènement..... 46

|                                                                                                    |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure 3.1. Mur poids [1].....                                                                     | 49 |
| Figure 3.2. Mur cantilever [1] .....                                                               | 50 |
| Figure 3.3. Exemple de murs de soutènement non autostable : mur de sous-sol [1].....               | 50 |
| Figure 3.4. Exemple de murs de soutènement non autostable : Paroi ancrée par des tirants [1] ..... | 50 |
| Figure 3.5. Mur en moellons [1].....                                                               | 53 |
| Figure 3.6. Fosse de pont bascule [1].....                                                         | 54 |
| Figure 3.7. Cas ne correspondant pas à l'hypothèse de Coulomb [1] .....                            | 55 |
| Figure 3.8. Exemple du mur qui s'est effondré au cours du remblaiement [1] .....                   | 56 |

|                                                                                      |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure 3.9. Rejointoiement inconsidéré et écoulement du mur [1].....                 | 57 |
| Figure 3.10. Coupe sur le mur de soutènement [1].....                                | 59 |
| Figure 3.11. Nouveau mur en béton banché [1].....                                    | 60 |
| Figure 3.12. Mise en place d'étrésillons pour maintenir le coffrage [1].....         | 60 |
| Figure 3.13. Renversement avec rupture longitudinal d'un mur de soutènement [1]..... | 61 |
| Figure 3.14. Dispositifs de drainage derrière un mur [1].....                        | 63 |
| Figure 3.15. Mur en moellons [3].....                                                | 64 |
| Figure 3.16. Effondrement du mur [17].....                                           | 65 |
| Figure 3.17. Epaisseur insuffisante [17] .....                                       | 65 |
| Figure 3.18. Barbacanes en nombre insuffisant [17].....                              | 65 |
| Figure 3.19. Dégradation des enduits [17].....                                       | 65 |
| Figure 3.20. Mur de clôture en parpaing réalisé comme mur de soutènement [17].....   | 66 |
| Figure 3.21. Basculement du mur [17] .....                                           | 66 |
| Figure 3.22. Rupture partielle du mur [17].....                                      | 67 |
| Figure 3.23. Pierres ne formant pas un bloc monolithe de maçonnerie [17].....        | 67 |
| Figure 3.24. Infiltration des eaux pluviales [16].....                               | 68 |
| Figure 3.25. Dégradation des enduits [16].....                                       | 68 |
| Figure 3.26. Inondation du plancher [16].....                                        | 68 |
| Figure 3.27. Infiltration [16].....                                                  | 68 |

## | Liste des Tableaux

---

### **Chapitre 3      Pathologies des murs de soutènement..... 46**

|                                                                                         |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tableau 3.1 Classification des causes de sinistres en fonction du type du mur [1] ..... | 49 |
| Tableau 3.2 Classification d'après les causes de sinistres [1].....                     | 51 |
| Tableau 3.3 Classification d'après les manifestations des désordres [1].....            | 51 |

# | Symboles & Abréviations

---

$t$  : Coefficient du terrain

$f$  : Coefficient de forme de la semelle

$P$  : Charge appliquée sur la semelle

$\nu$  : Coefficient de Poisson

$E$  : Module d'Young

$A$  : Section de la semelle

$T$  : Tassement

$\sigma$  : Contrainte normale de la charge appliquée à la semelle ( $P$ ) ramenée à sa section ( $A$ )

D.T.U : Document technique unifié

D.T.R : Document technique réglementaire

A.E.P : Alimentation en eau potable

$M$  : Moment de flexion ; produit de la force normale ( $F$ ) et de l'excentricité ( $e$ )

$F$  : Force normale

$e$  : Excentricité

# | Introduction générale

---

Le monde dans lequel nous vivons est en perpétuel évolution. L'innovation fait appel au progrès qui à son tour se manifeste dans le besoin de construire. Construire de nouvelles usines pour mettre en application les stratégies de développement tracées par des firmes et des multinationales, au profit d'un secteur économique multisectoriel devant s'appuyer sur des infrastructures stables et durables.

L'acte de bâtir ne se limite pas qu'aux bâtiments et travaux publics. Que ce soit le secteur des finances ou des transports, de l'éducation ou de la recherche scientifique, de l'industrie ou des ressources en eau, de la défense ou de la santé. Tous ces secteurs ont besoin de plateformes pour s'installer et se développer. Le génie civil ne nous fournit pas seulement un toit pour nous abriter, mais nous accompagne en route pour aller au travail, puis en faisant nos courses, en allant chez le médecin ou en accompagnant nos enfants à la sortie d'école. Il nous entoure et se révèle en fait omniprésent à chaque étape de notre vie.

La pérennité de l'humanité dépend en partie de celle des ouvrages que nous construisons. Le respect des règles de l'art amène l'ingénieur à équilibrer la balance de l'économie et la sécurité par des études rigoureuses.

En général, la superstructure est bien maîtrisée si l'on met en application notre savoir-faire sur les lois de comportement pour prévenir la réponse d'une structure vis-à-vis de sollicitation statique ou dynamique. Une modélisation correcte accompagnée d'un bon suivi de la qualité des matériaux et la conformité de leur mise en œuvre permet de se mettre en sécurité.

Mais que l'on veuille ou non, l'infrastructure caractérisée par l'interaction sol-structure ou la mécanique des sols entre en jeu reste un des challenges les plus difficiles à relever, non pas à cause de notre imprudence et notre méconnaissance, mais la difficulté se manifeste dans la variabilité des paramètres géotechnique associée à l'hétérogénéité

du terrain. Eau, gel présence de nappe, de cavités, risque de liquéfaction [1], d'éboulement, de glissement de terrain...etc. Les exemples ne manquent pas, mais plus grave encore, les désordres et les pathologies des ouvrages géotechniques ne cesseront pas de nous interpeller à chaque fois que des imprudences sont commises ou que les paramètres géotechniques varient.

Il est tout à fait logique que le futur géotechnicien apprenne à mettre en application sa maîtrise de la mécanique des sols à travers ses études et leur suivi de la réalisation. Mais vu la variabilité des paramètres géotechniques, de la pertinence des études, de l'expérience du terrain et du nombre des acteurs intervenant dans un projet de construction. Des erreurs se produisent à différents niveaux et à différentes phases : le sol gonfle, l'immeuble tasse, le mur de soutènement se renverse, la fondation entre en rupture, le bâtiment bascule ou s'écroule. Les pathologies ne manqueront pas d'être très préjudiciables si l'origine est d'ordre géotechnique.

A cet effet, le géotechnicien ne doit pas se contenter maîtriser l'étude de sol et son suivi, mais devra également faire face aux problèmes qui surgiront après la réception d'un ouvrage. En qualité d'expert, il devra s'armer d'outils de diagnostic, faire appel à son expérience pour déterminer les causes et les circonstances des sinistres parfois difficiles à déterminer. L'expertise géotechnique devra réunir toutes les pièces du puzzle, les répertorier et les analyser en vue de résoudre le problème.

Ce manuel de cours illustre les différentes Pathologies des Ouvrages Géotechniques. Il offre au géotechnicien une méthode d'analyse bien structurée et propose une synthèse des différents problèmes rencontrés sur chantier et des techniques de réparation. Il est scindé en trois chapitres :

Le premier chapitre est réservé aux pathologies et définition des termes employés dans ce domaine. Il explique l'origine des pathologies constatées lors des deux guerres mondiales et la survenue des sinistres, puis offre une méthodologie d'analyse pour la

---

<sup>1</sup> Pour les sols grenus en présence de nappe phréatique, le séisme provoque une augmentation de la pression interstitielle conduisant au relâchement des grains et annulant ainsi le frottement ce qui a pour conséquence une annulation de la contrainte effective matérialisant une perte totale de résistance au cisaillement

prévention des désordres suivi de leur évaluation. Si le sinistre est inévitable, l'origine des désordres peut être établie de façon judicieuse ;

Le deuxième chapitre recense les pathologies des fondations. En effet l'interaction sol-structure pose parfois problèmes surtout en présence des sols instables, liquéfiables voir expansifs ou la variabilité des paramètres géotechniques peut être source de problèmes. Une démarche de l'expertise géotechnique est proposée et des cas typiques de problèmes de fondations sont exposés ainsi que des techniques de consolidation et de réparation ;

Enfin le dernier chapitre est réservé aux ouvrages de soutènements. Là aussi les problèmes ne manquent pas et les pathologies peuvent s'étaler de la simple fissure à l'effondrement totale pour diverses causes, mauvais dimensionnement, défaillance du système de drainage, poussée hydrostatique ou encore d'autres phénomènes.

Une conclusion générale est prévue en fin du manuscrit pour synthétiser l'ensemble des observations et des recommandations devant être prises en compte.

# Chapitre 1

## Pathologies, Définitions & Outils de Prévention

|     |                                         |    |
|-----|-----------------------------------------|----|
| 1.1 | Introduction .....                      | 5  |
| 1.2 | Définition de la pathologie .....       | 6  |
| 1.3 | Autres définitions .....                | 6  |
| 1.4 | Pathologies de l'art de construire..... | 7  |
| 1.5 | Survenue des sinistres .....            | 8  |
| 1.6 | Prévention des désordres .....          | 8  |
| 1.7 | Evaluation des désordres.....           | 11 |
| 1.8 | Origine des désordres .....             | 12 |
| 1.9 | Conclusion .....                        | 13 |

# Pathologies, Définitions & Outils de Prévention

Pour guider nos pas à travers les pièges géotechniques que la nature tend sous nos pieds, la méthode rationnelle et le calcul, l'approche expérimentale et l'instrumentation, l'expérience des autres à travers succès et échecs nous apportent chacune à sa façon des lueurs partielles qui se complètent les unes les autres [1].

A travers ce chapitre, le lecteur apprendra à se familiariser avec la terminologie relevant des pathologies liées aux ouvrages géotechniques. Des définitions seront rapportées puis accompagnées de l'historique des pathologies de l'art de construire notamment celui des deux guerres mondiales. Ensuite nous nous intéresserons à l'évaluation, prévention et origine des désordres.

## 1.1 Introduction

La géotechnique est la science permettant l'étude des propriétés du sol ainsi que son interaction avec la structure. Les terrains naturels sont composés de grains solides, de vides et d'eau. Leurs caractéristiques sont souvent variables. Leurs comportements évoluent dans le temps et dépendent de l'ouvrage qui les sollicite (bâtiments, ponts, pylônes, barrages, tunnels...). Leur modélisation fait appel à la théorie complexe de la mécanique des milieux continus et plus spécifiquement la mécanique des sols. L'étude de leur comportement mécanique et hydraulique nécessite l'expertise d'ingénieurs et de techniciens hautement qualifiés en géotechnique.

Il est donc indispensable que les équipes constructrices soient assistées d'un géotechnicien à toutes les étapes de l'avancement du projet : étude préliminaire ou d'esquisse, étude d'avant-projet, étude de projet et suivi d'exécution. Selon la norme NF P 94-500, on appelle ouvrage géotechnique [2] :

- Les fondations (semelles, radiers, puits et pieux) ;
- Les soutènements ;
- Les ouvrages en terre (déblais, remblais, couches de forme) ;
- Les ouvrages souterrains ;
- Les améliorations et renforcements de terrains ;
- Les ouvrages de drainage, d'épuisement et de pompage.

## 1.2 Définition de la pathologie

La pathologie est définie comme étant l'étude des désordres et surtout l'étude statistique, systématique et ordonnée des désordres et des sinistres. 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 au bâtiment, les maladies seraient les désordres qui, en s'aggravant, donnent lieu à des sinistres ; ces derniers pouvant conduire à la ruine des ouvrages [3].

Louis Logeais (1971-1982) a utilisé le terme pathologie des fondations pour rapporter de nombreux sinistres de bâtiments dus à une défaillance des fondations.

## 1.3 Autres définitions

### 1.3.1 Désordre

D'après le Robert : « Altération, perturbation, trouble, défaut, imperfection grave, défectuosité » [3].

### 1.3.2 Sinistre

D'après le Robert : « événement catastrophique naturel qui occasionne des dommages, des pertes... ». 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.

### 1.3.3 Ruine

D'après le Robert, une ruine est la « grave dégradation d'un édifice allant jusqu'à l'écroulement partiel ou total ». La ruine constitue l'état ultime, limite ou final d'une construction ou d'un ouvrage après destruction partielle ou totale [3].

### 1.3.4 Réparation

Ce terme correspond aux opérations nécessaires au maintien de l'ouvrage après sa construction. On peut distinguer deux types de réparations : petites et grosses [3].

### 1.3.5 Rénovation urbaine

Opération qui concerne l'ensemble d'un quartier, ce qui implique la démolition d'immeubles, la libération du sol, le remembrement de parcelles, la redistribution des utilisations du sol en voirie, logements, équipements et reconstruction à neuf. Ce terme est à distinguer de la rénovation individuelle des bâtiments qui constitue simplement en une « rénovation à neuf » [3].

### 1.3.6 Restauration

Les travaux de restauration visent à remettre un bâtiment ou un ouvrage dans son état originel du fait de son intérêt architectural ou historique [3].

### 1.3.7 Réhabilitation

Des travaux de réhabilitation visent à la fois à conforter un bâtiment et à le remettre en état en le dotant des éléments de confort moderne [3] :

- Apport d'isolation thermique ;
- Modernisation des installations intérieures (réseaux : électricité, chauffage, fluides, sanitaire).

## 1.4 Pathologies de l'art de construire

Le XX<sup>e</sup> siècle ayant subi deux guerres mondiales et des crises économiques à répétition, est entré dans une phase de construction indigente où tout est prétexte à l'économie. Les exigences de confort de l'habitation augmentent, par conséquent l'on tente de promouvoir la qualité. Cependant la qualification professionnelle des entreprises est gravement compromise par une insuffisance de formation et d'autres phénomènes tels que la sous-traitance en 'cascade'.

L'art difficile de l'architecte, dans son rôle de concepteur, consiste à créer pour l'homme un environnement matériel et social adapté à ses aspirations, et dans lequel il fait bon vivre. Il existe d'abord une pathologie de l'architecture parce que l'homme évolue et la construction est faite pour durer.

L'architecte doit percevoir les aspirations futures de l'occupant et non pas se contenter de ses aspirations présentes. Il doit ensuite construire selon le budget qui lui est alloué, et le drame est alors en lui-même, car il doit abandonner un certain nombre d'idées relatives à une conception confortable pour la sacrifier à l'économie abusive du moment : il faut coûte que coûte rester dans les prix plafonds réglementaires ou permettre au promoteur de présenter des prix d'achat concurrentiels, sous-estimant parfois les coûts d'exploitation et d'entretien. Et l'on paye parfois chèrement certains choix imposés. C'est ainsi que tout le parc logements est dans la majorité des cas très déprécié : isolations thermiques et phoniques insuffisantes, monotonie ou laideur des façades, ambiance concentrationnaire.

La raréfaction des terrains à bâtir a conduit à rentabiliser au maximum chaque mètre carré en empilant le maximum des planchers. Cet univers concentrationnaire vertical montre ses limites avec ses problèmes techniques, sanitaires et sociaux.

Aujourd'hui, l'homme se tourne vers une autre architecture aux dimensions plus réduite [3].

## 1.5 Survenue des sinistres

Dans toutes les études d'ouvrages en génie civil, les codes et règlements de calcul offrent un coefficient de sécurité important allant dans le sens de la sécurité. Il en résulte théoriquement que l'effondrement d'un ouvrage est un phénomène rare. Tout ouvrage bien conçu, doit alors supporter, sans faiblir, les charges auxquelles il est soumis.

Pourtant, de nombreux ouvrages, ne manquent pas de poser le problème de sinistralité. Les mêmes problèmes réapparaissent régulièrement dans des ouvrages comparables placés dans des conditions semblables. Ceci donne à penser que la sinistralité résulte de l'emploi involontaire mais répété de dispositifs de construction inappropriés, de méthodes de conception ou d'exécution mal adaptés ou des deux à la fois. Cet état de fait est souvent le résultat d'absence de coordination entre les différents acteurs de la construction. Pour pallier ces désordres, il faut penser à élaborer de véritables démarches de prévention des désordres [3].

## 1.6 Prévention des désordres

Connaître en fait les composantes de la prévention c'est d'abord passer par la connaissance de la pathologie. La logique de la prévention est donc simple en théorie : Il faut procéder à l'analyse des causes de la pathologie en vue de promouvoir des actions capables d'éviter le renouvellement des mêmes erreurs. La mise en pratique est plus difficile ! Du fait des habitudes, des inconséquences, des inerties de comportement et des divergences d'intérêt entre les différents acteurs de la construction. Avec le développement des démarches qualité, la situation va peut-être évoluer dans la bonne direction même si la progression dans cette voie paraît bien lente. Prévenir dans la construction est une motivation permanente, un enchaînement soigné à chaque étape, une vigilance continue sur les idées (la conception) et les faits (la réalisation). Chaque acteur est responsable d'abord de ce qu'il fait, doit être un professionnel averti qui examine et contrôle le maillon d'avant et qui s'implique dans le maillon d'après, en s'attachant à vérifier que ses consignes sont bien comprises et appliquées. La prévention ne se fera pas sans moyens. Aussi, la description de pathologies potentielles, qu'il s'agisse de problèmes liés aux études de conception architecturale et technique ou lors de l'exécution des travaux de réalisation, pouvant être détectés avant la réception des ouvrages et la mise en jeu des garanties apporte une contribution certaine à la prévention des désordres [3].

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. De ce point de vue, la sensibilisation et la formation professionnelle du personnel contribuent à la prévention. La prévention doit être une démarche solidaire de tous les intervenants [3].

### 1.6.1 Objectifs de la prévention

Il y a principalement trois objectifs :

- Obtenir une meilleure qualité ;
- Diminuer le nombre de sinistres et les facteurs de non qualité ;
- Diminuer le délai de levée des réserves.

### 1.6.2 Modes d'intervention

On cite trois modes d'intervention :

- Promouvoir le travail d'équipe avec la maîtrise d'ouvrage, la maîtrise d'œuvre et l'entreprise ;
- Favoriser les circuits décisionnels ;
- Maîtriser les couts et les délais.

La maîtrise d'ouvrage : elle est garantie par :

- La programmation : le programme est le 'référentiel' pour tous les intervenants. La précision des exigences évite les improvisations, les modifications et les surcoûts.
- Critères de sélection des entreprises mieux disantes ;
- Préparation du chantier et mise en place d'un coordonnateur ;
- Réception avec levée des réserves et traitement des non-conformités ;
- Utilisation de l'ouvrage conforme à celle qui a été prévue et entretien normal de l'ouvrage.

La maîtrise d'œuvre :

- Validation du programme sur la base duquel la phase conception permet la distribution des rôles (élaboration du cahier des charges des prestations et des prescriptions techniques) ;
- Organisation des interfaces, détection des points sensibles de la réalisation des travaux.

La réalisation contrôlée :

- Identification des points sensibles de la construction et détermination des mesures à prendre ;

- Développement du cahier des charges d'exécution avec implication des fournisseurs pour obtenir la qualité des matériaux et des produits incorporés.

La prévention des désordres est une action constructive lente et raisonnée se situant en amont de la réalisation. Elle doit intervenir dès la conception du projet de construction.

La prévention des désordres est basée sur l'expérience et sur l'établissement de règles techniques tenant compte de l'évolution des constructions et des exigences.

Un ouvrage mal conçu sera difficile à réaliser, exigera des précautions particulières et entraînera des coûts supplémentaires et risques difficiles à apprécier. L'innovation est nécessaire pour faire progresser les techniques mais elle doit être raisonnée, mesurée et introduite progressivement.

Il faut laisser le temps nécessaire pour déterminer in situ, c'est à dire en vieillissement et en comportements naturels, la fiabilité et la qualité des matériaux ou procédés présentés en tant que « techniques nouvelles ».

En faisant leurs preuves de qualité performances et durabilité, ces techniques nouvelles sont peu à peu introduites dans les textes codifiés (normes, D.T.U...) [3].

### 1.6.3 Éléments de la prévention active

Une prévention active coordonnée consiste à assurer la qualité de trois paramètres essentiels [3] :

#### 1.6.3.1 Conception

Une bonne conception de projet passe par une étude adéquate des deux parties de l'ouvrage à savoir la superstructure et l'infrastructure ainsi qu'une bonne connaissance du sol d'assise et des interactions éventuelles. La définition correcte des paramètres de matériaux introduits dans les calculs fait partie intégrante d'une bonne conception.

#### 1.6.3.2 Choix des matériaux

Les différents matériaux utilisés doivent être de bonne qualité dont leurs paramètres soient conformes aux calculs faits. Leur fabrication doit être fiable et contrôlée aux différents stades de l'exécution.

#### 1.6.3.3 Mise en œuvre

Il faut qu'elle soit conforme aux règles de l'art (D.T.U, D.T.R, etc.), réalisée de manière correcte et contrôlée par les deux corps (entreprise et contrôle technique).

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 entamés.

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. Si les erreurs ou défauts ne sont pas repérés avant la réception des travaux, il y a alors risque de sinistre à plus ou moins long terme.

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.

## 1.7 Evaluation des désordres

Il arrive souvent qu'un sinistre soit le cumul de plusieurs fautes de natures diverses, dont aucune n'aurait à elle seule provoqué le sinistre, mais qui ont, chacune, réduit une part de la charge de sécurité qu'elle devait préserver. Par ailleurs, un sinistre peut avoir sa cause dans un ouvrage et son effet dans un autre [3]:

- Un plancher qui fléchit, fissure la cloison sous-jacente ;
- Une étanchéité qui fuit, pourrit la charpente qui la porte ;

Tout l'art des experts consiste, au vu des désordres constatés, de l'état des lieux et des archives, à discerner :

- Le ou les phénomènes physiques qui ont amené la formation des désordres ;
- Ce qu'il aurait fallu faire, dans l'esprit du projet, pour les éviter.

Ensuite, les juges, en cas d'action judiciaire, les assureurs aidés des experts, recherchent :

- Le ou les agents responsables du sinistre ;
- Le degré de responsabilité de chacun dans la survenance du sinistre.

## 1.8 Origine des désordres

En construisant, l'homme fait intervenir les lois de la nature à son profit. C'est tout au moins ce qu'il cherche, mais il ne les maîtrise pas toujours, soit qu'il ait sous-estimé l'importance de certaines d'entre elles, soit qu'il les ait totalement oubliées ou ignorées. Beaucoup de facteurs peuvent déclencher des désordres ou peut citer les actions mécaniques de la pesanteur et du vent, les actions hygrothermiques et chimiques de l'air environnant ainsi que des matières agressives [3].

### 1.8.1 Actions mécaniques

Dans les calculs classiques de résistance, on néglige généralement un certain nombre de phénomènes, considérés comme secondaires, ou on en tient compte d'une manière forfaitaire. C'est ainsi qu'on ne calcule pas (sauf exception) la valeur [4]:

- Des moments de flexion exercés dans les murs par la rotation des planchers aux appuis ;
- Des tassements différentiels entre semelles de fondation de grandeurs différentes, bien qu'exerçant sur le sol la même pression ;
- On se limite aussi, autant que possible aux calculs unidirectionnels (poutres), voire bidirectionnels (portiques), passant très rarement au tri-directionnel à l'aide d'ordinateurs et de programmes dans lesquels il faut alors introduire un grand nombre de cas de chargement et dont les résultats prennent vite l'aspect compliqué. Et pourtant la nature demeure à trois dimensions, et l'état de chacune d'elles réagit sur les deux autres.

### 1.8.2 Actions hygrothermiques

L'eau, sous ses trois aspects : vapeur, liquide et glace a une très grande influence en pathologie. Chaque matériau possède un équilibre qui lui est propre vis-à-vis de l'état hygrométrique et de la température de l'air environnant. Il tend vers cet équilibre, plus ou moins lentement et modifie son évolution quand l'ambiance évolue. D'une manière générale, les matériaux augmentent de volume avec l'augmentation de leur teneur en eau et leur température et diminuent de volume dans le cas contraire [5].

- La terre cuite sort du four parfaitement anhydre et se réhumidifie très lentement en gonflant ;
- Le béton fraîchement coulé est gorgé d'eau et en séchant, il perd son eau et accuse un retrait.

La chaleur agit de deux manières : en dilatant par effet thermique et en diminuant l'humidité relative de l'air ambiant entraînant une réduction de teneur en eau des matériaux et un retrait.

Ces deux effets antagonistes s'annuleraient en partie dans les matériaux s'ils arrivaient à se produire simultanément. Malheureusement la cinétique des deux phénomènes est différente. La dilatation thermique est instantanée alors que l'exsudation de l'eau incluse et la contraction corrélative sont, elles beaucoup plus lentes.

### 1.8.3 Actions chimiques et biologiques

L'humidité accompagnée de la chaleur favorise le développement d'organismes végétal, animal ou microbien. Ce phénomène entraîne pour certains matériaux des dégradations. Le bois subit un pourrissement et les calcaires peuvent se désagréger en milieux nitrurés. Les rayons ultraviolets du soleil provoquent la polymérisation des matériaux à chaînes carbonées, peintures et plastiques [3].

### 1.8.4 Interactions

La cohabitation des matériaux présentent des lois de comportement différentes et sont capables de s'altérer les uns les autres en causant certains désordres [3]:

- Rupture du plus fragile quand deux matériaux mitoyens se déforment différemment (béton et brique creuse, canalisations et gros œuvre, etc.) ;
- Détérioration d'un bois humidifié par le béton ou le plâtre frais.

## 1.9 Conclusion

A l'issue de ce chapitre, nous tirons les conclusions suivantes à savoir :

- Les études d'ouvrages en génie civil offrent un coefficient de sécurité important, pourtant de nombreux ouvrages présentent des pathologies ;
- La sinistralité résulte de l'emploi involontaire mais répété de dispositifs de construction inappropriés, de méthodes de conception ou d'exécution mal adaptés ou des deux à la fois ;
- Les désordres résultent de l'absence de coordination entre les différents acteurs de la construction ;
- Une prévention efficace repose sur une bonne conception, le choix de matériaux de qualité et une mise en œuvre conforme aux règles ;
- Un sinistre peut être le cumul de plusieurs fautes de natures diverses ;

Le chapitre suivant est consacré aux pathologies de fondations.

# Chapitre 2

## Pathologies des fondations

|     |                                                          |    |
|-----|----------------------------------------------------------|----|
| 2.1 | Introduction .....                                       | 15 |
| 2.2 | Expertise géotechnique.....                              | 16 |
| 2.3 | Pathologies typiques des fondations.....                 | 18 |
| 2.4 | Méthode de résolution d'une pathologie de fondation..... | 36 |
| 2.5 | Réparation et consolidation .....                        | 36 |
| 2.6 | Principes géotechniques .....                            | 41 |
| 2.7 | Exemples de pathologies de fondations .....              | 42 |
| 2.8 | Conclusion .....                                         | 45 |

# Pathologies des fondations

Comme dit Terzaghi : « *Bien que les fondations soient cachées, mais les problèmes de fondations ne peuvent pas être cachés* ». Un problème de mécanique des sols tel qu'il soit fini toujours par émerger.

Ce chapitre offrira au géotechnicien une méthodologie de réflexion bien structurée et ordonnée et ce, depuis l'étude géotechnique caractérisant le site et le choix du système de fondation, jusqu'au suivi de la réalisation. En cas de sinistre, le recours à l'expertise géotechnique est inévitable. C'est pour cette raison qu'il a été jugé utile de détailler les démarches à suivre. Des pathologies typiques des fondations seront exposées ainsi que leur méthode de résolution et les techniques de réparation. Enfin, on évoquera le respect des cinq principes géotechniques applicables à tout mode de fondation pour terminer avec quelques exemples de pathologies liés aux fondations.

## 2.1 Introduction

Le cout des travaux de fondations d'un ouvrage n'excède rarement 10% du prix total d'une construction, cependant, la sécurité de la superstructure dépend de la fondation. Des économies mal placées sur les travaux de fondation compromettront, à moyen et à long terme, la superstructure même si elle est calculée et construite par des professionnels. La meilleure assurance dans ce domaine, est d'avoir une bonne étude géotechnique, préparée par un ingénieur compétent, avec un suivi rigoureux durant la construction par un personnel compétent [6].

La nécessité d'avoir des fondations solides est reconnue depuis des milliers d'années. Par exemple, la solidité de la tour Eiffel est due à ces fondations réalisées sur des sols solides contrairement à la tour de pise qui était fondée sur un sol mou. Les principes de construction ont peu changé avec le temps contrairement aux matériaux qui ont connu beaucoup de progrès. Au cours des siècles, les accidents de fondations survenus ont contribué efficacement dans la compréhension du comportement de ces dernières, d'où l'importance des renseignements fournis par les pathologies des fondations [7].

L'inconvénient d'une fondation défectueuse et que ses défauts et les erreurs commises n'apparaissent que rarement de suite, mais avec le temps après avoir réceptionné le projet où les fondations sont cachées et l'ouvrage est en service [7].

Selon Sanglerat (1968), si pour les constructions importantes telles que les ponts, barrages, mur de soutènement, tours à bureaux, tunnels et autres ouvrages géotechniques, la nécessité de procéder à une expertise géotechnique détaillée est admise lorsque survient un problème de fondation, par contre, il faut reconnaître qu'il n'en est pas de même dans le cas des problèmes de fondations touchants des bâtiments résidentiels ou industriels d'importance moindre. Même si on effectue une expertise dans ce dernier cas, cette étude est souvent limitée à une visite des lieux sans procéder par des sondages ou essais géotechniques. Ce qui met en doute la validité des recommandations formulées sur la base d'une inspection visuelle [8].

Par nature, les fondations sont inaccessibles à l'examen visuel. Les désordres ne sont décelables que par leurs effets sur les constructions : fissurations, déformations, tassements, etc. La présence de quelques fissures dans un bâtiment ne justifie forcément pas la recommandation de reprises en sous-œuvre des fondations. Il est important de bien connaître la cause et l'origine des fissures pour ensuite formuler une méthode de confortement. Toutes les fissures n'ont pas la même gravité. Il faut distinguer les fissures architecturales des fissures structurelles. On ne doit donc pas attribuer toute fissure à des tassements différentiels et à des mouvements des sols si on n'a pas procédé à des sondages géotechniques et des mesures de tassements appropriées et ce sur un temps plus ou moins long. Dans le domaine de drainage de bâtiment, la présence d'eau dans une excavation près de drains de fondation ne justifie pas le recours au soulèvement de la résidence comme solution de mitigation [7].

## 2.2 Expertise géotechnique

Une expertise géotechnique bien exécutée doit comporter la reconnaissance de toutes les couches qui sont soumises aux sollicitations apportées par la construction. On doit oublier cette croyance trop répandue que l'influence des fondations est limitée à deux à trois fois leur largeur.

Toute expertise géotechnique sérieuse doit commencer par une visite du site et l'examen morphologique de l'ensemble des terrains [9]. Lors de cette expertise, on tentera de connaître l'historique des travaux réalisés au voisinage du site auprès des voisins et aussi de prendre connaissance du comportement des bâtiments et structures existantes. On portera une attention particulière à la présence de constructions, d'excavation, d'arbres, de travaux récents, de services souterrains existants, de l'état des bâtiments existants [10]. Il faut se rappeler qu'une visite des lieux n'est pas une partie de chasse et que ce travail doit être effectué par un ingénieur géotechnicien expérimenté qui rédigera le rapport. Il faut avouer que le simple passage des années de pratique n'est pas une garantie de perfectionnement en géotechnique. Souvent, il est même nécessaire de retourner à plusieurs reprises

sur le site dans le cadre de la vérification du mécanisme géotechnique proposé pour expliquer la cause des problèmes de fondation à l'étude. Dans le cas d'une expertise, on doit, ensuite consulter des documents et des plans publics disponibles sur le passé du site. Il faut pour cela rassembler toute la documentation existante : cartes de sols, rapports géotechniques régionales, plans d'utilisation du sol, photos aériennes, banque de données municipales et ministérielles, sondages réalisés pour les voisins si possibles, Publications scientifiques existantes sur le site et sur le sujet, etc. [7].

### 2.2.1 But de l'expertise géotechnique

L'expertise géotechnique doit avoir pour but de bâtir un mécanisme de pathologie de fondation compatible avec les indices existants sur les lieux [7].

### 2.2.2 Démarche d'une expertise géotechnique

Pour valider le mécanisme proposé, on devra réaliser les travaux suivants [7] :

- Effectuer des visites documentées des lieux (prise de photos, de notes, de dessins, etc.) ;
- Effectuer une recherche pour obtenir des informations techniques disponibles (banque des données géotechniques municipales, cartes de sol existantes, rapports géotechniques ou géologiques des ministères, thèses de recherche universitaire, plans et profils des services municipaux existants, plans de construction des bâtiments existants, photos aériennes des lieux, plans topographiques disponibles, des livres ou des articles pertinents, des journaux sur les événements survenus, etc.). Ce travail de recherche constitue une partie importante d'une expertise géotechnique mais il est souvent absent dans de nombreux cas [9];
- Obtenir les données météorologiques existantes en relation avec le problème en question ;
- Effectuer des travaux de reconnaissance sur le terrain. Ces travaux consistent à arpenter les lieux, à prendre des mesures sur les dommages (fissures, détérioration) existants, à réaliser des sondages géotechniques appropriés avec la pose d'instruments géotechniques, comme le piézomètre pour mesurer le niveau de la nappe, sur les lieux. Ces travaux doivent être réalisés à temps avant que les indices existants soient modifiés, et en respectant les consignes de sécurité sur place ;
- Effectuer des essais de laboratoire sur des échantillons représentatifs prélevés lors des sondages. Ces derniers doivent être conformes aux normes en vigueur ;
- Procéder à d'autres visites ou d'autres arpentages des lieux pour rapporter l'évolution des phénomènes en litige. Dans le cas d'arpentage, il est important que tous les mesures doivent être

rapportées par rapport à un point fixe ou par rapport à une élévation géodésique. Ceci afin de comparer les mouvements absolus enregistrés ;

- Effectuer des calculs et des analyses géotechniques ;
- Élaborer un mécanisme de pathologie conforme aux indices et aux données existantes. Tout mécanisme non vérifié par les données existant risque d'induire les parties en erreur ;
- Rédiger un rapport d'expertise qui abordera les points suivants :
  1. Mandat de l'expertise ;
  2. Historique du problème ;
  3. Données existantes avant l'expertise ;
  4. Données des visites des lieux ;
  5. Travaux de chantier ;
  6. Essais et analyses de laboratoire ;
  7. Essais sur place ;
  8. Données d'arpentage et de mouvements de sol ;
  9. Calculs et analyses effectués ;
  10. Interprétations des données recueillies ;
  11. Recommandations et commentaires ;
  12. Solutions de mitigation proposées, si nécessaires ;
  13. Références bibliographiques techniques utilisées ;
  14. Photos en couleur et croquis annexés au rapport ;
  15. Annexes diverses.

## 2.3 Pathologies typiques des fondations

Les désordres affectant les fondations superficielles sont essentiellement dus à [7] :

- L'altération des matériaux constitutifs des ouvrages de fondation ;
- L'hétérogénéité des terrains, source de tassements différentiels ;
- La déformation excessive des sols sous l'effet des charges apportées par la structure ;

- Défaut de résistance structurale de la fondation : ces défauts apparaissent du fait d'une mauvaise adaptation des dimensions de la fondation aux caractéristiques des sols et aux charges appliquées [11].

Les autres causes de désordres sont des cas particuliers, davantage liés à des phénomènes hydrogéologiques ou telluriques, qui peuvent affecter n'importe quel type de fondation : glissements ou effondrements de terrain (pentes de terrain instables, zones de carrière, inondations, séismes, etc.).

Remarque : Le gonflement ou le retrait des argiles sous l'effet des variations de leur teneur en eau sont les principales causes de désordres observés sur les semelles superficielles. La plupart des désordres relatifs aux radiers sont dus à la présence de couches profondes de terrains compressibles.

### 2.3.1 Altérations des matériaux

Selon l'ancienneté de la fondation superficielle considérée, le matériau utilisé est [7]:

- Pour des fondations superficielles récentes : béton, armé ou non. Les semelles filantes en béton non armé, parfois utilisées pour de petits ouvrages économiques, sont souvent sujettes à la fissuration par suite de tassements différentiels. Cela peut, dans certains cas, entraîner la ruine de l'ouvrage, à l'occasion d'une sécheresse, par exemple [12];
- Pour des fondations plus anciennes : assises ponctuelles ou filantes en pierres simplement appareillées ou liaisonnées par un mortier de chaux. Plus souples que les fondations en béton, elles ont pu, généralement, s'adapter à d'importantes déformations du terrain.

Les altérations affectent le béton, les pierres ou moellons et les mortiers suivant la nature et l'agressivité des agents chimiques présents dans le sol :

- Composés naturels rencontrés dans certains sols : sulfates, sulfures, etc. ;
- Produits chimiques provenant de décharges sauvages ou de fuites de canalisations industrielles enterrées et polluant les nappes phréatiques et les circulations d'eau.

### 2.3.2 Désordres provoqués par les mouvements du sol d'assise

Les désordres provoqués par les mouvements du sol s'assise peuvent être dus au [7] :

- Tassement ou gonflement des matériaux argileux en fonction des conditions hydrogéologiques ;
- Glissement de terrains ;
- Dissolution du sous-sol ;
- Liquéfaction du sol en cas de séisme

### 2.3.2.1 Tassement et gonflement du sol

Les fondations superficielles reposent en effet sur trois types de terrains [1] :

- Argileux (limons argileux ou argiles sableuses) ; ils supportent la plupart des fondations superficielles ;
- Rocheux ou graveleux ; ce sont les meilleurs supports, mais leur répartition géographique est moins étendue que celle des précédents ;
- Sableux ; ce sont de bons terrains de fondation s'ils sont protégés des circulations d'eau, qui peuvent entraîner les particules fines et provoquer des tassements.

Les sols argileux gonflants ou rétractables ont la particularité d'augmenter l'ampleur des désordres avec le temps : les fissures qui se propagent dans les superstructures s'ouvrent et se ferment suivant l'humidification ou la dessiccation du sol ; alors que la fermeture est limitée, l'ouverture au contraire augmente saison après saison et peut conduire à la ruine d'un ouvrage. Le phénomène a été particulièrement spectaculaire lors des sécheresses exceptionnelles survenues en France en 1960 et depuis 1989, avec des périodes apparentes de repos.

Un cas particulier de tassement, plus délicat à observer, est dû au rabattement des nappes phréatiques par pompage, qui entraîne un assèchement des terrains auparavant saturés d'eau en permanence [13].

Remarque : Le phénomène inverse a été particulièrement observable à Paris où, à partir de 1969, les pompages industriels ont été progressivement supprimés et où de grands travaux souterrains ont été entrepris pour les infrastructures de transport. D'un quartier à l'autre, les amplitudes de variation des niveaux des nappes diffèrent de plusieurs mètres. En voie de stabilisation depuis quelques années, ce phénomène a eu des conséquences importantes sur les ouvrages enterrés tels que les sous-sols et les parkings, qu'il a fallu protéger au moyen d'injections et de cuvelages.



Figure 2.1. Fondations sur dénivelé [7]



Figure 2.2. Fondations sur sol compressible [7]



Figure 2.3. Assèchement de l'argile [7]



Figure 2.4. Argile molle [7]

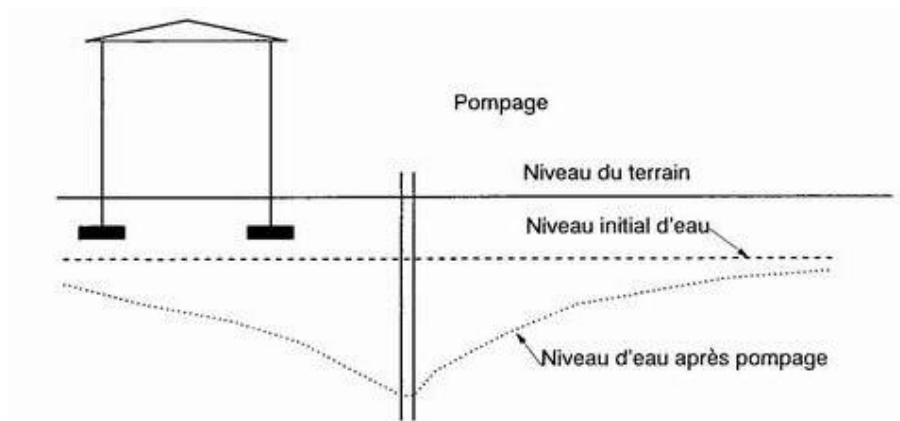


Figure 2.5. Rabattement de nappe par pompage [14]

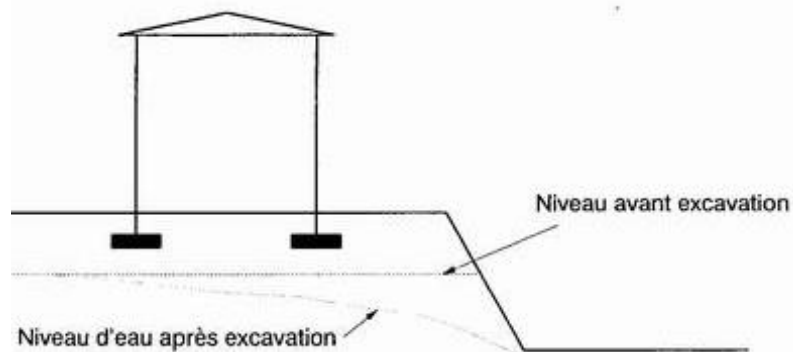


Figure 2.6. Rabattement de nappe par excavation [14]

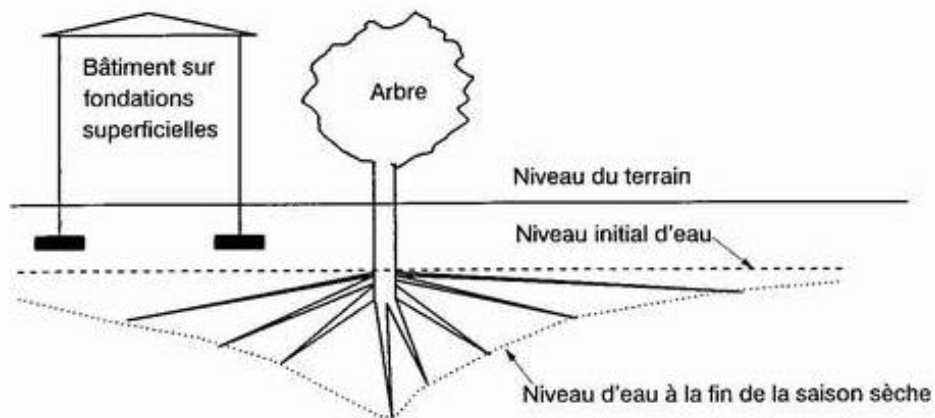


Figure 2.7. Rabattement de nappe par présence d'arbres [14]

Le comportement du sol dépend à la fois de sa nature et de son état de compacité. Il se traduira suivant les cas par des tassements faibles ou importants, égaux ou inégaux qui seront plus ou moins acceptés par l'ouvrage. Ce dernier les supportera s'il est souple (figure 2.8.a), il souffrira s'il est raide et fragile (figure 2.8.b), il les uniformisera s'il est à la fois raide et résistant (figure 2.8.c). Mais un tassement excessif (figure 2.8.d) ou inégal (figure 2.8.e) sera nuisible, sauf en cas exceptionnels qui feront l'objet de curiosité (figure 2.8.f).

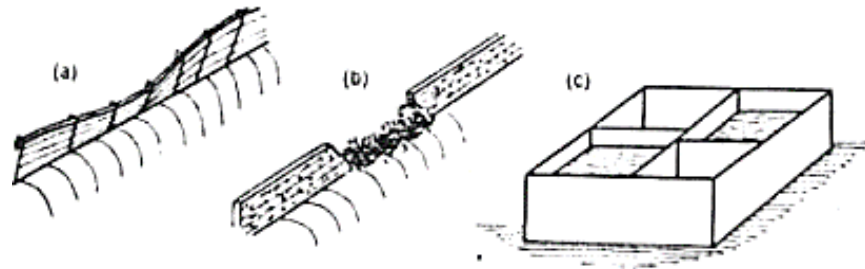


Figure 2.8. a. Mur de clôture en béton préfabriqué/ b. Mur de clôture en maçonnerie/ c. Cuves sans couverture [5]

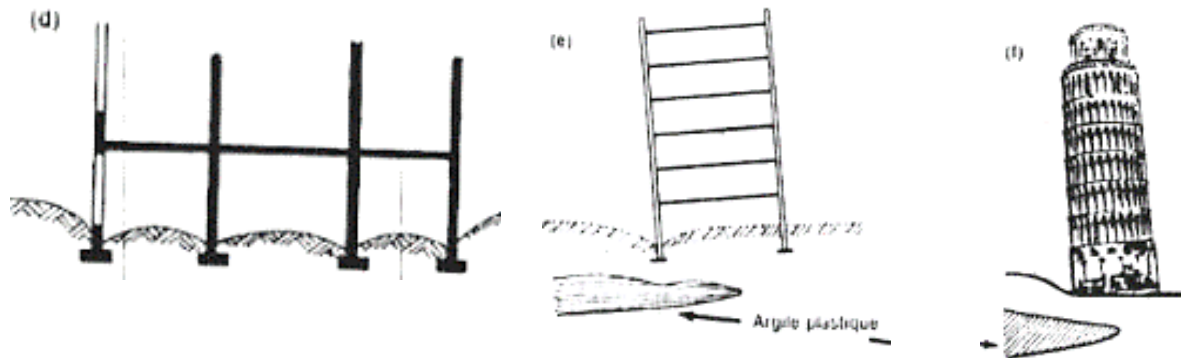


Figure 2.9. d. Bâtiment sur sol homogène très compressible/ e. Bâtiment sur sol hétérogène/ f. Tour de pise [1]

Dans la grande majorité des cas, l'ouvrage est raide et de résistance insuffisante, et les désordres sont évidemment d'autant plus importants que l'hétérogénéité des tassements est grande. Les mécaniciens des sols évaluent généralement le tassement dans un terrain de nature homogène à l'aide d'une formule du genre [3]:

$$T = t \cdot f \cdot P \frac{(1-\nu^2)}{E} \sqrt{A}$$

t : coefficient du terrain,

f : coefficient de forme de la semelle,

P : charge appliquée sur la semelle,

$\nu$  : coefficient de Poisson,

E : module d'Young,

A : section de la semelle,

T : tassement.

Si  $\sigma = P / A$ , la formule peut s'écrire :

$$T = t \cdot f \cdot \frac{(1-\nu^2)}{E} \cdot \sqrt{\sigma} \cdot \sqrt{P}$$

Les enseignements tirés de ces formules sont :

Sur un même terrain, pour une même valeur de  $\sigma$ , deux semelles semblables de même profondeur tasseront proportionnellement à  $\sqrt{P}$  ou de  $\sqrt{A}$ .

Pour une même charge, le tassement dépend par 'P de la forme de la semelle. En effet, l'étalement latéral des charges est lié au périmètre. Sur la figure 2.10, la charge P appliquée sur l'aire «  $9a^2$  » trouve un étalement latéral le long du périmètre «  $20a$  » sous la semelle longue et seulement «  $12a$  » sous la semelle carrée. Cette dernière tassera légèrement plus que la semelle longue.

Nous pouvons conclure que même en terrain homogène, bien des problèmes se posent : Si l'on dimensionne des semelles de même forme proportionnellement aux charges qu'elles supportent, c.à.d. pour une même contrainte sur le sol, les tassements ne seront pas uniformes, mais presque proportionnels aux charges.

Pour assurer le même tassement, il faudrait donc surdimensionner les plus grandes semelles, ce qu'on ne fait pas généralement [3].

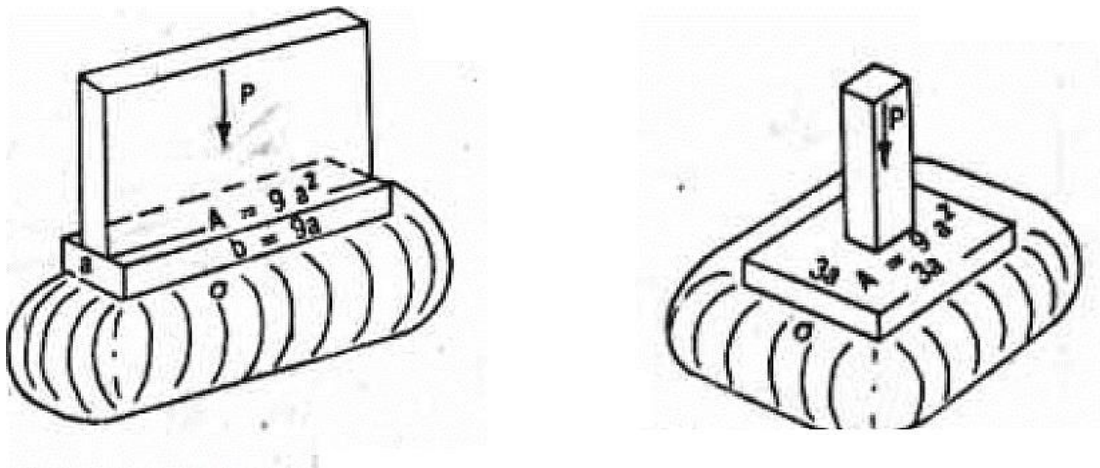


Figure 2.10. Chargement identique sur semelle différentes [8]

### 2.3.2.2 Terrains sensibles à la sécheresse

Outre leur propension à tasser sous la charge apportée par les fondations, les sols argileux sont très sensibles à la sécheresse. En France, particulièrement depuis 1989, ces phénomènes de sécheresse ont affecté autant les ouvrages légers, comme les maisons individuelles, que les ouvrages plus lourds ou plus anciens.

Le principe est le suivant : les sols de fondation argileux se rétractent progressivement de l'extérieur vers l'intérieur de l'ouvrage, jusqu'à se décoller de la sous-face des semelles ; il en résulte un porte-à-faux de la fondation qui, tassant de façon différentielle, provoque des fissures dans la structure. S'ensuivent des désordres progressifs conduisant parfois à la ruine de l'ouvrage (figure 2.11) [7].

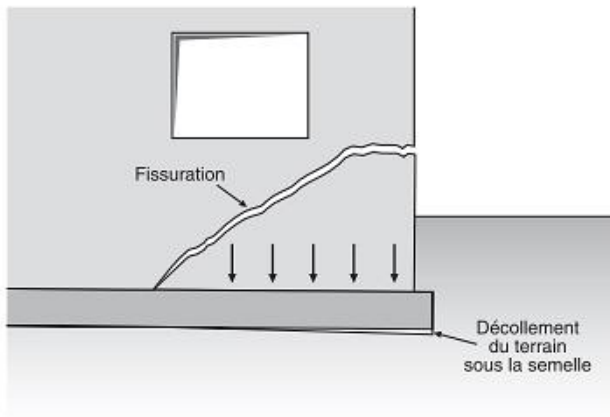


Figure 2.11. Tassement et fissurations liés à la sécheresse [7]

Les mesures à prendre sont de deux ordres : curatif ou préventif [7].

#### 2.3.2.2.1 Mesures curatives

Dans la majorité des cas, le traitement est une reprise en sous-œuvre des fondations, par puits ou par micropieux [15]:

- Les puits n'impliquent pas de modifier les fondations, mais doivent être descendus à un niveau qui n'est plus sensible aux phénomènes de dessiccation ou de réhumidification ;
- Les micropieux imposent généralement de renforcer les fondations afin d'assurer la liaison et le transfert des charges.

Remarque : Le renforcement des fondations est pratiquement obligatoire pour les maisons individuelles dont les semelles filantes sont insuffisamment armées pour assurer le transfert des charges sur les micropieux.

Le béton de sol (jet grouting) ou les inclusions solides sont réservés aux ouvrages importants.

Les injections de coulis de ciment ou de résine sont à proscrire parce qu'elles sont inefficaces dans les sols argileux.

### 2.3.2.2.2 Mesures préventives

Les dispositions constructives courantes sont les suivantes :

- Le drainage des eaux de circulation saisonnières ; ces drainages doivent être éloignés de quelques mètres suivant la profondeur des semelles (figure 2.12) ;
- La réalisation d'une forme étanche au pourtour de la construction (figure 2.13), au moyen d'une géomembrane présentant une pente vers l'extérieur et dissimulée sous de la terre végétale ;
- Les dallages extérieurs constituent une excellente protection ;
- L'enlèvement ou l'éloignement des arbres, grands consommateurs d'eau et à l'origine de nombreux désordres (figure 2.14) ; la règle est de respecter une distance minimale entre la plantation et les fondations égale à une fois et demi la hauteur de l'arbre adulte ; on peut conserver les vieux arbres en créant un écran anti racines vertical.

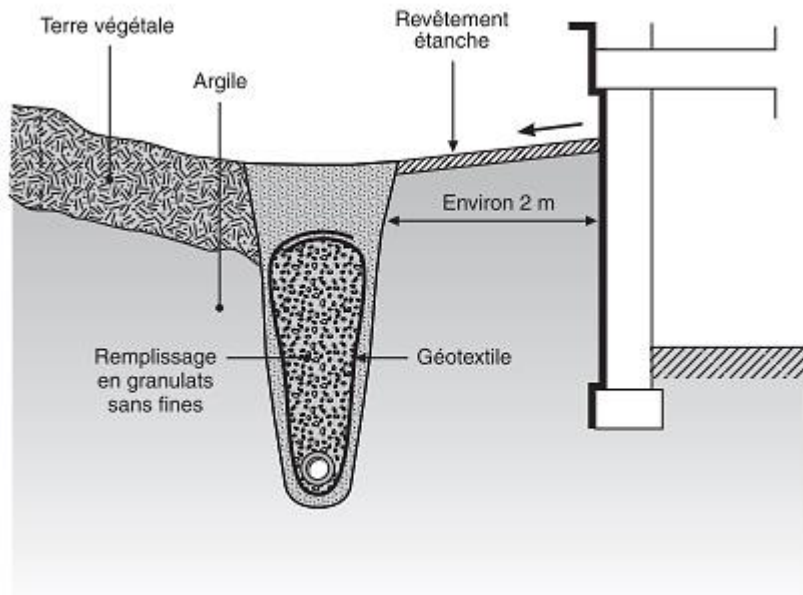


Figure 2.12. Dispositif de drainage des eaux de circulation saisonnières [15]

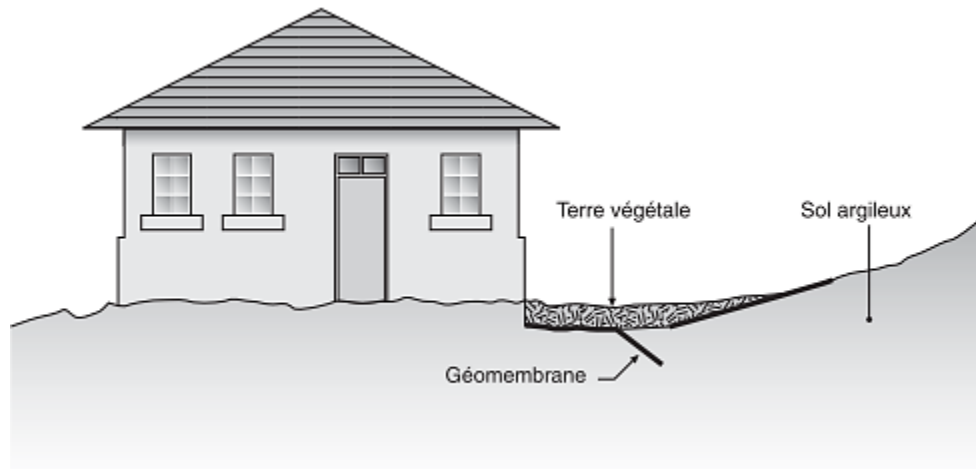


Figure 2.13. Protection d'une construction par géomembrane [15]

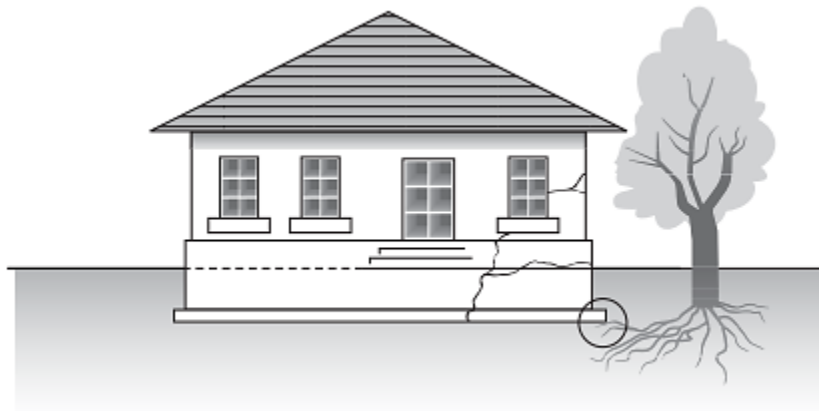


Figure 2.14. Incidence de la proximité des arbres sur les constructions [15]

### 2.3.3 Charges supplémentaires

Le troisième type de désordres est celui des fondations superficielles d'ouvrages soumis à des charges non prises en compte à l'origine. Au fil du temps, ces sollicitations supplémentaires peuvent engendrer des désordres dus à des tassements différentiels incompatibles avec la structure et la résistance de l'ouvrage [14].

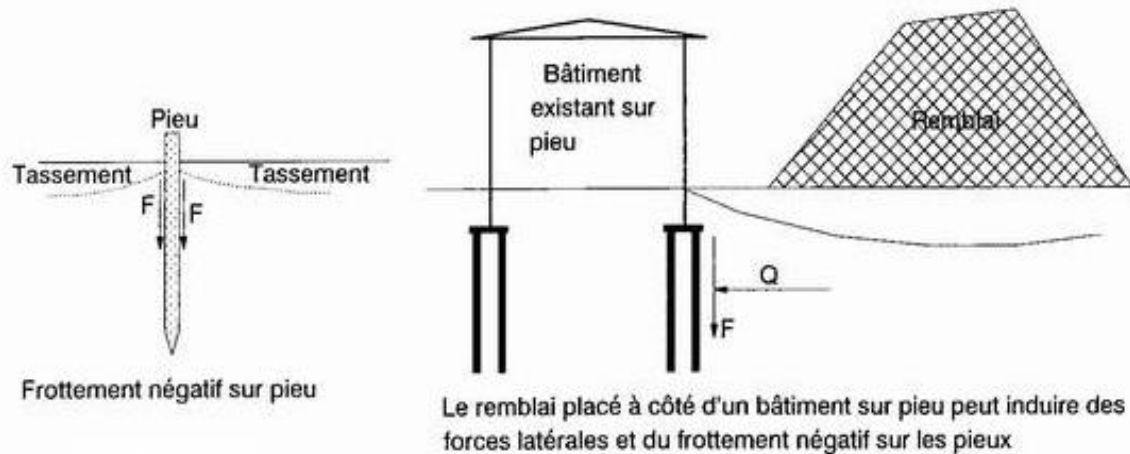


Figure 2.15. Chargement supplémentaire par remblai [14]

### 2.3.4 Charges inégales

Le tassement entre deux niveaux de chargements différents est de type différentiel. Il provoque des désordres importants au niveau de la superstructure (figure 2.16) [14].

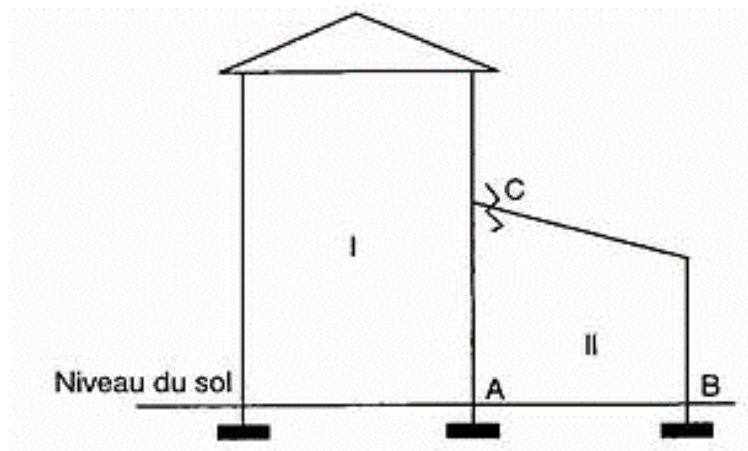


Figure 2.16. Charges inégales [14]

### 2.3.5 Agressions des fondations

#### 2.3.5.1 Sulfate de Calcium

Le plus répandu des agents responsables d'agression est le sulfate de calcium ( $\text{CaSO}_4$ ). Il provient généralement de la dissolution de gypse naturel, et véhiculé vers la fondation par les eaux de ruissellement. Le sulfate de calcium se combine avec la Céliste ( $\text{C}_3\text{A}$ ) présente dans le ciment pour former le sel de Candlot. La formation de ce composé s'accompagne d'un fort taux de gonflement qui fait éclater le béton. Les fondations sont en contact de milieux pouvant être agressifs à leur égard ; elles doivent être conçues en conséquence [7].



Figure 2.17. Fissures par sulfatation du béton [7]



Figure 2.18. Sulfatation du béton [7]

#### 2.3.5.2 Eau de mer

L'eau de mer et notamment les eaux chlorées attaquant la chaux libre au sein du Ciment ainsi que les armatures dont elles accélèrent la corrosion.

#### 2.3.5.3 Eaux pures

Les eaux pures (eaux de pluie, de fonte des neiges,...) tendent à dissoudre la chaux libre en rendant le béton poreux engendrant la réduction de ses qualités mécaniques.

#### 2.3.5.4 Eaux thermales

Les eaux thermales chargées d'acide carbonique, les eaux résiduaires des sucreries et généralement les déchets acides dans le cas de la proximité d'une zone industrielle, attaquent lentement la basicité du ciment durci.

On voit bien l'intérêt de connaître le milieu dans lequel se trouve la fondation. En cas de doute, il est prudent d'utiliser des matériaux résistants aux eaux agressives [7]:

- Granulats siliceux ou de calcaire dur ;
- Ciments non basiques (riches en laitier ou prise mer,...).

### 2.3.6 Erreurs d'exécution

- Une détérioration du fond de fouille : l'utilisation de gros engins de terrassement possédant des godets à dents grattent souvent la surface du fond de fouille ; il faut par conséquent la recompacter. Aussi, une exposition trop prolongée du fond de fouille aux intempéries, le ramollit en surface et implique soit une surprofondeur soit un recompactage ;
- Une mauvaise implantation des repères induisant des excentrement supérieurs à ceux tolérés (2 à 3 cm) ;
- Un mauvais positionnement des armatures soit en les posant sans cale sur le béton de propreté qui est un béton médiocre et poreux. L'acier se trouve ainsi sans protection contre l'humidité plus ou moins agressive du sol ; soit en inversant le ferrailage ;
- Le béton des semelles doit être compact et correctement dosé pour ne pas devenir, par sa porosité, le siège de cheminements d'eau qui dissoudraient progressivement les constituants de son ciment durci ;
- Un mauvais bétonnage ; coulées de terre se retrouvant prisonnières dans la semelle qui en détruisent la résistance à cet endroit ;
- Un mauvais remblaiement en radier échelonné pouvant engendrer le fluage des zones en place. Les remblais A doivent être pleins et compactés (figure 2.19) [1].

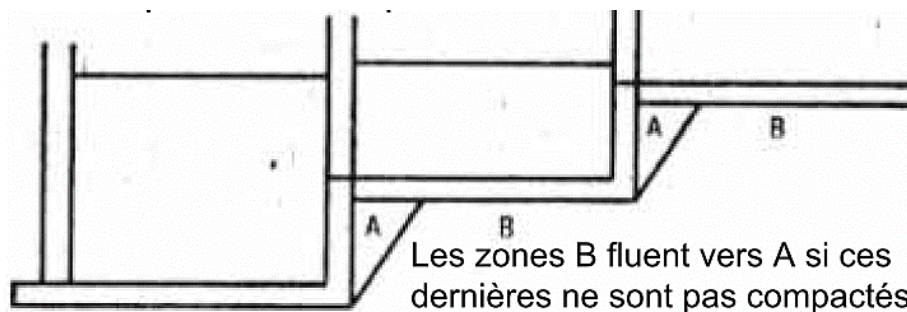


Figure 2.19. Exécution de remblais [1]

### 2.3.7 Insuffisance de la capacité portante



Figure 2.20. Fissures en escalier suite à un défaut de portance du sol [6]

Sur l'exemple traité (figure 2.20), des micros fissures en escalier apparaissent progressivement autour des fenêtres. Les premières durant la première année (l'année d'achèvement des travaux). Les dommages sont mis en observation car ces microfissures, minimes au début, semblent évolutives. Les fissures s'agrandissent avec des répliques sur les ouvertures adjacentes et les doublages intérieurs. Un défaut d'assise est suspecté [6].

Les investigations sont menées par réalisation de sondage manuel sur la semelle. Les résultats présentent une fondation correctement dimensionnée avec une épaisseur de 30cm, un débord de 18cm, un léger fruit de la face extérieure de la semelle et une cage de ferrailage avec 6HA7. Les pénétromètres de l'étude de sol après sinistre montrent qu'à 80cm, la fondation n'est pas ancrée dans un sol assez porteur. Les tassements consécutifs de la prise d'assise différentielle ne sont pas supportables par la structure classique d'une maison. Les fissures apparaissent.

Les solutions préconisées visent un approfondissement de fondation par micropieux ou amélioration de sol par injection. Lors de la conception les fondations auraient dû être ancrées à 1,30m de profondeur sur une couche de sol apte à supporter les charges amenées par la maison. Pour cela, une étude de sol réalisée en période défavorable (humide) aurait déterminé la couche de sol portante [6].

### 2.3.8 Méfaits de l'eau

Si un ouvrage a été construit en méconnaissance du niveau des plus hautes eaux [3] :

- Elles peuvent envahir les sous-sols, en démolissant les dallages trop imperméables par effet de sous pression ;
- Imprégnation du sol de fondation, détériorant parfois sa force portante et provoquent ainsi des tassements anarchiques ;

- Aussi, l'eau de pluie ruisselle sur les pentes et s'infiltre plus ou moins lentement suivant la perméabilité des couches superficielles. On lutte efficacement contre les eaux de ruissellement par un circuit de drainage, à la condition qu'il fonctionne tant tout au long de son parcours qu'à son exutoire. Parmi les autres méfaits des eaux de ruissellement et non des moindres, citons les glissements de terrain et le déversement des murs de soutènement ;
- Les fuites d'eau des réseaux d'alimentation en eau potable (A.E.P) et d'assainissement peuvent être des causes d'affouillement et d'imprégnation en permanence du sol de fondation provoquant la perte de la force portante et tassements. Dès lors, la canalisation est souvent entraînée dans le mouvement ; elles s'ouvrent et fuit davantage et personne n'est plus capable de dire si le sol a tassé à cause de la fuite ou si la canalisation s'est rompue par suite de tassement ;
- Les argiles ont la propriété de pouvoir renfermer des quantités d'eau appréciables qui ont pour effet de modifier leur force portante, mais aussi pour certaines de les faire gonfler. La dessiccation produit l'effet inverse et peut conduire à des tassements.

### 2.3.9 Mitoyenneté : interaction des constructions voisines

La semelle d'un bâtiment nouveau fait tasser sa voisine par interférence des deux bulbes de pression. Le sol se comporte, en effet, comme sous une semelle unique plus large et plus chargée et même à contraintes égales, le tassement croît avec la largeur.

La figure (2.21) montre que la première semelle  $S_1$  tasse de  $t_1$  sous le poids de son mur. Au cours du chargement de la semelle  $S_2$ , celle-ci subit un tassement  $t_2$  inférieur à  $t_1$  ; mais  $S_1$  subit un supplément de tassement  $t'_2$  [1].

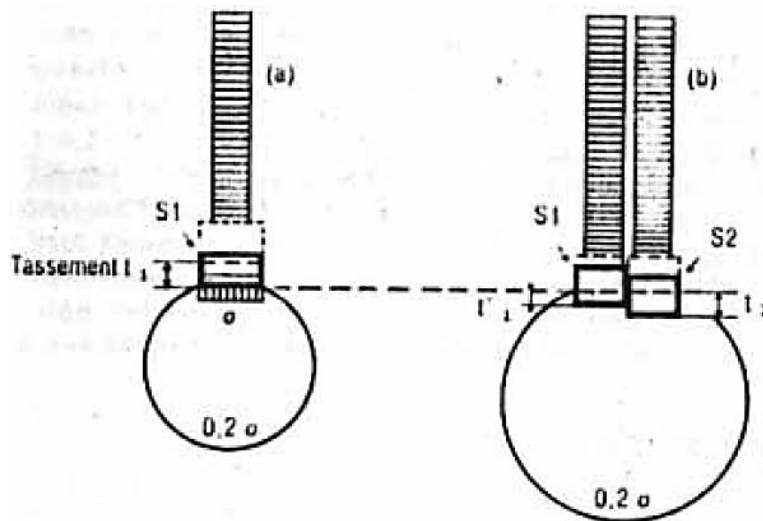


Figure 2.21. Effet de la mitoyenneté [1]

Il est déconseillé de réaliser une semelle excentrée près d'un mitoyen sous prétexte que la place manque pour la centrer sous le mur : on risque son basculement suivi de graves désordres dans le bâtiment.

Si un excentrement notable est obligatoire, il convient de choisir l'une des deux solutions suivantes [3]:

- Réaliser un ensemble semelle-mur en béton armé dont l'angle résistera au moment de flexion matérialisé par  $M = F \cdot e$
- Relier la semelle à des poutres de redressement.

Dans le cas de bâtiments mitoyens, il faut avoir des fondations au même niveau de profondeur. De ce fait, si :

Les anciennes fondations sont superficielles et les nouvelles plus profondes, il faut rallonger les anciennes jusqu'au niveau des nouvelles (figure 2.22) ;

Les anciennes fondations sont profondes et les nouvelles fondées plus haut, il faut ajouter un support aux nouvelles descendant jusqu'au niveau des nouvelles (figure 2.23).

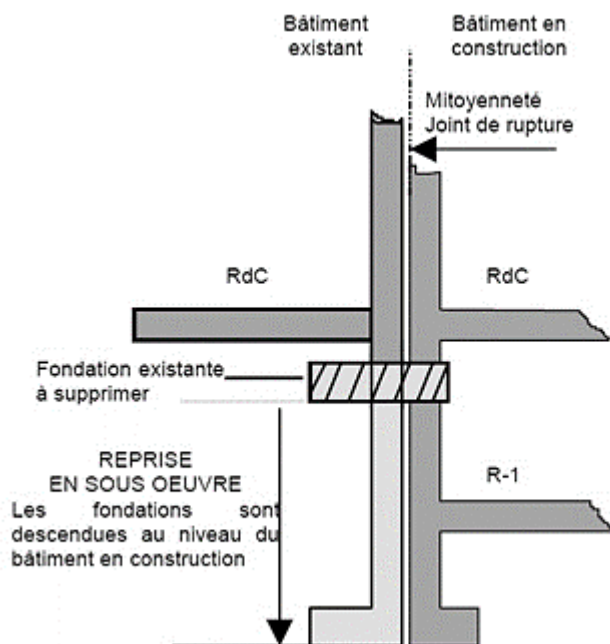


Figure 2.22. Fondations superficielles du bâtiment existant

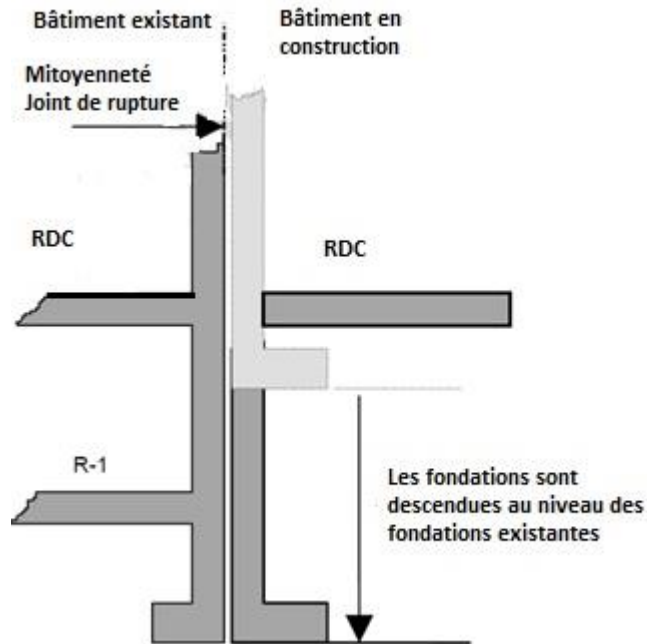


Figure 2.23. Fondations profondes du bâtiment existant

### 2.3.10 Causes diverses

D'autres causes de pathologies peuvent être évoquées [3]:

- Soulèvement dû au gel du sol (figure 2.24) ;
- Approfondissement de sous-sol et reprise en sous-œuvre ;
- Hétérogénéité de fondation (fondations ne sont pas d'un même type) ;
- Hétérogénéité des sols de fondation ;
- Battage des pieux ;
- Construction sur un remblai non contrôlé et attaque de structure par la réaction chimique avec le remblai (corrosion d'acier et sulfatation de béton, etc...) ;
- Présence de services souterrains déficients ou des défauts du sous-sol ;
- Drains bouchés par des débris et racines ;
- Colmatage par ocre ferreux (figure 2.26) ;
- Colmatage par des sédiments ;
- Drains déficients ;
- Détérioration de béton et mélange des anciens bétons des murs de fondation et leur résistance ;
- Dégradation et corrosion bactérienne des matériaux ;
- Causes structurelles.

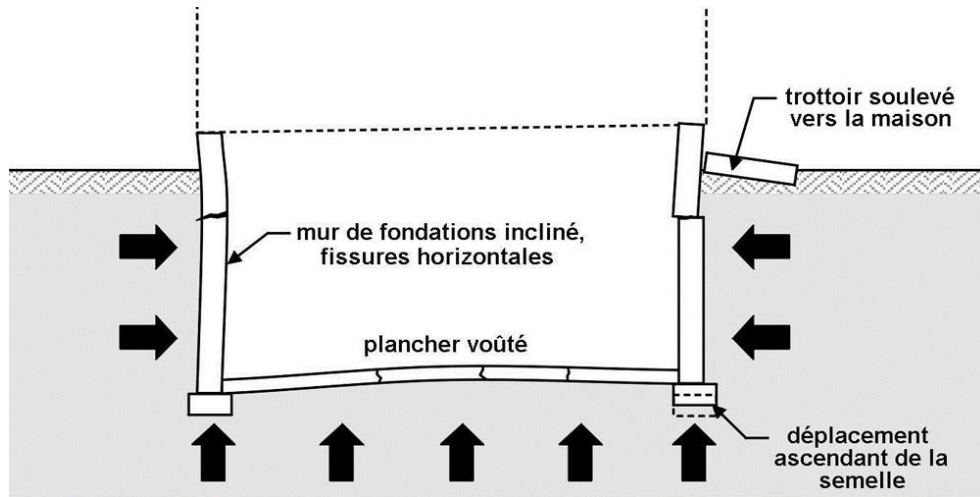


Figure 2.24. Soulèvement des fondations par effet de gel [16]



Figure 2.25. Liquéfaction du sol lors du séisme de Nigata au Japon 1967 [1]



Figure 2.26. Colmatage de drain par ocre [7]

## 2.4 Méthode de résolution d'une pathologie de fondation

1. Un problème à la fois ;
2. Définir clairement le problème ;
3. Ne pas créer des données non nécessaires ;
4. Ne pas créer des données incorrectes et non fiables ;
5. Ne pas avoir de préjugé ;
6. Ne pas poser des questions si vous n'êtes pas prêts à entendre toutes les réponses ;
7. Prévoir tous les scénarios possibles ;
8. Comparer les alternatives et les solutions ;
9. Respecter les concepts des constructions anciennes ;
10. Communications orales ou écrites claires ;
11. Le monde d'aujourd'hui est un monde numérique, essayons de faire autant dans le domaine de pathologie, en quantifiant le comportement des matériaux par des instruments reconnus ;
12. Être critique envers les informations reçues des autres avant de les valider ;
13. Discuter du problème avec ses collègues en respectant la confidentialité ;
14. Être généraliste en connaissant bien chaque sujet ;
15. Être critique envers son propre travail ;
16. Lire la littérature technique ;
17. Être un bon observateur ;
18. Connaître les principes de base de la géotechnique ;
19. Connaître la géologie ;
20. Connaître des études de cas [7].

## 2.5 Réparation et consolidation

Les techniques de réparation et de consolidation des fondations superficielles sont bien connues mais pas toujours correctement maîtrisées. Selon l'origine des désordres, ces techniques concernent Soit les matériaux constitutifs des fondations, soit les techniques de reprises en sous œuvre [6].

## 2.5.1 Réparation des matériaux

### 2.5.1.1 Bétons

Les altérations des bétons de fondation relèvent des techniques classiques de traitement des bétons de structure. Des altérations importantes peuvent conduire à la reprise partielle ou totale des fondations.

Remarque : En cours de travaux, après dégarnissage et nettoyage des fondations, un examen détaillé de la qualité du béton et de la bonne conservation des aciers (absence de corrosion) est indispensable afin de juger de la pertinence de la solution envisagée.

### 2.5.1.2 Mortiers

Les mortiers dégradés, en particulier les anciens mortiers à la chaux, peuvent être traités par des injections de silicates (ou de coulis de ciments surfillerisés), dosés de manière à garantir leur stabilité dans le temps. L'exécution de ces injections est délicate : il faut éviter d'aggraver les dégradations par effet de vérin. Une zone d'essais doit impérativement être réalisée avant le début des travaux [15].

## 2.5.2 Techniques de reprise en sous-œuvre

Les désordres dus au terrain sont traités par des reprises en sous-œuvre, propres à la géotechnique. Elles permettent :

- De s'affranchir des mouvements des sols tels que tassements, gonflements, fluage, etc. ;
- D'augmenter la capacité portante des fondations, si nécessaire.

Les techniques sont nombreuses, entre autres :

- Les puits ;
- Les micropieux ;
- Le béton de sol (jet grouting) ;
- Les injections solides ;
- Les injections de fissure ou de comblement.

Toute reprise en sous-œuvre conduit à des reports de charges à des niveaux d'assise différents des niveaux initiaux. Les contraintes se trouvent redistribuées différemment dans la structure, ce qui peut entraîner de nouvelles fissures – néanmoins sans comparaison avec les dommages initiaux [15].

Remarque : Pour éviter de nouvelles fissures, la règle élémentaire des reprises en sous-œuvre est d'attendre ensuite un an, si possible, avant d'engager les travaux de rénovation des façades et des intérieurs.

#### 2.5.2.1 Puits

C'est la solution la plus simple et la plus classique, lorsque le terrain s'y prête, pour conforter des semelles superficielles. Le principe consiste à reporter le niveau d'assise à une plus grande profondeur, soit pour trouver un sol plus résistant, soit pour atteindre un niveau moins affecté par les variations d'humidité. Sous la semelle, on réalise une excavation par parties jusqu'à un niveau où les caractéristiques du sol sont jugées acceptables. Cette excavation est comblée de béton, qui reporte ainsi les charges de la semelle à une plus grande profondeur. Cette solution impose en général l'absence de nappe phréatique, et la profondeur reste limitée à quelques mètres. Pour les semelles filantes, on réalise soit [15]:

- Des puits jointifs de façon alternée ;
- Des puits isolés reliés par des longrines en béton armé reprenant les charges de la semelle comme illustré sur la figure 2.27.

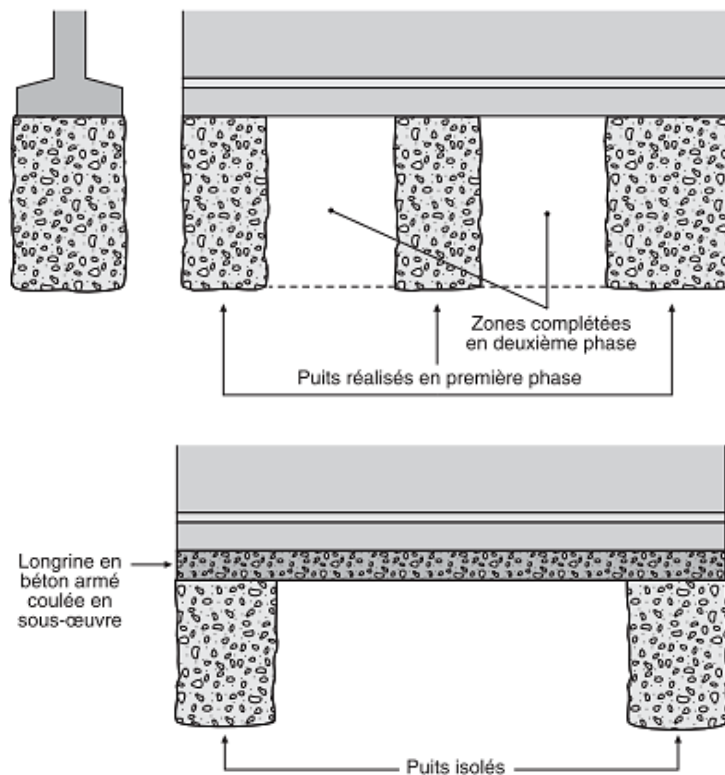


Figure 2.27. Reprise en sous- œuvre par puits [15]

### 2.5.2.2 Micropieux

Les micropieux sont des pieux d'un diamètre inférieur à 250 mm, constitués soit d'un tube, soit d'une armature métallique liaisonnée à la fondation et ancrée dans le terrain par un coulis de ciment. Cette solution transforme la fondation superficielle en fondation profonde. Les micropieux sont disposés de part et d'autre des fondations d'origine, de manière à obtenir une symétrie dans le transfert des charges (figure 2.28). Ils transmettent les charges au terrain par frottement latéral. Leur longueur est très variable et peut atteindre plusieurs dizaines de mètres dans des cas particuliers. Seule une entreprise spécialisée peut réaliser ces travaux [15].

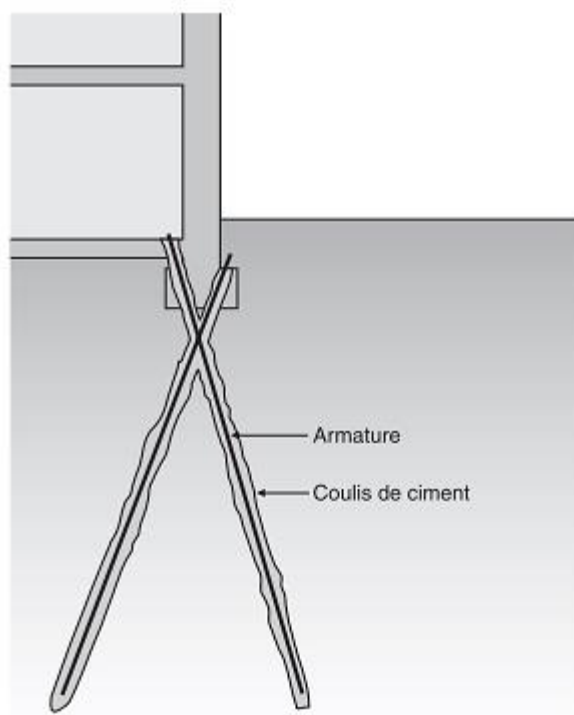


Figure 2.28. Reprise en sous-œuvre par micropieux [15]

### 2.5.2.3 Béton de sol (jet grouting)

Le béton de sol, dit jet grouting, est une technique relativement récente, d'exécution délicate (figure 2.29). Le principe consiste à injecter dans un forage, sous très forte pression, un coulis de ciment qui déstructure le terrain et crée une colonne de sol-ciment (béton de sol). La colonne de forme irrégulière est exécutée par passes remontantes jusqu'à la sous-face de la fondation défaillante. Seule une entreprise hautement spécialisée peut maîtriser la technique pour éviter des désordres dus aux effets de *claquage* et de *vérinage* dans le terrain. C'est une technique irremplaçable, en particulier sous les vieux ouvrages lorsque les solutions classiques ne sont pas applicables [15].

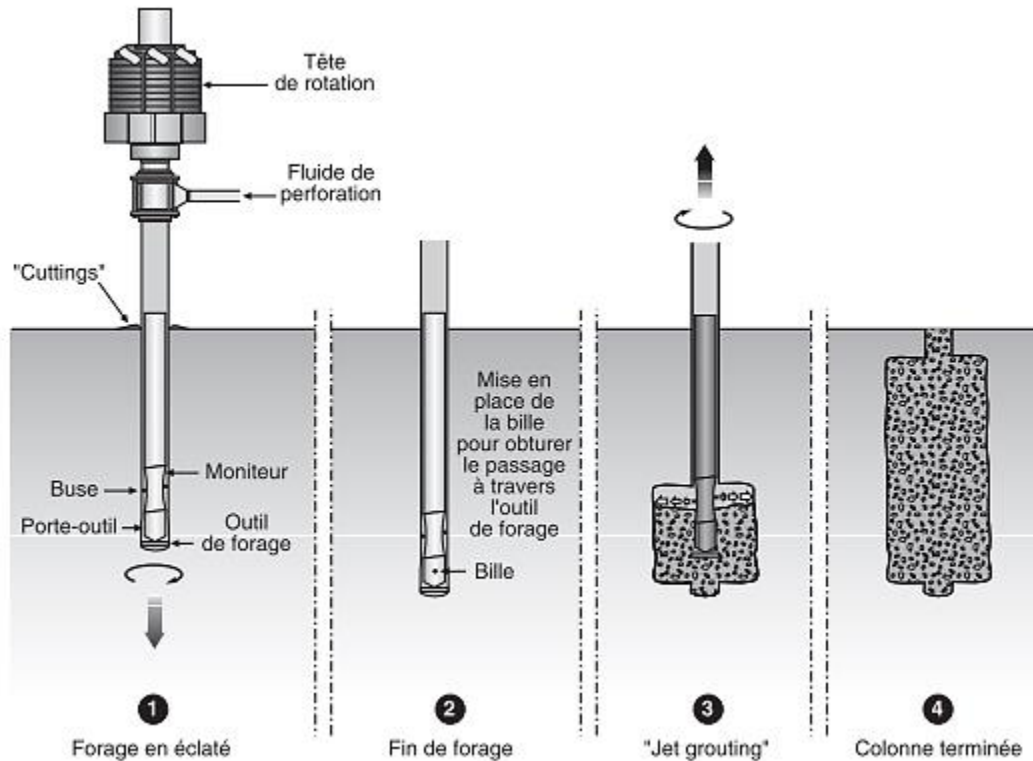


Figure 2.29. Reprise en sous-œuvre par jet grouting [15]

Remarque : Claquage : brusque déstructuration du sol sous l'effet des pressions d'injection des coulis de ciment ou de résine, lorsqu'elles ne peuvent pas se dissiper instantanément dans les sols (cas des sols argileux). Ces pressions peuvent atteindre 400 à 450 bars dans le cas du jet grouting.

#### 2.5.2.4 Injections solides

L'injection solide consiste à réaliser un petit pieu avec un mortier de ciment mis en place dans un forage par passes remontantes jusqu'à la sous-face de la fondation superficielle.

A la différence du procédé précédent, le mortier a une composition particulière qui lui permet de comprimer latéralement le terrain sans le pénétrer, d'où son autre appellation de compactage statique horizontal. Il est aussi employé pour les reprises en sous-œuvre des dallages [15].

#### 2.5.2.5 Injections de fissure ou de comblement

Souvent utilisée pour le confortement des radiers, l'injection de fissure ou de comblement consiste à introduire par des forages dans le sol, un coulis de ciment ou de résine qui consolide le terrain par remplissage, donc améliore ses caractéristiques mécaniques. Ce principe simple repose sur deux notions : les vides et la pression [15].

#### 2.5.2.6 Vides

On ne peut remplir un terrain que si celui-ci présente des vides, dus soit à sa nature (sables, graviers, par exemple), soit à des dissolutions (gypse, par exemple).

Les grands vides d'anciennes carrières non repérées au moment de la construction de l'ouvrage font partie des cas traités par ce type d'injection. L'injection de terrains mous (limons saturés ou tourbes par exemple), provoque des claquages du sol, qui sont dangereux pour les ouvrages et n'apportent pas d'amélioration [15].

#### 2.5.2.7 Pression

Traiter les vides nécessite d'appliquer une certaine pression, ce qui implique une réaction équivalente du terrain. A l'approche de la surface du terrain, le sol n'offre pratiquement plus de réaction, la pression est alors créée par les fondations existantes. Cette situation nécessite une grande maîtrise de la technique afin d'obtenir des résultats satisfaisants et d'éviter tout désordre dans les structures [15].

Remarque : Les injections de coulis de ciment, ou de résine, sont employées en reprise en sous-œuvre des dallages, voire pour leur remise à niveau, dans certains cas.

## 2.6 Principes géotechniques

L'interaction sol/structure impose le respect des cinq principes géotechniques suivants, applicables à tout mode de fondation [15].

### 2.6.1 Principe n° 1

L'étude géotechnique ne se limite pas à la notion générale de contrainte admissible (ou taux de travail). Le projet de fondation ou de reprise en sous-œuvre doit être établi en tenant compte des capacités d'adaptation des structures et donc des déformations acceptables pour l'ouvrage. L'appréciation des déformations admissibles dépend :

- De la masse et du volume de l'ouvrage ;
- De la grandeur et de la distribution des charges ;
- De la raideur et des limites de la structure.

### 2.6.2 Principe n° 2

La structure et ses charges sont le premier élément nécessaire à la définition d'une fondation.

### 2.6.3 Principe n° 3

On fonde des charges et non des pressions.

Le tassement d'un ouvrage est fonction de la charge totale et de ses dimensions (zone d'influence). En elle-même la déformation n'est pas un critère : elle est en relation avec l'ouvrage (tassement admissible). Le tassement d'un élément de fondation dépend de la charge qui lui est appliquée, qui est elle-même fonction de la rigidité de la structure.

### 2.6.4 Principe n° 4

La rigidité de la structure contribue à reporter les charges sur les éléments les moins déformables.

La structure et le sol s'adaptent par concessions réciproques : le moins souple des deux tend à imposer à l'autre la « déformée » la plus compatible avec sa « raideur ».

### 2.6.5 Principe n° 5

Les fondations sont dimensionnées en fonction des tassements admissibles et du comportement de la structure.

Chaque problème de fondation et donc de reprise en sous-œuvre est un cas particulier. Le même ouvrage implique des solutions différentes suivant les sites considérés.

Recommandations :

L'étude des sols doit être réalisée par un géotechnicien compétent, avec des moyens de reconnaissance adaptés au problème posé. La compétence du géotechnicien est estimée à partir de son expérience du terrain : c'est une profession où la pratique l'emporte souvent sur la théorie.

La théorie est nécessaire pour dimensionner des fondations et analyser leur comportement sous les charges et dans le temps ; mais c'est la pratique qui permet d'orienter un projet et de définir la solution la mieux adaptée. Il est plus facile de modifier une structure qu'un sol de fondation.

## 2.7 Exemples de pathologies de fondations

### 2.7.1 Exemple 1

Le long de bâtiments d'habitation, des arceaux appuyés sur les façades se désolidarisent de celles-ci.

Pour redonner le caractère ancestral à un boulevard dans une ville partiellement détruite par la guerre, l'architecte a réalisé un passage couvert avec structure maçonnée à piles massives et arceaux appuyées sur les nouvelles façades. Les bâtiments à cinq niveaux reposent sur une argile plastique

compressible par des semelles filantes. Aussi, toutes les fondations étaient scrupuleusement dimensionnées pour une contrainte admissible de 1 bar et l'on avait très scrupuleusement dimensionné toutes les fondations à ce taux, y compris les plots P qui portent les piliers du passage couvert. Quelques mois après l'achèvement des travaux, des fissures apparurent dans les tympans au-dessus de l'arceau, parmi les joints de la maçonnerie et entre les voussoirs. Il fallut en démolir et reconstruire un bon nombre [5].

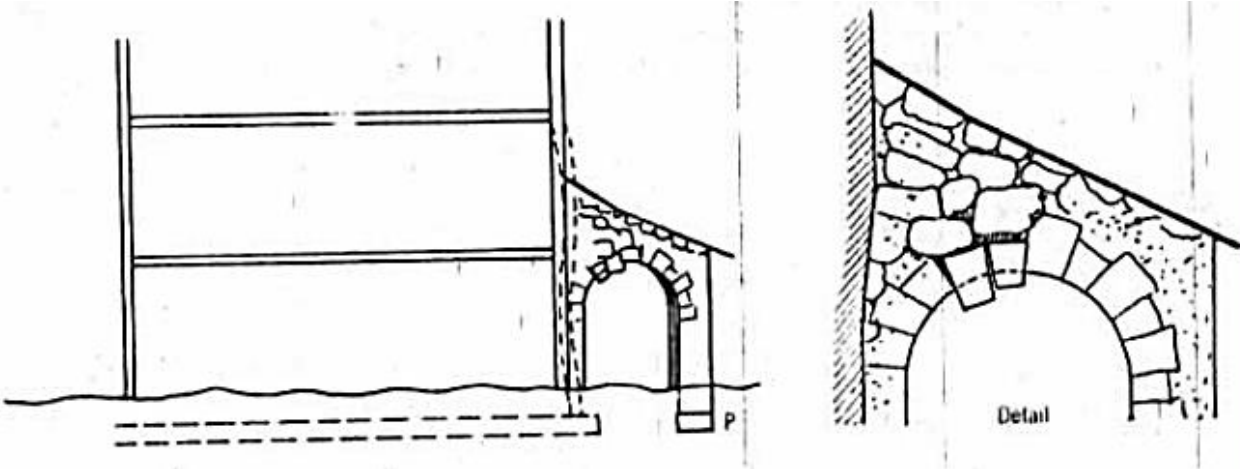


Figure 2.30. Bâtiment d'habitation et passage couvert en maçonnerie [5]

#### 2.7.1.1 Causes

Il est généralement difficile de suivre le tracé des fissures dans une maçonnerie de moellons. Cependant la dislocation montrait un cisaillement d'allure verticale, causé par un tassement différentiel entre les piliers et les bâtiments, ceux-ci ayant tassé davantage. Le phénomène fut expliqué malheureusement trop tard- par le calcul des tassements respectifs des arcades très légères et des bâtiments.

#### 2.7.1.2 Moralité

En terrain compressible, l'égalisation des tassements est primordiale surtout pour des ouvrages mal chaînés.

D'autre part sous charges égales, deux semelles identiques tassent différemment si leur profondeur d'enfouissement est différente. La semelle moins profonde tasse relativement plus. Méconnaître ce fait pour les constructions mal chaînées est la cause de fréquents désordres [5].

### 2.7.2 Exemple 2

Un groupe de pavillons se fissurent en façade et dans leurs cloisonnements intérieurs.

Il s'agit d'un lotissement où chaque pavillon est à rez-de-chaussée et comble aménageable avec sous-sol partiel à usage de garage où on accède de la rue par une rampe. Les murs en briques reposent par semelle filante sur une argile légèrement sableuse. Peu de temps après la livraison des premiers pavillons, des fissures apparurent en haut des façades, partant de la sous toiture qui n'avait pas été chaînée et atteignant les angles des baies. A l'intérieur, les cloisons longitudinales présentaient également des fissures au-dessus des portes.

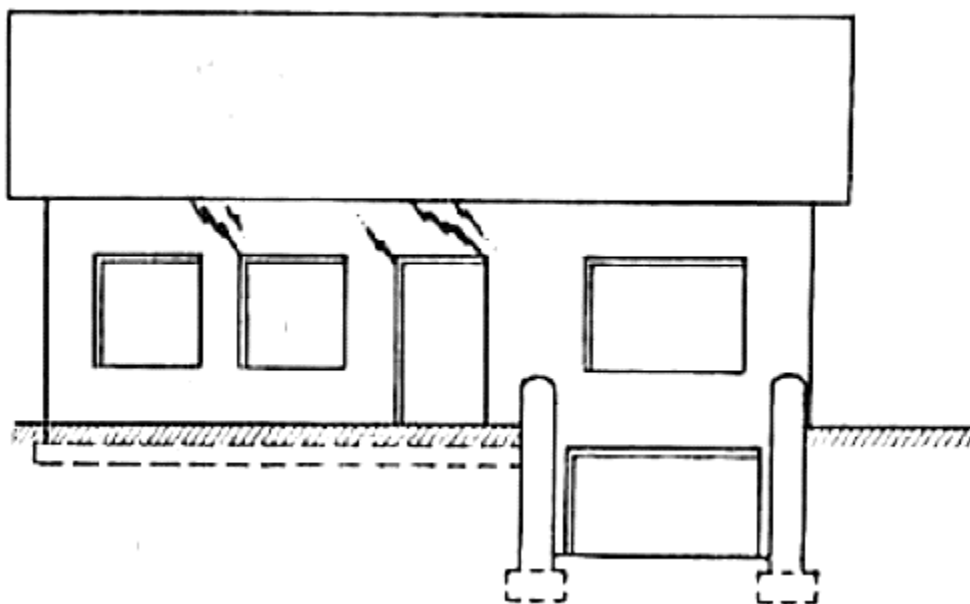


Figure 2.31. Groupe de pavillons [5]

#### 2.7.2.1 Causes

L'allure des désordres montrait un léger basculement de la partie sous-sol, qui avait tendance à tasser plus que l'autre. En effet, d'un côté, les semelles étaient enfouies à environ 60 cm tandis que de l'autre, elles étaient à quelques 3 mètres sous le sol. Le terme de profondeur a produit son effet.

#### 2.7.2.2 Moralité

En terrain compressible, il ne faut construire que des ouvrages équilibrés ; un sous-sol total aurait ici homogénéisé les tassements, raidi les pavillons...et ajouté un espace disponible pour les occupants. Un bon chaînage en tête des murs est également recommandé [5].

### 2.7.3 Exemple 3

Des immeubles se fissurent après la construction d'immeubles mitoyens.

Des fissures d'allure inclinée apparaissaient en façades et cloisons de l'immeuble ancien, au voisinage immédiat de la mitoyenneté, tandis que s'achevait la construction d'un immeuble voisin [5].

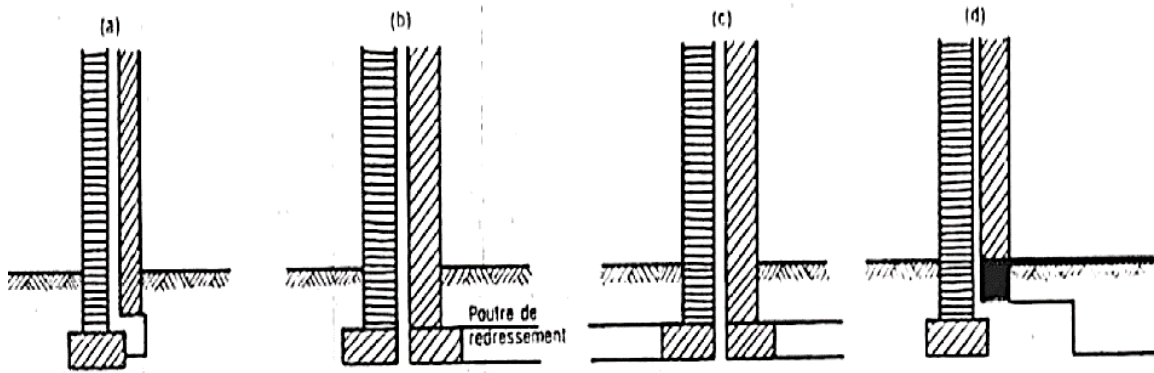


Figure 2.32. Bâtiments mitoyens [5]

### 2.7.3.1 Causes

Assez souvent, la semelle du nouveau mur pignon est solidarifiée avec l'ancienne qui déborde d'une dizaine de centimètres chez le voisin et certains experts y voyaient la cause irréfutable des tassements (figure 2.32.a). Dans certains cas, le débordement de la semelle existante est démoli, et un joint franc est réalisé entre elle et l'autre semelle. Les désordres apparaissent et l'on accuse le voisin, avec quelque raison, d'avoir réduit la surface d'assise et causé, en plus, un excentrement entre la semelle et son mur (figure 2.32.b). Il arrive aussi que sans toucher à l'ancienne fondation, on provoque son tassement sur terrain très compressible et ce à cause de l'interférence de bulbes de pression (figure 2.32.c). La seule solution valable, en mauvais terrain consiste à réaliser une fondation excentrée, assise assez loin de la semelle existante pour éviter les interférences des contraintes dans le sol (figure 2.32.d).

### 2.7.3.2 Moralité

Sous les charges d'un bâtiment, le terrain s'accompagne du tassement de tout le voisinage immédiat [5].

## 2.8 Conclusion

Quelques observations à retenir en fin de ce chapitre à savoir :

- L'inconvénient d'une fondation défectueuse et que ses défauts apparaissent avec le temps après avoir réceptionné le projet où les fondations sont cachées et l'ouvrage est en service ;
- L'expertise géotechnique efficace permet de bâtir un mécanisme de pathologie de fondation compatible avec les indices existants sur les lieux ;
- A défaut de portance du sol, les solutions préconisées visent un approfondissement de fondation par micropieux ou amélioration du sol par injection ;
- La présence d'eau et la variabilité de sa teneur est un des problèmes majeurs en géotechnique.

Le prochain chapitre est centré sur les pathologies des murs de soutènements.

# Chapitre 3

## Pathologies des murs de soutènement

|     |                                                               |    |
|-----|---------------------------------------------------------------|----|
| 3.1 | Introduction .....                                            | 47 |
| 3.2 | Principales causes des sinistres.....                         | 48 |
| 3.3 | Règles à respecter pour construire un mur de soutènement..... | 52 |
| 3.4 | Cas pathologiques.....                                        | 53 |
| 3.5 | Etude de cas .....                                            | 65 |
| 3.6 | Conclusion .....                                              | 69 |

# Pathologies des murs de soutènement

La réalisation de tout projet de constructions est précédée par le choix du site d'implantation. Dans des conditions idéales, le profil du terrain serait quasi-plat ramenant l'étude géotechnique à une vérification de la portance du sol et du critère de tassement. Ce n'est pas toujours le cas car souvent, le relief terrestre amène l'ingénieur à construire sur des terrains en pente où la stabilité des versants doit être assurée par la réalisation d'ouvrages de soutènements, dont le rôle est de prévenir l'instabilité des versants. Mais en dépit de toutes les mesures prises à l'égard de ces derniers, les pathologies ne manquent pas et les sinistres s'accumulent un peu plus chaque année.

A travers ce chapitre, les principales causes des sinistres affectant les ouvrages de soutènement seront abordées ainsi que des recommandations pour leur construction. Des cas pathologiques d'expertises de L. Logeais seront décrits et accompagnés d'études de cas locaux survenus à Saida et Sidi Bel Abbés.

## 3.1 Introduction

Eugène FREYSSINET disait : « il n'y a rien de plus instructif qu'une expérience ratée ». « A condition qu'elle soit bien analysée » pour tirer un maximum de profit concluait Jean Kérisel.

Les murs de soutènement sont des ouvrages géotechniques qui servent à soutenir les terres situées en arrière lorsque leur stabilité est menacée. De ce fait, une étude géotechnique rigoureuse doit être menée pour le dimensionnement de ces derniers afin d'assurer une stabilité correcte vis-à-vis du glissement et du renversement.

Dans la pratique et parfois même sur chantiers, beaucoup de problèmes sont apparus et ont généré des dégâts assez importants entraînant parfois la mort des ouvriers sur place. Une étude statistique concernant les pathologies des murs de soutènement a été réalisée par Louis LOGEAIS recensant un peu plus de quatre cent cas de sinistres contenus dans les archives du Bureau Securitas - Socotec en France [1] où l'on citera quelques exemples d'accidents.

Pour résoudre un problème, il faut d'abord connaître la/les causes, raison pour laquelle on citera les principales causes qui sont à l'origine d'instabilité provoquant des accidents.

## 3.2 Principales causes des sinistres

Si l'on classe les sinistres des murs de soutènement soit par rapport à leur fréquence, soit par rapport aux coûts des travaux de réparation engagés, on trouve les mêmes pourcentages qui sont les suivants, par ordre d'importance décroissante [17] :

### 3.2.1 Sinistres causés par l'eau

Un sinistre sur trois est dû à une mauvaise évacuation des eaux. Le plus souvent, une absence de drainage à l'arrière permet la montée de la nappe et l'accroissement important de la poussée qui en découle. Les dommages se montent à 35% du coût total des sinistres des murs de soutènement.

C'est à dire l'importance du soin à apporter au bon fonctionnement du dispositif d'assèchement : drain et son exutoire ou simples barbacanes [3].

### 3.2.2 Sinistres causés par un mauvais dimensionnement

Un sinistre sur quatre (et 25% des coûts) est dû à une mauvaise appréciation des efforts (poussée et butée du sol) ou sous modification ultérieure de ces efforts. La manifestation la plus courante et la plus coûteuse est un déversement excessif, voire un renversement complet du mur. Un glissement excessif présente beaucoup moins de gravité s'il suffit de stopper la progression du mur et si on peut l'accepter sans trop de gêne à sa nouvelle position.

Un excès de tassement ou un glissement doivent être maîtrisés d'urgence en renforçant le terrain ou en le soulageant de ses surcharges [3].

### 3.2.3 Sinistres dans l'ouvrage

Un sinistre sur quatre (soit 25% des coûts) est dû aux fautes de conception ou d'exécution du mur [3]:

- Rupture à la jonction entre la paroi verticale et la semelle ;
- Fissuration de la poutre de couronnement quand elle existe ;
- Décrochement entre paroi et contrefort.

Ce sont là des sinistres spécifiques à la maçonnerie ou au béton armé.

### 3.2.4 Sinistres dus à une faute dans le déroulement des travaux

10 à 15% sont des sinistres causés par des imprudences dans la conduite du chantier [3]:

- Fouille taillée trop raide et qui s'écroule ;

- Remblaiement prématuré quand le béton ou les joints de maçonnerie n'ont pas encore durci ;
- Compactage excessif du remblai ;
- Chocs d'engins ou de matériels, ...etc.

### 3.2.5 Causes diverses

Les quelques 5% de sinistres restants sont dus à des causes diverses [3]:

- Eaux agressives : les eaux séléniteuses sont fréquentes en présence de certaines couches de sol (sols gypseux ou encore urbaine) ;
- Détérioration du parement extérieur du mur, par suite de l'humidité ambiante ;
- Détérioration des joints de dilatation ;
- Fissurations mineures, ...etc.

Les tableaux suivants illustrent les trois cas :

Tableau 3.1 Classification des causes de sinistres en fonction du type du mur [1]

| CLASSIFICATION EN FONCTION DU TYPE DU MUR |      |                                          |      |
|-------------------------------------------|------|------------------------------------------|------|
| Murs censés être autostables [2]          |      | Murs non naturellement autostables       |      |
| 80 % des cas de sinistres                 |      | 20 % des cas de sinistres                |      |
| Murs poids ou gravitaires [3]             | 84 % | Murs de sous-sols enterrés               | 90 % |
| Murs lestés ou cantilevers (console) [4]  | 16 % | Murs maintenus par des tirants d'ancrage | 10 % |

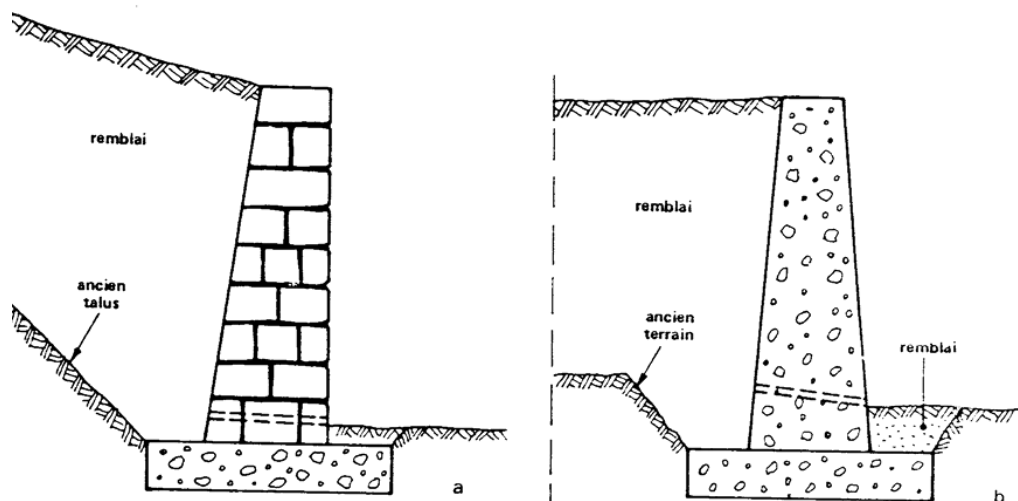


Figure 3.1. Mur poids [1]

[2] Des murs dont la stabilité est assurée uniquement par leur géométrie.

[3] Semelle en B.A, paroi en maçonnerie lourde, moellon [Fig. 3.1a] ou brique pleine, béton banché non armé [Fig. 3.1b].

[4] Sont des murs entièrement en B.A, outre la semelle qui déborde du côté des terres soutenues afin de mobiliser le poids de celles-ci et avec une paroi de soutènement pouvant comporter des chaises de lestage.

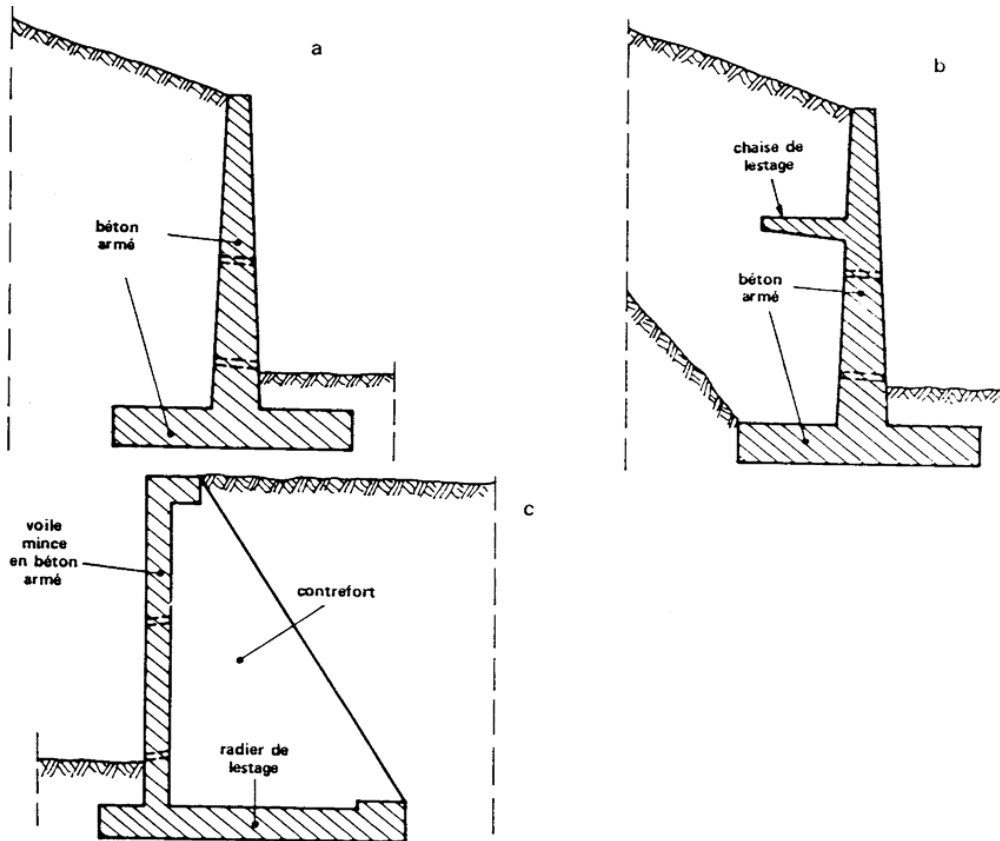


Figure 3.2. Mur cantilever [1]

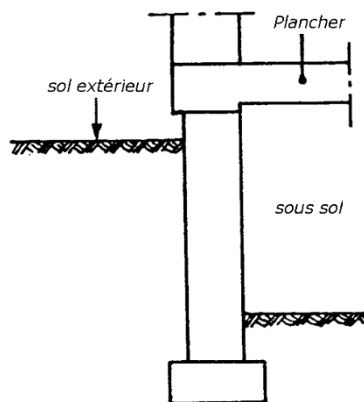


Figure 3.3. Exemple de murs de soutènement non autostable : mur de sous-sol [1].

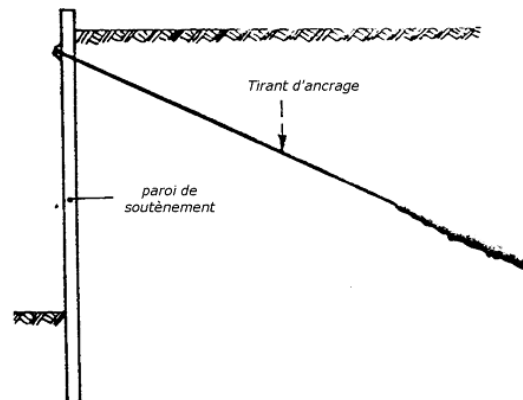


Figure 3.4. Exemple de murs de soutènement non autostable : Paroi ancrée par des tirants [1].

Tableau 3.2 Classification d'après les causes de sinistres [1].

| CLASSIFICATION D'APRÈS LES CAUSES DE SINISTRES                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                                                                                                        |                                                                                                                                                               |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Les murs censés être autostables                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                                                                                                    | Les murs non naturellement autostables                                                                                 |                                                                                                                                                               |
| <b>1<sup>ère</sup> catégorie :</b><br>Désordres dus à des Dimensions transversales du mur insuffisantes à l'égard de la poussée des terres.            | 53% produisant renversements, effondrements, fissures ou bombements                                                                                                                                                                                                                | <b>1<sup>ère</sup> catégorie :</b><br>Paroi insuffisante pour équilibrer la poussée des terres en phase définitive.    | 38 % produisant effondrements mais surtout bombements ou fissurations                                                                                         |
| <b>2<sup>ème</sup> catégorie :</b><br>Désordres dus à la poussée hydrostatique par suite de l'absence du système de drainage ou d'évacuation des eaux. | 30 % dont :<br>- Effondrements ;<br>- Faux aplombs ;<br>- Fissurations.                                                                                                                                                                                                            | <b>2<sup>ème</sup> catégorie :</b><br>Paroi insuffisante pour équilibrer la poussée hydrostatique en phase définitive. | 14 % produisant effondrements mais surtout bombements ou fissurations                                                                                         |
| <b>3<sup>ème</sup> catégorie :</b><br>Fautes commises lors du remblaiement                                                                             | 04 % dont :<br>- Remblaiement de grande masse provoquant des voûtes de décharge dans le remblai ;<br>- Remblaiement trop brutal avec des engins trop puissants venant parfois heurter le mur.                                                                                      | <b>3<sup>ème</sup> catégorie :</b><br>Remblaiement prématuré                                                           | 28 % dont la quasi-totalité concerne les murs de sous-sol contre lesquels on est venu remblayer avant la réalisation du plancher qui devait les buter en tête |
| <b>4<sup>ème</sup> catégorie :</b><br>Travaux venant ultérieurement compromettre la stabilité d'un mur existant                                        | 05 % causés par des excavations au pied du mur juste après sa construction.                                                                                                                                                                                                        | <b>4<sup>ème</sup> catégorie :</b><br>Manque de précautions pendant les travaux.                                       | 08 % concernant l'effondrement de talus non protégés qui viennent renverser les murs de sous-sol non encore maintenus en tête par le plancher.                |
| <b>5<sup>ème</sup> catégorie :</b><br>Cas divers                                                                                                       | 08 % trop peu nombreux on cite :<br>- Stabilité au glissement non assurée ;<br>- Absence de joints de retrait dans des murs en béton de grande longueur ;<br>- Non-respect du ferrailage indiqué sur les plans ;<br>- Désagrégation du mur par le gel ou des phénomènes chimiques. | <b>5<sup>ème</sup> catégorie :</b><br>Excavations inconsidérées effectuées ultérieurement au pied d'un mur             | 12 % dont le mur s'est effondré dans tous les cas.                                                                                                            |

Tableau 3.3 Classification d'après les manifestations des désordres [1]

| CLASSIFICATION D'APRÈS LES MANIFESTATIONS DES DESORDRES       |      |
|---------------------------------------------------------------|------|
| Effondrements                                                 | 61 % |
| Bombements ou fissurations                                    | 20 % |
| Faux aplombs                                                  | 16 % |
| Glissements de murs sur leur base et dégradations dues au gel | 12 % |

### 3.3 Règles à respecter pour construire un mur de soutènement

#### 3.3.1 Étude de sol

Une étude de sol est nécessaire pour savoir combien de charges le sol peut reprendre avant de poinçonner car le risque est le tassement ou le poinçonnement : si le mur ne casse pas, il peut poinçonner le sol en aval et basculer en entier [1].

#### 3.3.2 Conception par un bureau d'études

Une bonne conception d'ouvrages de soutènement nécessite des données géotechniques les plus précises possibles, nature et profil du terrain, présence de stratification, détermination de la profondeur de la nappe si elle existe, surcharge, profondeur. Toutes ces données permettent au géotechnicien en fonction de sa formation et de son expérience à définir un choix du type d'ouvrage compatible avec les contraintes géotechniques.

#### 3.3.3 Bonne réalisation des fondations, bien enterrées

Pour la même raison qu'au-dessus, un soin tout particulier doit être apporté aux semelles de fondations. La semelle de fondation permet de transmettre la poussée des terres au sol, après tout ! Ouvrage exposé aux intempéries, il faut penser à enterrer suffisamment les semelles pour les mettre 'hors gel', et pour assurer la butée du mur, et empêcher son glissement.

#### 3.3.4 Qualité des matériaux

Béton armé et parpaings ne sont pas égaux. Si vous utilisez des parpaings, quadrillez les panneaux de parpaings de chaînages en béton armé verticaux et horizontaux. Quel que soit votre choix final pour le matériau, veillez à sa qualité de réalisation : béton bien dosé, armatures bien disposées selon les plans, en quantité suffisante.

#### 3.3.5 Système de drainage efficace

Il y a plusieurs systèmes qui marchent très bien :

- Un lit de parpaings montés à sec derrière le mur fonctionne très bien pour évacuer rapidement les eaux ;
- Les barbacanes sont très efficaces pour évacuer rapidement les eaux, et éviter la montée en charge du mur lors des pluies torrentielles ;
- Au drainage contre le mur, ne pas oublier le drainage en pied du mur. Le système le plus utilisé étant la chaussette drainante : un tuyau de P.V.C percé, entouré de cailloux, le tout enroulé dans un géotextile.

### 3.3.6 Qualité drainante du remblai

En plus du système de drainage proprement dit, il faut que l'eau puisse circuler entre les grains de sol du remblai qui doit être drainant, qu'il s'agisse du sol local ou rapporté.

### 3.3.7 Etanchéité de la paroi contre terre

Pour protéger les armatures en acier d'un mur en béton armé, on réalise une couche d'étanchéité sur la paroi arrière du mur, en contact avec les terres et l'eau.

### 3.3.8 Entretien régulier

Le plus important est sans aucun doute de veiller à ce que le dispositif drainant ne se bouche pas avec le temps, ce qui est l'origine de nombreux sinistres.

## 3.4 Cas pathologiques

### 3.4.1 Stabilité au renversement non assurée ou insuffisamment assurée sous l'action de la poussée des terres

#### 3.4.1.1 Absence de toute étude de stabilité

Un mur en moellons de 15m de long était construit sans étude (Figure 3.5), circonstance aggravante, il devait maintenir un remblai argileux. Il a suffi seulement d'une période pluvieuse faisant perdre la cohésion du terrain pour que le mur s'effondre. Il maintenait 3,50 m de terre et n'avait que 50 cm à sa base [1].

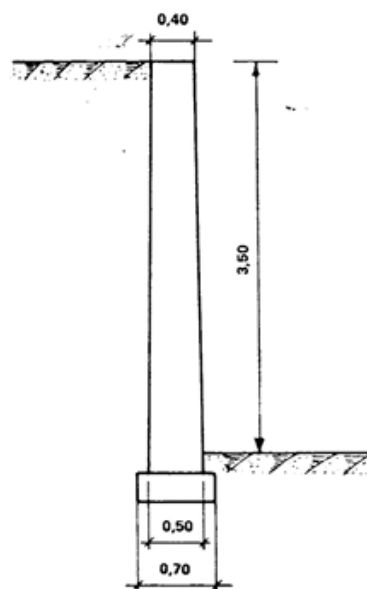


Figure 3.5. Mur en moellons [1]

Un deuxième cas est originaire de Lorraine, l'ouvrage est construit par une fosse de pont bascule de 40 tonnes dont les dimensions sont représentées par la figure 3.6.

Dans ce cas de figure, il y a eu une étude mais elle était déficiente. L'ingénieur conseil a calculé les parois (40 cm d'épaisseur) pour résister à la poussée des terres mais a négligé de vérifier la stabilité de ces parois simplement posées sans fondations sur une argile grise et seulement butées en pied par un dallage sur hérisson.

Un tel système ne peut fonctionner comme un système en U car aucune liaison n'existait avec les parois latérales. Les murs ont commencé à pivoter vers l'intérieur dans la partie centrale de la fosse. L'effondrement n'a pas été total mais il a fallu démolir tout ce qui restait pour construire une nouvelle fosse et cette fois-ci bien calculée [1].

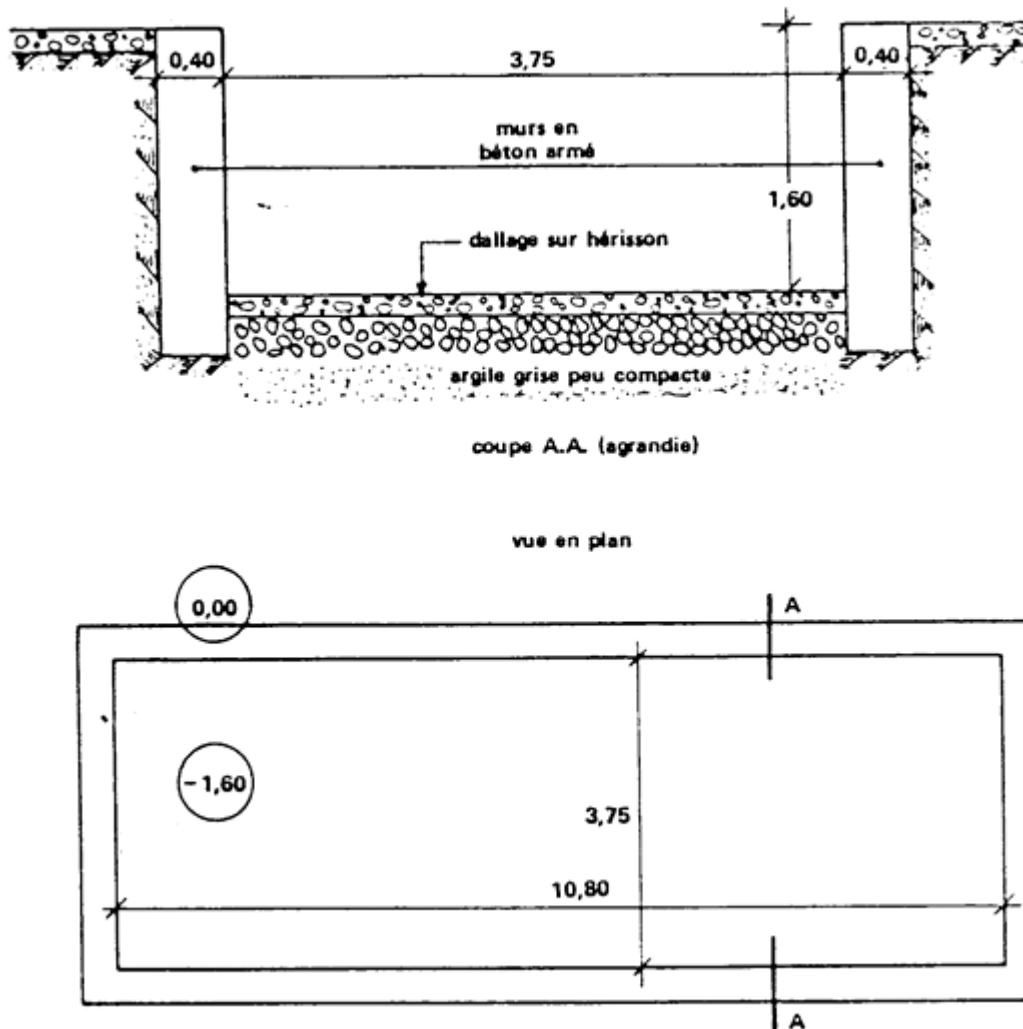


Figure 3.6. Fosse de pont bascule [1]

### 3.4.1.2 Interprétation erronée des théories sur le calcul des poussées

Une mauvaise interprétation de la loi de Coulomb qui est très utilisée dans le monde conduit à un nombre incalculable d'accidents de murs de soutènement, le problème est que cette théorie est lue et mal comprise.

En effet Coulomb admet l'existence d'une surface de glissement plane, lorsque le mur se déplace, il est accompagné dans son mouvement par un coin de terre limité à sa partie inférieure par une surface de glissement.

Cette théorie est valable dans le cas où le massif de terres est homogène et occupe un volume assez important.

Dans la pratique, il est assez fréquent de rencontrer un talus presque vertical qui paraît stable derrière un mur. Dans ce cas la quantité de remblai apportée se réduit à un faible prisme (Figure. 3.7). Il paraît à priori que le mur peut supporter des poussées car le volume apporté est faible [1].

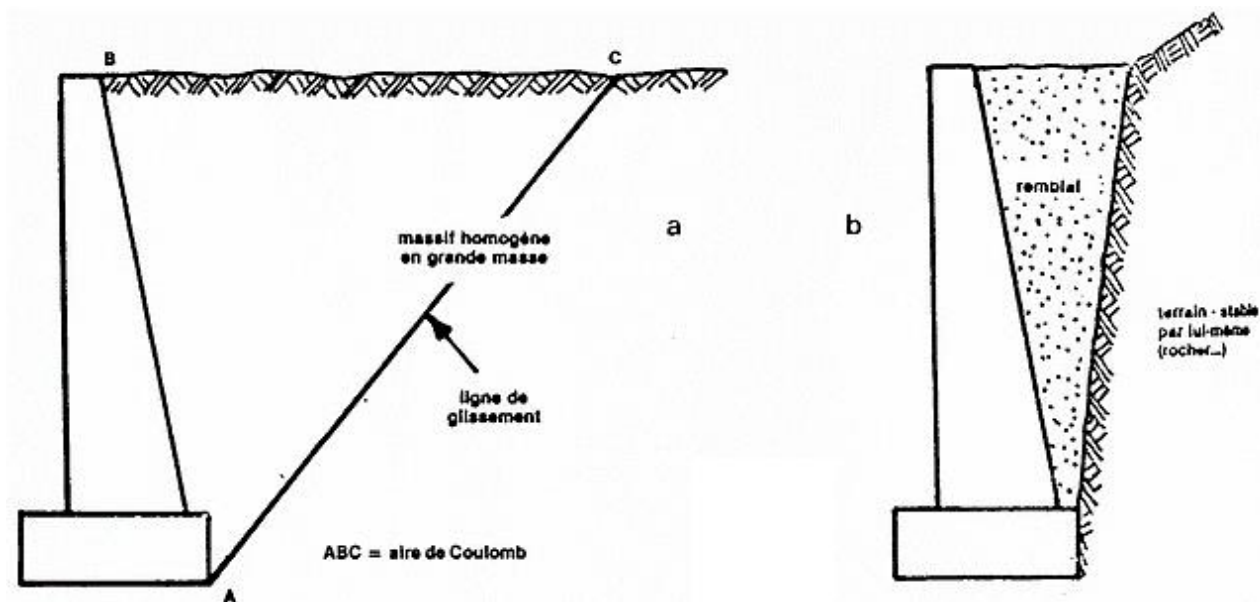


Figure 3.7. Cas ne correspondant pas à l'hypothèse de Coulomb [1]

Ce raisonnement est faux car le mur subit une poussée importante due à l'effet de SILO.

Ce sinistre s'est produit à Alger et a affecté un mur de 17m de long réalisé en maçonnerie de moellons (Figure. 3.8).

Le mur est réalisé à côté du terrain en tuf à forte pente, le remblaiement fut amorcé, en phase d'achèvement final le mur s'est écroulé sur toute sa longueur entraînant avec lui le remblai et une partie du terrain supposée stable par les constructeurs [1].

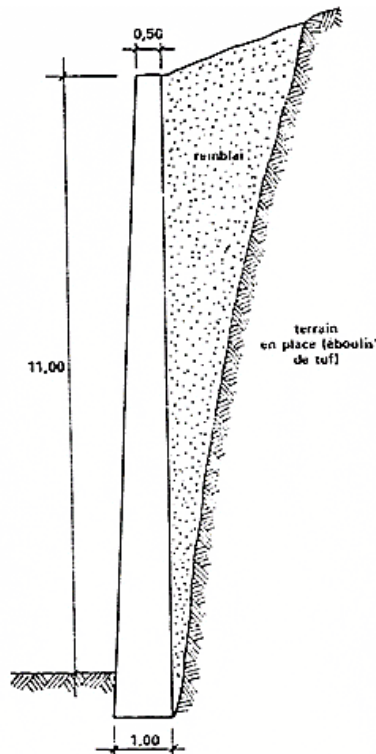


Figure 3.8. Exemple du mur qui s'est effondré au cours du remblaiement [1]

### 3.4.2 Désordres résultant de l'absence ou de l'insuffisance du système de drainage

Maintenant on va exposer quelques cas relatifs à l'action de l'eau spectaculaire sur les ouvrages de soutènement.

#### 3.4.2.1 Absence de dispositifs d'évacuation des eaux

Un cas tragique est étudié ici car il se termine par la mort de deux petits écoliers. Un mur de soutènement en moellons soutenait les terres d'une propriété surplombant la cour d'une école maternelle (Figure. 3.9), en mauvais état, joints dégradés, l'eau s'infiltraient à travers ces derniers et ruisselait dans la cour. A la suite de réclamations, on a procédé au rejointoyage des parements. Mais hélas après les pluies, l'eau qui ne pouvait circuler à travers les anciens joints qui servaient de barbacanes s'est accumulée derrière le mur, les poussées hydrostatiques s'accrourent et le mur s'effondra causant la mort de deux enfants qui se trouvaient dans la cour de récréation. Il fallait recréer des barbacanes à la place des joints et prévoir des matériaux filtrants [1].

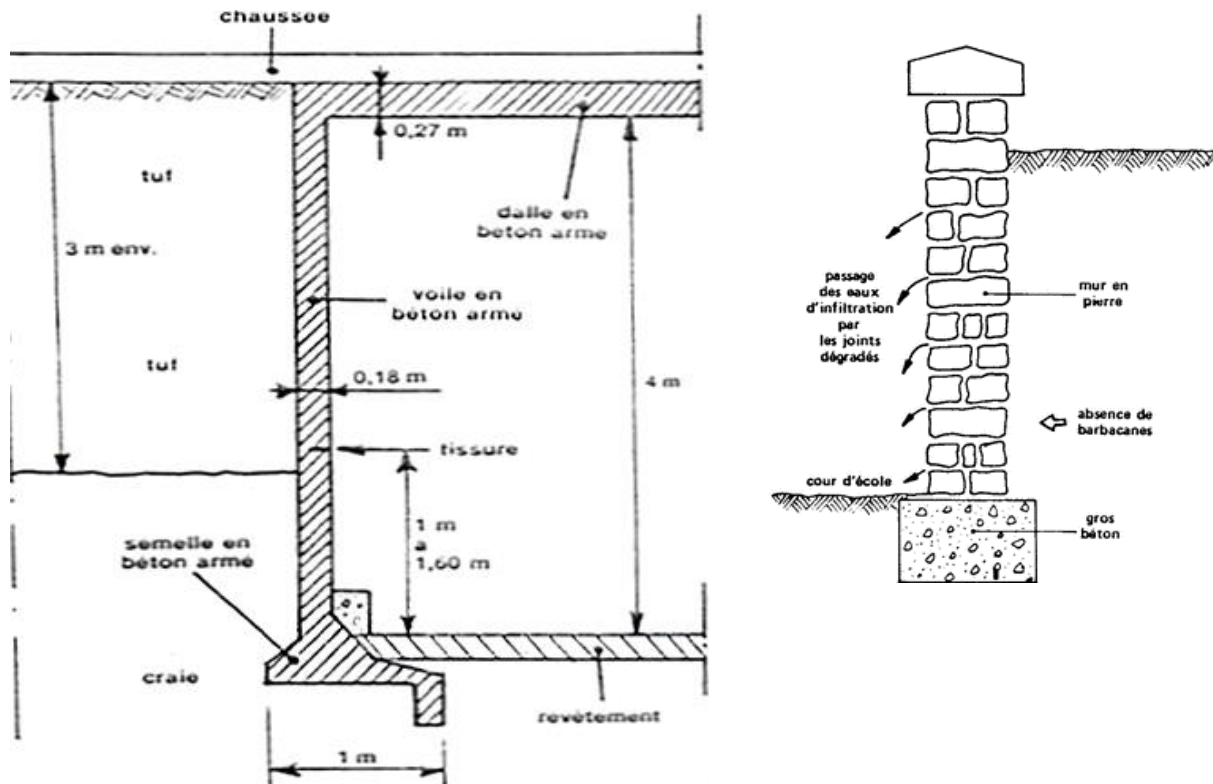


Figure 3.9. Rejointoiement inconsidéré et écoulement du mur [1]

Plusieurs désordres peuvent apparaître si l'étude prévoit l'utilisation de barbacanes et de filtres et qu'on néglige l'un d'eux ou qu'il existe par exemple un drainage mais pas de barbacanes.

#### 3.4.2.2 Action du gel

Les faits se déroulent en Champagne après la construction d'un passage sous terrain sous chaussée dont les voiles latéraux formaient soutènement des terres [5].

Un peu plus de deux ans, des pluies diluviennes se sont abattues, les terrains dépourvus de drains seront gorgés d'eau est soumis à l'effet du gel qui causera le gonflement du sol provoquant des fissures horizontales situés entre 1 m et 1,60 m au-dessus du sol du tunnel avec une flèche de 6 cm.

Les murs sinistrés seront démolis et reconstruits en prévoyant cette fois-ci un drainage en pierres sèches ainsi que trois rangées de barbacanes dont la hauteur du voile espacées d'un mètre entre chacune d'elle dans la même rangée [1].

[5] On voit sur la figure que les voiles ne sont pourvus d'aucun système d'évacuation des eaux.

### 3.4.3 Fautes commises lors du remblaiement

On regroupe deux types de désordres [1]:

- Le remblaiement prématuré avant la mise en œuvre de tous les éléments nécessaires à la stabilité définitive de l'ouvrage ;
- Le remblaiement en grande masse soumettant l'ouvrage à des conditions plus défavorables que celles pour lesquelles il a été calculé.

#### 3.4.3.1 Remblaiement prématuré

La plupart des murs des sous-sols enterrés sont calculés en supposant qu'ils s'appuient sur le plancher supérieur. Alors procéder au remblaiement avant que les appuis ne soient en place provoque des accidents graves. Environ les deux tiers des cas pathologiques liés au remblaiement sont dus à un remblaiement prématuré.

Exemple :

Un bâtiment de dimensions 25x12 m était en cour de construction sur un terrain en pente dont la façade aval était enterrée de 3,50 m, de ce fait le mur arrière de 25 m de long en béton banché de 40 cm d'épaisseur soutenait les terres et devait être buté en tête par le plancher (figure. 3.10). Malheureusement, l'entreprise remblaya avant l'exécution de la dalle et le mur s'est effondré [1].

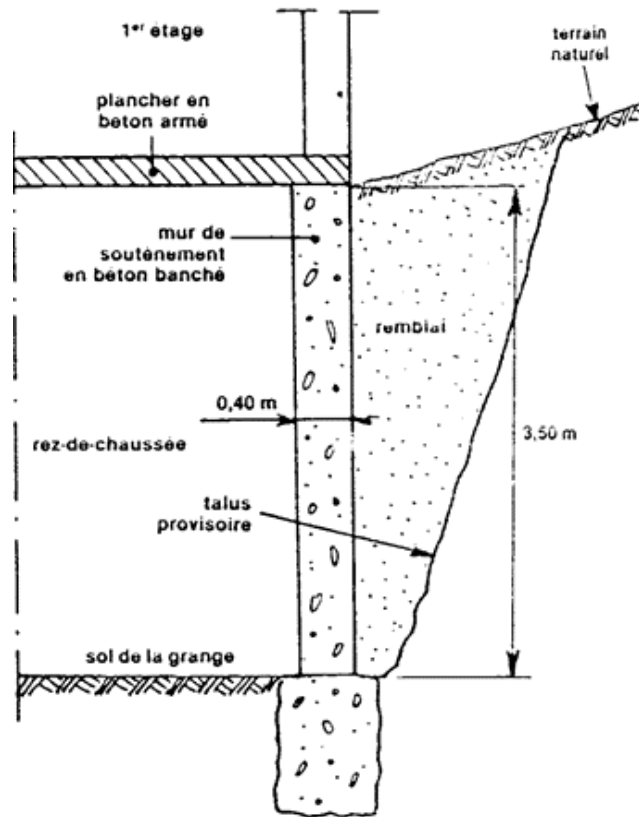


Figure 3.10. Coupe sur le mur de soutènement [1]

#### 3.4.3.2 Remblaiement en grande masse

Le passage d'un engin lourd près du mur crée des surcharges statiques et dynamiques importantes pouvant entraîner de graves désordres et provoquant la ruine de l'ouvrage de soutènement.

#### 3.4.4 Travaux venant compromettre ultérieurement la stabilité d'un mur de soutènement

L'équilibre d'un mur stable peut être compromis par des travaux ultérieurs [1]:

- La suppression des appuis en tête ou latéraux ;
- La suppression de la butée en pied (cas le plus fréquent) ;
- Le soumettre aux efforts supérieurs à ceux pour lesquels il a été calculé.

Un exemple amusant se situant en Lorraine sera cité pour le troisième cas :

Sur une propriété où le terrain était en pente avaient été édifiés deux murs de soutènement (sans doute au siècle précédent) en pierres sèches (figure. 3.11) :

- Un mur aval de 40 cm d'épaisseur et 17,30 m de long ;
- Un mur amont de 20 m de long situé à 5 m du premier et en pire état que lui.

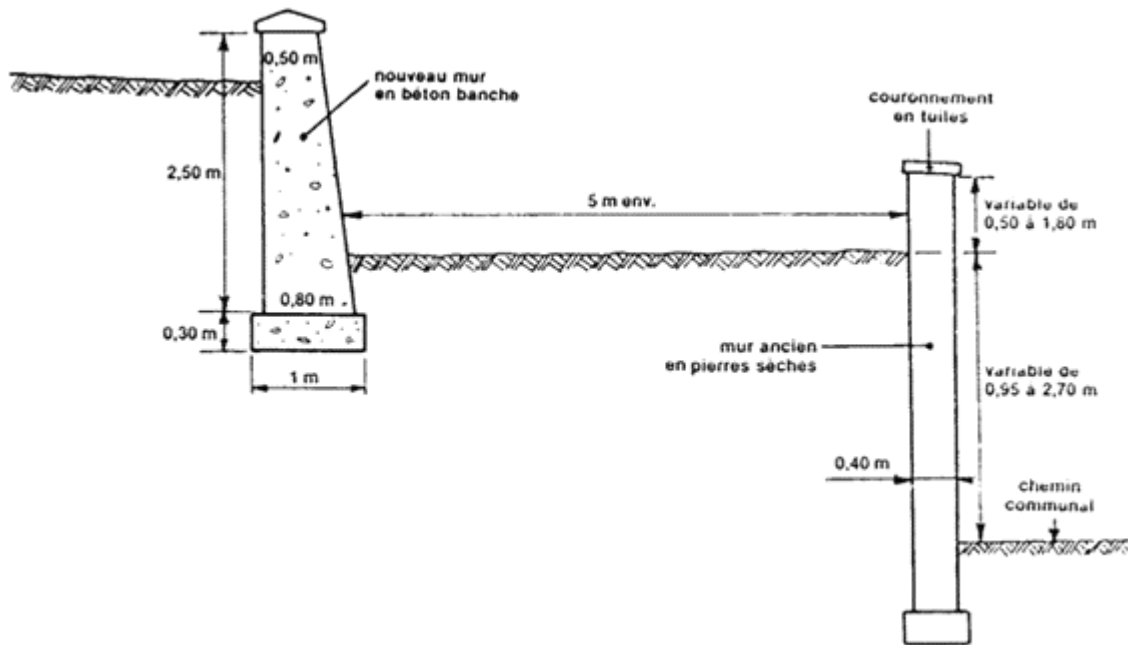


Figure 3.11. Nouveau mur en béton banché [1]

L'entreprise décida alors de démolir et de reconstruire le deuxième mur en béton banché dont les dimensions sont illustrées par la figure (figure. 3.12). Il comportait des barbacanes [1].

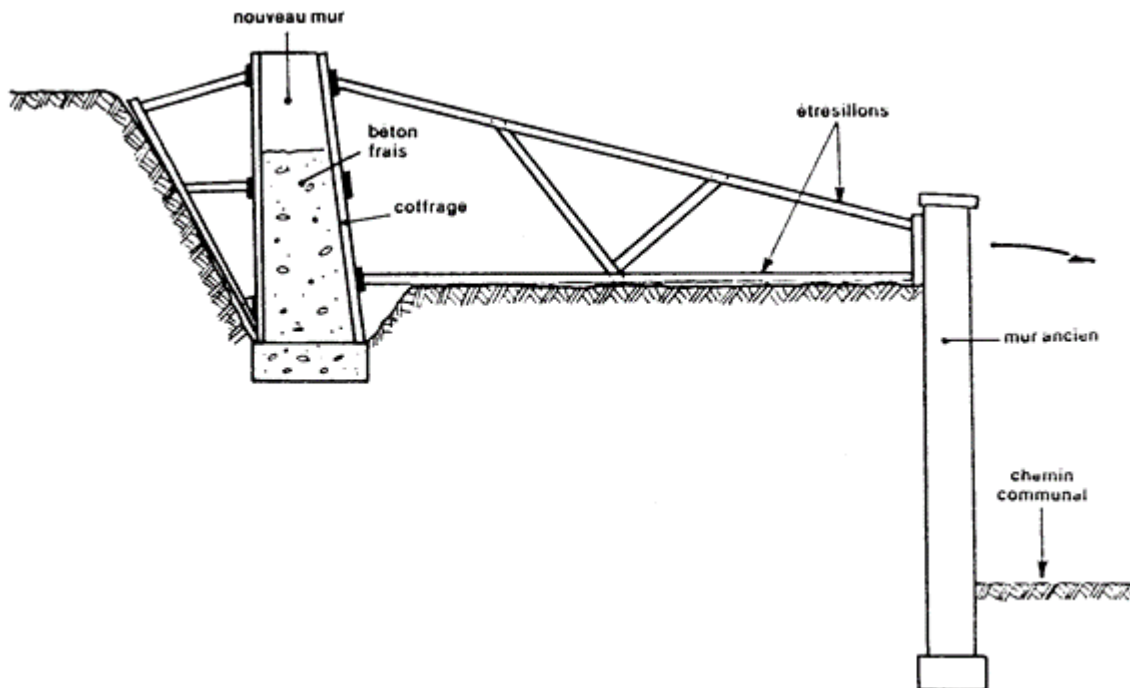


Figure 3.12. Mise en place d'étrésillons pour maintenir le coffrage [1]

L'entrepreneur a eu la mauvaise idée de buter le coffrage destiné à la construction du nouveau mur sur des étrésillons qui s'appuient sur l'ancien mur.

Lors du coulage du béton encore frais, la poussée a causé l'effondrement de l'ancien mur sur 15 m de longueur alors que l'entrepreneur d'une part a sous-estimé les forces de poussées du béton frais et d'autres part lui semblait que le mur était solide parce qu'il avait tenu jusque-là [1].

### 3.4.5 Stabilité du mur au renversement non assurée

Un mur de parement s'effondre, un mort et deux blessés graves.

Derrière un immeuble construit en site montagneux, une paroi rocheuse fut jugée inesthétique et l'on décida de la masquer par un mur de moellons de largeur 60 cm à sa base et 45 cm au sommet pour une hauteur de 5 m et une longueur d'environ 20 m.

Entre le mur et la paroi rocheuse subsiste un vide de un à deux mètres de large que l'on combla à l'aide d'un remblai. On avait cru qu'une faible quantité de remblai produisait une faible poussée. On se mit donc à combler l'arrière du mur d'un bon sable granitique, tandis que devant, les travaux s'achevaient par un rejointoiement soigné de la maçonnerie, en descendant, au fur et à mesure que l'on démontait l'échafaudage (figure 3.13) [1].

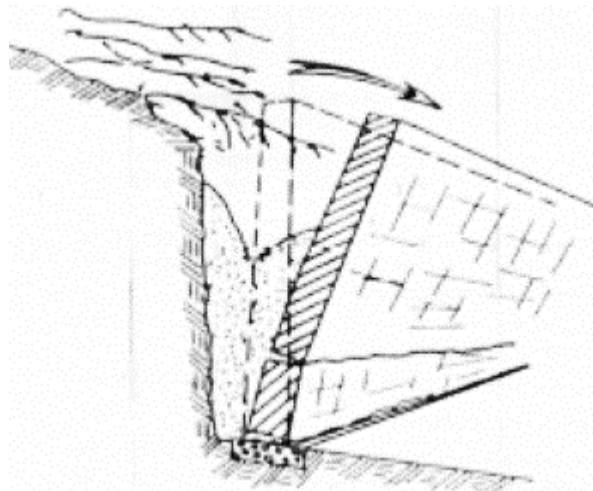


Figure 3.13. Renversement avec rupture longitudinal d'un mur de soutènement [1]

Des tirs de mines journaliers, dans une carrière voisine en exploitation, provoquaient, par les vibrations qu'ils engendraient, un tassement progressif du sable et par suite une aggravation de la poussée  $T$ .

Si le terrain recule de quelques millimètres seulement, il permet une décompression du terrain, et par conséquent une réduction des poussées. L'effet est stabilisateur.

Si la largeur est importante, le mouvement de recul peut atteindre sans danger plusieurs centièmes de la hauteur : le remblai remplit le supplément de volume en tassant de nouveau et continue à transmettre un effort de poussée entre le sol et la paroi du mur.

Les travaux de rejointoiement étaient en cours lorsque, sous l'effet d'une dernière onde de vibration, le mur s'effondra sur les ouvriers.

Ce mouvement de remblai, dans le cas où sa largeur est faible, peut être suivi de la zone voisine du terrain en place. Ainsi, un léger recul du mur réduit la poussée (effet stabilisateur), mais cela tant qu'il n'y a pas attrition du terrain en place. Au-delà, l'effet est déstabilisateur.

Aussi, un léger déversement comme le recul de faible importance, présente un effet stabilisateur car il atténue les poussées vers le haut et en abaisse la résultante. Le tassement de l'assise du mur est un mouvement déstabilisateur.

En effet, le terrain retenu va tendre à s'opposer au mouvement et de ce fait son angle de poussée prendra une valeur négative et l'intensité des forces augmente ; il s'en suit une aggravation des efforts de déversement [1].

En conclusion, on voit que les tassements du remblai et du sol d'assise tendent à détériorer la stabilité. En revanche, un léger recul ou déversement du mur tend à l'améliorer. En fait, un bon sol d'assise et un bon remblai sont des conditions essentielles de stabilité des murs de soutènement [17].

### 3.4.6 Désordres résultant de l'absence ou de l'insuffisance du système de drainage

De grosses pluies avaient inondé la fouille et détrempe le terrain voisin et particulièrement la couche d'assise du pied du mur de soutènement. Le terrain était sablo-graveleux, l'humidité détériora ses qualités portantes. Le pied commença alors à tasser ce qui amorça un déversement du mur à cet endroit ; puis le mouvement s'accéléra jusqu'à l'éboulement complet [1].

Le terrain saturé d'eau se trouve allégé par la poussée d'Archimède de sorte que son poids volumique est largement diminué (poids volumique déjaugé) par conséquent la poussée sur le mur se trouve réduite. Cependant il s'ajoute la pression de l'eau interstitielle de sorte que la pression finale sur le mur est fortement majorée.

Il faut donc empêcher l'eau de s'accumuler à l'arrière et au pied du mur par des dispositifs, filtre-barbacanes comme montré sur la figure 3.14.

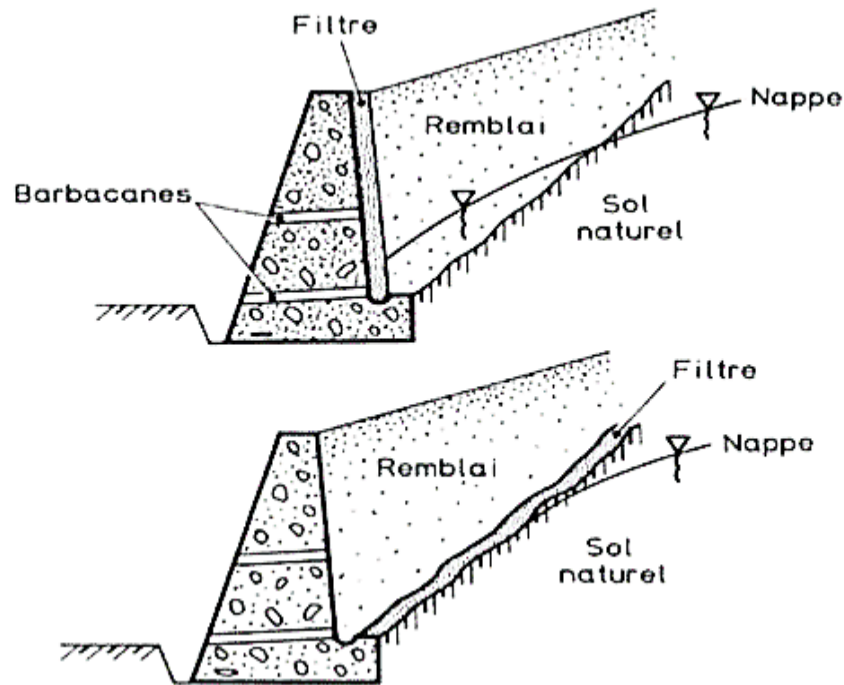


Figure 3.14. Dispositifs de drainage derrière un mur [1]

Pour cela il faut que [1]:

- Le terrain à cet endroit, doit former drain vertical et, par conséquent, être très perméable. Il faut proscrire les terres argileuses qui ont pu être extraites de la fouille, et les remplacer par un sable grossier mélangé ou non de gravier ;
- Si l'on décide de réaliser au bas du mur un drain horizontal, ce drain aura évidemment un exutoire, lequel ne devra jamais être engorgé. Or les écoulements entraînent toujours les particules fines, qui vont se retrouver à l'exutoire. Elles devront pouvoir être purgées de temps à autre pour ne pas risquer, en s'accumulant, de colmater le débouché ;
- Si l'on décide de faire évacuer l'eau à travers le mur, par des barbacanes, les plus basses d'entre elles ne doivent pas être trop éloignées du pied du mur, de manière à éviter une accumulation d'eau jusqu'à leur niveau ;
- Les barbacanes ne doivent surtout pas être bouchées par souci d'esthétique, ou se boucher d'elles-mêmes par dépôt de fines particules ou par la végétation ;
- L'eau sortant des barbacanes ne doit pas aller tremper le sol d'assise ;
- L'eau doit être recueillie sur l'avant de la semelle par un caniveau et évacuée.

### 3.4.7 Fautes commises lors du remblaiement

On regroupe deux types de désordres [1]:

- Le remblaiement prématuré avant la mise en œuvre de tous les éléments nécessaires à la stabilité définitive de l'ouvrage ;
- Le remblaiement en grande masse soumettant l'ouvrage à des conditions plus défavorables que celles pour lesquelles il a été calculé.

#### 3.4.7.1 Remblaiements prématurés

Lors de l'exécution d'un mur de soutènements, on ne doit pas procéder au remblaiement avant que le mur soit stable et résistant aux forces de poussées. Ce genre de sinistre causa des dégâts extrêmement importants. Lors d'études, environ deux tiers des cas pathologiques liées au remblaiement sont dus à un remblaiement prématuré [1].

Exemple [3]:

Un mur est construit en limite de deux propriétés. Les deux voisins ne s'entendaient pas. Celui qui occupait le fond supérieur et qui faisait construire le mur ne pouvait obtenir de l'autre l'autorisation d'installer l'échafaudage nécessaire et d'approvisionner les matériaux sur les terrains bas.

L'entrepreneur astucieux, expliquait qu'il pourrait faire le travail, moyennant un supplément de prix, sans pénétrer chez le voisin récalcitrant (figure 3.15).

Malheureusement quand le mur atteint les deux tiers de sa hauteur, il se désarticula pendant une opération de remblaiement, les décombres tombent évidemment chez le voisin.

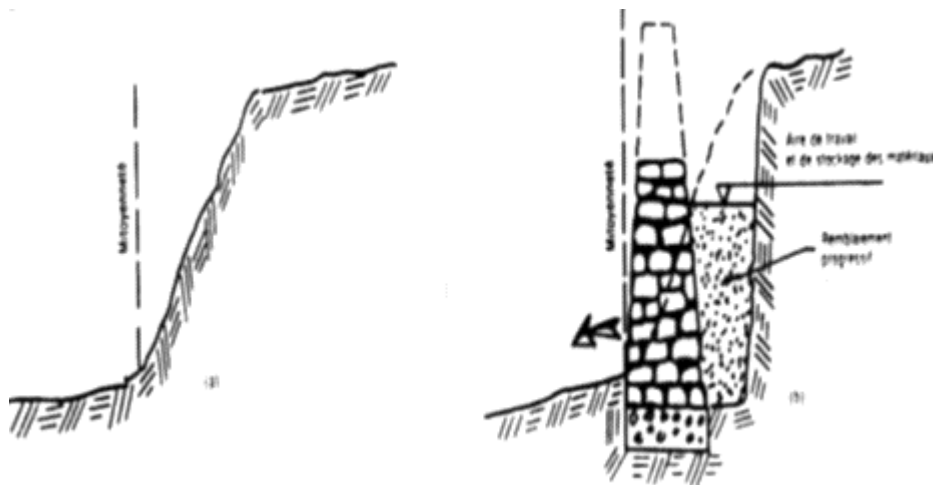


Figure 3.15. Mur en moellons [3]

Le remblai poussait sur une maçonnerie aux joints encore frais. C'était l'hiver et le durcissement du mortier était lent. Le sinistre s'amorça probablement par des glissements au niveau de certains joints entre moellons, qui en entraînèrent d'autres par réaction en chaîne jusqu'à dislocation [3].

### 3.5 Etude de cas

Après les fortes pluies sur la ville de Saida au cours de l'hiver 2012, de graves dommages ont été occasionnés surtout sur les infrastructures de la ville. Certains quartiers de la ville ont subi des dégâts en particulier sur les ouvrages de soutènements [18].

#### 3.5.1 1<sup>er</sup> cas

Mur de soutènement en béton armé qui se situe dans la nouvelle cité universitaire 3000 lits (figures 3.16 à 3.19) [18].



Figure 3.16. Effondrement du mur [18]



Figure 3.17. Epaisseur insuffisante [18]



Figure 3.18. Barbacanes en nombre insuffisant [18]

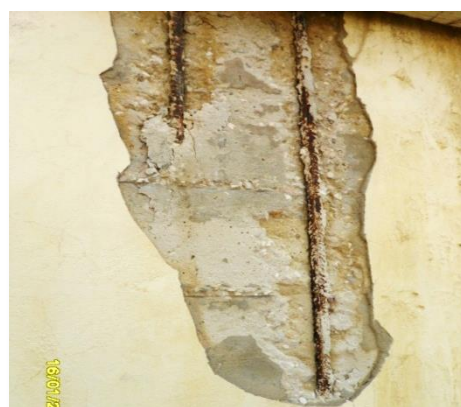


Figure 3.19. Dégradation des enduits [18]

Le mur de soutènement a basculé sous l'effet [18]:

- De l'augmentation de la pression hydrostatique causée par l'inondation ;
- Absence du système de drainage au mur engendrant une augmentation de poussées (eau + terre) ;
- Absence de barbacanes et de matériau perméable à l'arrière du mur ;
- Ancrage des fondations du mur insuffisant ;

### 3.5.2 2<sup>ème</sup> cas

Effondrement d'une partie du mur de soutènement de la cité universitaire 2000 lits par les forces de poussées de terres et les pressions hydrostatiques derrière le mur (figure 3.20 et 3.21). Ce mur de clôture en parpaing ne pouvait pas soutenir les terres à cause de sa fragilité et de l'absence du système de drainage [18].



Figure 3.20. Mur de clôture en parpaing réalisé comme mur de soutènement [18]



Figure 3.21. Basculement du mur [18]

### 3.5.3 3<sup>ème</sup> cas

Un mur de soutènement en pierre moellon situé au nouveau campus de la faculté des sciences et de la technologie (3000) a basculé sous sollicitation de poussée hydrostatique survenue après les intempéries du mois de novembre 2012 (figure 3.22). Il a été observé que les pierres n'étaient pas liées entre elles, donc ne formant pas un bloc monolithe en maçonnerie. Il a été rapporté aussi l'absence de tout système de drainage (figure 3.23) [18].



Figure 3.22. Rupture partielle du mur [18]



Figure 3.23. Pierres ne formant pas un bloc monolithe de maçonnerie [18]

### 3.5.4 4<sup>ème</sup> Cas

Durant la période hivernale 2003, des pluies se sont abattues en grande quantité sur la région de Sidi Bel Abbès provoquant ainsi des dommages au niveau du siège de la wilaya. C'est alors que des infiltrations d'eaux pluviales se sont manifestées au niveau des voiles du sous-sol de la façade Nord du bâtiment du siège de la wilaya [17].

#### 3.5.4.1 Désordres constatés

- Infiltration des eaux pluviales à travers les fissures des voiles en béton armé (figure 3.24) ;
- Dégradation, gonflement et décollement des enduits et peintures (figure 3.25) ;
- Inondation du plancher au sous-sol (figure 3.26) ;
- Détérioration des joints d'étanchéité (figure 3.27).



Figure 3.24. Infiltration des eaux pluviales [17]



Figure 3.25. Dégradation des enduits [17]



Figure 3.26. Inondation du plancher [17]



Figure 3.27. Infiltration [17]

Le cabinet chargé de l'expertise n'a pu prendre connaissance du rapport géotechnique du sol, de telle manière qu'il ne lui a pas été possible de connaître sous une forme précise la nature des différentes couches, les caractéristiques de la nappe phréatique et le degré de perméabilité. Ces informations utiles conditionnent le dimensionnement des fondations, des voiles du sous-sol ainsi que les dispositions constructives pour la mise en œuvre des drains [17].

Le sinistre a pour origine la détérioration de la couche d'enduit d'imperméabilisation des voiles en béton armé, sous l'action des eaux d'infiltration mal ou insuffisamment drainées lors des dernières précipitations. Il a été rapporté les désordres suivants [17]:

- Fissuration du voile de la façade Nord ;
- Détérioration des enduits et revêtements des voiles intérieurs ;
- Inondation permanente du sous-sol ;

#### 3.5.4.2 *Conseils pratiques [17]*

- Exécution du drain et remblayage (compactage par couches de 20 cm) avec différents diamètres par couches superposées pour une bonne évacuation des eaux et éviter le colmatage ;
- La pente du drain doit être comprise entre 3 et 10 mm par mètre ;
- La granulométrie des matériaux filtrants est croissante en allant en profondeur (sable en haut puis gravillon, caillou et grosses pierres en bas) ;
- Reprise de la couche d'imperméabilisation après grattage et nettoyage de la surface du voile pour une bonne étanchéité ;
- Revêtement en plinthes de marbre sur mur de façade extérieure et perpendiculairement au carrelage afin d'empêcher l'infiltration des eaux pluviales.

### 3.6 Conclusion

A la fin de ce chapitre, nous tirons un ensemble d'observations à savoir :

- Le sol est un matériau capricieux qui nous réserve des surprises, même en supposant être du côté de sécurité en utilisant le coefficient de sécurité. Nous ne sommes pas à l'abri d'accidents spectaculaires voire même meurtriers ;
- Les murs servent de soutènement aux terres, cependant ils constituent des barrages pour les eaux dans le sol. Il est impératif de prévoir un dispositif de drainage pour éliminer les poussées hydrostatiques qui sont susceptibles de doubler voire même tripler l'intensité des poussées même majorées de 50 % ;
- Faire appel aux compétences spécialisées pour faire face aux problèmes de soutènement afin d'éviter les tragédies. Le résultat d'un mauvais jugement par imprudence ou incompétence entraîne souvent des conséquences néfastes voire dramatiques ;
- Vérifier la résistance des parois aux poussées est insuffisant. Il est nécessaire de veiller, aussi, sur leurs stabilités vis-à-vis du glissement et du renversement.

# | Conclusion générale

---

A l'issue de ce manuel, nous tirons un certain nombre de conclusions et de recommandations qui permettent d'aider le géotechnicien dans sa mission à savoir :

L'emploi de coefficients de sécurité traduit en fait notre ignorance de la mécanique des sols et l'expérience l'a bien montré sur le terrain.

Les désordres proviennent souvent de l'emploi répété de dispositifs de construction inappropriés, ou de conception mal adaptée ou des deux à la fois.

Mettre en place une prévention efficace permet de minimiser les conséquences des sinistres voire les neutraliser.

Un sinistre peut être la conséquence d'une ou de plusieurs erreurs. L'intervention de l'expert doit être dans les plus brefs délais pour relever les indices tant qu'ils sont encore présents, et proposer une solution pour éviter l'aggravation du risque.

L'inconvénient d'une fondation défectueuse et que ses défauts apparaissent avec le temps après avoir réceptionné le projet où les fondations sont cachées et l'ouvrage est en service. De ce fait on peut réceptionner un ouvrage cette année et ressentir les conséquences d'un éventuel sinistre vingt à trente mois après ou vingt à trente ans après.

Lorsqu'un défaut de portance du sol est suspecté, les solutions préconisées visent un approfondissement de fondation par micropieux ou amélioration du sol par injection. L'idée est soit de renforcer le sol sur lequel repose la fondation, soit de reporter les charges à un sol se situant en surprofondeur et ayant une meilleure portance.

La présence d'eau et la variabilité de sa teneur est un des problèmes majeurs en géotechnique auquel cas, le recours à des entreprises spécialisées hautement qualifiées doit être envisagé.

L'hétérogénéité du sol réserve parfois des surprises qui, même en utilisant des coefficients de sécurité ne nous mettent pas à l'abri d'accidents spectaculaires voire même dramatiques.

Les ouvrages servant de soutènement aux terres constituent des barrages pour les eaux dans le sol. Il est impératif de prévoir un dispositif de drainage pour éliminer les poussées hydrostatiques qui sont susceptibles de doubler voire même tripler l'intensité des poussées même majorées de 50 %.

Vérifier la résistance des murs aux poussées est insuffisant. Il est nécessaire de veiller, aussi, sur leurs stabilités vis-à-vis du glissement et du renversement.

Toujours faire appel aux compétences spécialisées en géotechnique pour faire face aux problèmes de soutènement afin d'éviter les tragédies. Le résultat d'un mauvais jugement par imprudence ou incompétence entraîne souvent des conséquences dramatiques.

# Références bibliographiques

---

- [1] L. Logeais, La pathologie des fondations : causes des désordres et remèdes, S. d. c. t. Bureau Sécurité, Éd., Paris: Moniteur, 1982, p. 158.
- [2] NF P94-500, *Missions d'ingénierie géotechnique - Classification et spécifications*, Association Française de normalisation (AFNOR), 2013.
- [3] F. Ghomari, Cours pathologie des constructions, Université Aboubakr Belkaid de Tlemcen, 2004.
- [4] D. Watt, Building Pathology, second edition éd., Blackwell, 2007.
- [5] G. Sanglerat, «Pathologie des fondations et des reprises en sous oeuvre,» *Revue Construction*, n° 123, 1980.
- [6] P. d. b. Guide , *La pathologie des fondations superficielles*, Québec: Fondasol, 2012.
- [7] Fondasol, *Pathologies des fondations*, Québec: Firalabs, 2012.
- [8] G. Sanglerat, «Nécessité des études géotechniques dans le bâtiment,» *La revue des ingénieurs*, vol. 21, n° 124, pp. 24-28, Nov-Dec 1968.
- [9] G. Ballivy, «Problèmes légaux liés à l'aménagement du sol en milieu urbain,» chez *National conference on urban engineering terrain problems*, CNRS, Ottawa, 1973.
- [10] R. B. Peck, «Art and science in subsurface engineering,» *Géotechnique*, vol. 12, pp. 60-66, 1962.
- [11] Les collections de l'Ifsttar, «DIAGNOSTIC DES PATHOLOGIES DE FONDATIONS,» INSTITUT FRANCAIS DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES DES TRANSPORTS, DE L'AMENAGEMENT ET DES RESEAUX, Mars 2020.

- [12] S. Macdonald, *Concrete Building Pathology*, Blackwell, 1988.
- [13] H. Josseaume, «Tassements dus aux rabattements de nappes,» *Bull. Lab. Routiers, Special N*, pp. 141-152, 1968.
- [14] E. Absi, *Manuel pratique de mécanique des sols et des fondations*, Paris: Annales de l'institut technique du bâtiment et des travaux publics, 1979.
- [15] F. e. infrastructures, *Fondations superficielles*, 2007.
- [16] «<https://lesgoudronsduquebec.com/soulevement-fondation-gel>,» [En ligne].
- [17] D. E. Sekkel, «Rapport d'expertise 04 RI 160,» Cabinet d'expertise SEKKEL (C.E.S), Sidi Bel Abbes, 2004.
- [18] M. L. Daoudi et N. E. Daoudi, «Etude cinématique de la rupture des sols par poussée derrière les ouvrages de soutènement,» Mémoire de mastre en génie civil option C.C.I, Université Dr. Tahar Moulay de Saida, 2013.

## A

Actions.....ii, 8, 12, 13  
 Argile.....v, 21, 42, 44, 54  
 Assèchement.....20, 48  
 Assurance.....6, 15

## B

Barbacanes ...48, 52, 56, 57, 60, 62, 63, 66  
 Béton.....v, vi, 12, 13, 19, 23, 25, 28, 29, 30,  
 33, 34, 37, 38, 39, 48, 49, 51, 52, 53, 58,  
 60, 61, 65, 67, 68  
 Butée.....48, 52, 59

## C

Capacité portante .....iii, 31, 37  
 Charges.... iii, v, 8, 9, 18, 24, 25, 27, 28, 31,  
 37, 38, 39, 41, 42, 43, 45, 52, 70  
 Compressible .....v, 21, 23, 43, 44, 45  
 Construction ....i, v, 2, 6, 7, 8, 9, 10, 13, 15,  
 16, 17, 26, 27, 41, 44, 47, 51, 57, 58, 60,  
 70, 72  
 Coulomb .....vi, 55

## D

Définition .....ii, 2, 4, 6, 10, 41  
 Désordres, ii, vi, 2, 4, 5, 6, 8, 10, 11, 12, 13,  
 16, 18, 19, 20, 23, 25, 26, 27, 28, 33, 36,

37, 39, 43, 44, 45, 51, 57, 58, 59, 64, 68,  
 70

Dispositif .....48, 53, 69, 71  
 Drainage... iv, v, vi, 3, 5, 16, 26, 32, 48, 51,  
 52, 53, 56, 57, 62, 63, 66, 69, 71

## E

Etude .....iv, 46, 65, 72  
 Evaluation .....ii, 2, 4, 5, 11  
 Expertise ..i, iii, 2, 3, 5, 15, 16, 17, 18, 45, 68

## F

Fissure .....3, 11, 16, 37, 40  
 Fondation ...iii, 2, 12, 14, 15, 16, 17, 18, 19,  
 20, 25, 28, 30, 31, 32, 34, 36, 37, 39, 40,  
 41, 42, 45, 52, 70

## G

Gel .....v, 1, 34, 35, 51, 52, 57  
 Géotechnicien.....i, 2, 5, 15, 16, 42, 52, 70  
 Géotechnique ....i, iii, 1, 2, 3, 5, 14, 15, 16,  
 17, 36, 37, 41, 45, 47, 68, 70, 71  
 Glissement .....2, 47, 48, 51, 52, 55, 69, 71  
 Gonflement .....i, 19, 28, 57, 67  
 retrait.....19

## I

Injectons.....20, 25, 37, 40, 41

## J

Jet grouting.....v, 25, 37, 39, 40

## M

Maçonneriev, vi, 23, 43, 48, 49, 55, 61, 65, 66, 67

Matériaux .iii, iv, 1, 9, 10, 11, 12, 13, 15, 18, 19, 30, 34, 36, 37, 52, 56, 64, 69

Mécanique des sols.....i, 1, 2, 5, 15, 70

Moellons v, vi, 19, 43, 53, 55, 56, 61, 64, 65

Mur

soutènement.....iii, iv, v, vi, 2, 15, 32, 33, 45, 46, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 69

## N

Nappe .....i, v, 1, 17, 22, 38, 48, 52, 68

## O

Ocre

ferreux .....v, 34, 35

Ouvrage

soutènement.....iii, 2, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 15, 19, 20, 22, 23, 25, 27, 31, 41, 42, 45, 48, 52, 54, 58, 59, 64, 70

## P

Pathologie.....ii, iii, 4, 6, 7, 8, 12, 14, 17, 18, 36, 45, 72

Pieux .....5, 34, 39

Pompage.....v, 5, 20, 22

Poussée

terre...iv, 3, 48, 51, 52, 53, 54, 55, 61, 62, 66

Prévention.....ii, 2, 5, 8, 9, 10, 13, 70

Puits.....v, 5, 25, 37, 38

## R

Réhabilitation .....ii, 7

Remblaiement .....iv, vi, 30, 51, 56, 58, 64

Rénovation .....ii, 6, 38

Renversement .....iv, 47, 48, 53, 61, 69, 71

Réparation.....i, 2, 3, 15, 36

Reprise

sous oeuvre.....iii, 11, 25, 34, 37, 41, 42

Restauration .....ii, 7

Retrait .....i, 12, 19, 51

Ruine.....ii, 6, 19, 20, 25, 59

Rupture.....vi, 2, 13, 48, 61, 67

## S

Sel de Candlot .....28

Sinistre..2, 11, 13, 15, 31, 48, 55, 64, 65, 68, 70

Stabilité.....iv, 37, 47, 49, 51, 53, 54, 58, 59, 61, 62, 64

## T

Tassement .v, vii, 19, 20, 22, 23, 24, 25, 28, 32, 42, 43, 45, 47, 48, 52, 61, 62