

LISTE DES SYMBOLES

F_s : Le coefficient de sécurité.

W : Le poids du bloc de sol considéré.

H : L'effort horizontal sur les côtés du bloc.

V : L'effort vertical sur les côtés du bloc.

N : La réaction normale à la base du bloc.

T : La réaction tangentielle à la base du bloc.

U_L : L'effort dû à la pression d'eau latérale.

U : L'effort dû à la pression d'eau à la base.

T_{max} : La réaction tangentielle maximale.

C' : La cohésion effective du sol.

Φ' : L'angle de frottement effective du sol.

β : L'angle d'inclinaison de la pente et du plan de glissement.

h : La profondeur verticale au plan de cisaillement.

hw : La distance entre les deux extrémités du bloc.

H_n et H_{n+1} : Les efforts horizontaux inter-tranches.

V_n et V_{n+1} : Les efforts verticaux inter-tranches.

R_n : La réaction du milieu sous-jacent sur l'arc AB.

σ_n : La contrainte normale de cisaillement.

τ : La contrainte tangentielle de cisaillement.

b : La largeur des tranches.

α : L'angle orienté que fait le rayon du cercle avec la verticale.

G : Le module de cisaillement.

E : Le module d'Young.

ν : Le coefficient de Poisson.

E_{oed} : Le module oedométrique.

γ : Le poids volumique.

γ_h : Le poids volumique humide.

γ_{sat} : Le poids volumique saturé.

K_x : La perméabilité horizontale.

K_y : La perméabilité verticale.

SOMMAIRE

REMERCIEMENT.....	I
RESUME.....	II
ABSTRACT	III
الملخص	IV
LISTES DES FIGURES.....	V
LISTE DES PHOTOS	VI
LISTE DE TABLEAUX.....	VII
LISTE DE SYMBOLES.....	VII
SOMMAIRE.....	IX
INTRODUCTION GENERAL.....	1

PREMIER CHAPITRE : Les glissements de terrain

1 – INTRODUCTION.....	3
2 – LES DIFFERENTS TYPES DE MOUVEMENTS DE TERRAIN.....	4
2.1 – Glissement de terrain.....	4
2.2 – Les éboulements et les écroulements.....	5
2.3 – Les coulées boueuses.....	5
3 – GLISSEMENT DE TERRAIN.....	7
3.1 – Définition de glissement de terrain.....	7
3.2 – Types de glissement	7
3.2.1 – Glissement plan	7
3.2.2 – Glissement rotationnel.....	8
3.2.3 – Glissement quelconque.....	8
3.3 – Classification de glissement de terrain	9
3.4 – Les causes de glissement de terrain.....	9
4 – ÉTUDE DE GLISSEMENT DE TERRAIN.....	11
4.1 – Reconnaissance du site.....	12
4.2 – Analyse de stabilité.....	13
4.2.1 – Définition du coefficient de sécurité	13

4.2.2 – Méthodes de calcul de coefficient de sécurité	14
a – Calcul du coefficient de sécurité en glissement plane	14
b – Le coefficient de sécurité en rupture circulaire (Méthode de FELLENIUS)	15
5 – CONCLUSION	18

DEUXIEME CHAPITRE: Les méthodes de confortement

1 – INTRODUCTION	19
2 – CHOIX DE METHODE DE CONFORTEMENT	19
3 – CLASSIFICATION DES METHODES DE CONFORTEMENT	20
3.1 – Aspect préventif	20
3.2 – Aspect curatif	21
4 – APPROCHE DOUCE.....	22
4.1 – Terrassement	22
4.1.1 – Remblai de pied.....	22
4.1.2 – Allègement en tête.....	23
4.1.3 – Reprofilage	23
4.1.4 – Purge.....	23
4.2 - Drainage	24
4.3 – Végétation	25
5 – APPROCHE DURE	25
5.1 – Le renforcement	26
5.1.1 – Le renforcement par géotextiles	26
5.1.2 – Le renforcement par géogrilles.....	27
5.1.3 – La technique pneu sol.....	27
5.1.4 – Le renforcement par ancrage	28
5.1.5 – Le renforcement par coulage	28
5.2 – Amélioration thermique et chimique des sols	29
5.2.1 – Cuisson	29
5.2.2 – Consolidation électro-osmose.....	29
5.2.3 – Consolidation électrochimique	29
5.3 – Confortement par ouvrages de soutènement	30
5.3.1 – Ouvrage à structure apparente	30
5.3.2 – Ouvrage à structure enterré.....	31

6 – TECHNIQUES DE SURVEILLANCE.....	31
7 – CONCLUSION	31

TROISIEME CHAPITRE : Pathologies et leurs confortements

1 – INTRODUCTION	32
2 – DECROCHEMENT DE TALUS A SIDI-BEL-ABBES.....	32
2.1 – Définition.....	32
2.2 – Les causes probables	33
2.3 – Les solutions utilisées pour le traitement	33
2.3.1 – Masque poids drainant.....	33
2.3.2 – Mur en gabions	33
3 – CHUTE DE PIERRES A MAGHNIA.....	33
3.1 – Définition.....	34
3.2 – Les causes probables	35
3.3 – Les solutions utilisées pour le traitement	35
3.3.1 – Protection par grillage	35
3.3.2 – Injection de coulis.....	35
4 – Tassement à Hammam Bouhrara	36
4.1 –Définition.....	36
4.2 – Les causes probables	36
4.3 – Les solutions utilisées pour le traitement	37
4.3.1 – Micropieux	37
5 – AFFAISSEMENT A TLEMCEN	37
5.1 – Présentation de la section étudiée.....	37
5.2 – Les causes probables	38
5.3 – Les solutions proposées pour le traitement.....	38
6 – JET GROUTING	40
6.1 –Introduction	40
6.2 – Principe de la méthode	40
6.3 – Les types de jet grouting.....	41
6.3.1 – Jet simple.....	41
6.3.2 – Jet double.....	41
6.3.3 – Jet triple	41
6.4 – Processus d’injection de jet grouting.....	43

7– CONCLUSION.....	44
--------------------	----

QUATRIEME CHAPITRE : Etude d'un cas pathologique

1 – INTRODUCTION	45
2 – MÉTHODE DES ÉLÉMENTS FINIS.....	45
3 – PRESENTATION DE PLAXIS	46
3.1 – Définition.....	46
3.2 – L'interface du code PLAXIS.....	46
3.2.1 – PLAXIS-Input.....	47
3.2.2 – PLAXIS-Calculations.....	47
3.2.3 – PLAXIS-Output.....	47
3.2.4 – PLAXIS-Curves.....	47
3.3 – Les modèles de comportement utilisés dans PLAXIS.....	48
3.3.1 – Modèle élastique.....	48
3.3.2 – Modèle Mohr-Coulomb.....	49
3.4 – Le module dynamique de PLAXIS.....	50
4 – PRESENTATION DU CAS ETUDIE	50
4.1 – Présentation du projet autoroutier Est-Ouest.....	50
4.2 – Présentation de la section étudiée.....	50
4.3 – Présentation du talus.....	51
4.4 - Topographie, géométrie et lithologie.....	52
5– CALCUL DE MODELE DETERMINISTE.....	52
5.1 – La phase 1 : Un calcul en plasticité.....	53
5.2 – La phase 2 : Calcul du coefficient de sécurité.....	53
6 – CALCUL DU TALUS A L'ETAT INITIAL (AVANT CONFORTEMENT) ...	53
6.1 – Résultats du calcul sans effet dynamique.....	54
6.1.1 – Interprétation des résultats.....	55
6.2 – Calcul sous l'effet dynamique.....	56
6.2.1 – Interprétation des résultats.....	57
7 – SOLUTIONS DE CONFORTEMENT DU TALUS	58
7.1 – Solution de reprofilage par terrassement.....	58
7.1.1 – Les résultats sans effet dynamique.....	58
7.1.2– Interprétation des résultats.....	60
7.1.3 – Calcul sous l'effet dynamique.....	60

7.1.4– Interprétation des résultats.....	62
8 – DEUXIEME SOLUTION PROPOSEE	62
8.1 – Les résultats sans effet dynamique.....	62
8.2 – Interprétation des résultats.....	64
8.3 – Calcul sous l’effet dynamique.....	64
8.4 – Interprétation des résultats.....	66
9 – COMPARAISON DES RESULTATS.....	66
10 – CONCLUSION	67
CONCLUSION GENERALE.....	69
REFERENCES BIBLIOGRAPHIES	70
ANNEXE.....	73

Rapport-Gratuit.com

INTRODUCTION GENERALE

Au cours de ces dernières années, l'instabilité des terrains a suscité une grande attention des géotechniciens. La nature géologique des terrains est un des principaux facteurs d'apparition de ces phénomènes tout comme l'eau, la pente et les matériaux affectés. Parmi ces risques, les plus destructeurs dans le monde sont les mouvements de terrains. (Durville J.L.,1996)

Ces phénomènes dynamiques, au comportement complexe dans le temps et dans l'espace, intéressent depuis plusieurs années, les directions des travaux publics en Algérie qui se sont intéressées aux problèmes posés par les risques d'instabilité, notamment les glissements de terrain en raison de leur importance à l'échelle nationale.

La problématique de ce mémoire est d'étudier un cas pathologique d'un tronçon de l'autoroute Est-Ouest entre Sidi-Bel-Abbès et Mascara. Ce tronçon a subi un glissement de terrain en date du 14 janvier 2014.

De manière générale, les glissements de terrain s'expliquent par la conjonction de facteurs permanents ou de prédispositions (nature et structure des formations géologiques, pente, etc.) et de facteurs déclenchant comme la pluie, une fuite de canalisation, une secousse sismique ou des travaux de terrassement non planifiés ou mal exécutés.

Les nappes souterraines, et plus exactement leurs fluctuations liées aux conditions météorologiques ou parfois aux actions humaines, sont très souvent à l'origine de déclenchements des mouvements de versants : glissements, éboulements ou coulées boueuses, laves torrentielles.

Le travail présenté dans ce mémoire a pour objet d'analyser la stabilité d'un talus avant le glissement et après les travaux de confortement à l'aide du code PLAXIS 8 - 2D.

Afin d'atteindre cet objectif, nous avons structuré ce mémoire en quatre chapitres :

- Dans le premier chapitre, nous avons présenté une synthèse sur les différentes classifications de mouvement de terrain en se focalisant sur les glissements des terrains et les méthodes de calcul.
- Le second chapitre a été consacré à la présentation et la description des différentes méthodes de confortements présentées dans la littérature.
- Le troisième chapitre a été consacré à la présentation d'autres cas pathologiques affectant l'autoroute est-ouest et leur confortement.
- Le quatrième chapitre comporte la modélisation numérique pour l'étude de la stabilité et le confortement du talus qui a glissé à l'aide du logiciel PLAXIS.

Le mémoire est clôturé par une conclusion générale.

Table des matières

1 – INTRODUCTION.....	3
2 – LES DIFFERENTS TYPES DE MOUVEMENTS DE TERRAIN	4
2.1 – Glissement de terrain.....	4
2.2 – Les éboulements et les écroulements.....	5
2.3 – Les coulées boueuses.....	5
3 – GLISSEMENT DE TERRAIN.....	7
3.1 – Définition de glissement de terrain.....	7
3.2 – Types de glissement	7
3.2.1 – Glissement plan	7
3.2.2 – Glissement rotationnel.....	8
3.2.3 – Glissement quelconque.....	8
3.3 – Classification de glissement de terrain	9
3.4 – Les causes de glissement de terrain.....	9
4 – ÉTUDE DE GLISSEMENT DE TERRAIN	11
4.1 – Reconnaissance du site	12
4.2 – Analyse de stabilité.....	13
4.2.1 – Définition du coefficient de sécurité	13
4.2.2 – Méthodes de calcul de coefficient de sécurité	14
a – Calcul du coefficient de sécurité en glissement plane	14
b – Le coefficient de sécurité en rupture circulaire (Méthode de FELLENIUS)	15
5 – CONCLUSION	18

Chapitre 01

Les glissements de terrain

1 – INTRODUCTION

Les problèmes de stabilité de pentes se rencontrent fréquemment dans la construction des routes, des canaux, des digues et des barrages. En outre certaines pentes naturelles sont ou peuvent devenir instables. Une rupture d'un talus peut être catastrophique et provoquer des pertes en vies humaines ainsi que des dégâts naturels considérables.

Les mouvements de terrain sont très variés, par leur nature (glissements de terrains, éboulements rocheux, coulées de boues, effondrements de vides souterrains, affaissements, gonflement ou retrait des sols,...) et par leur dimension (certains glissements peuvent atteindre plusieurs dizaines de millions de m³).

Principalement, les mouvements de terrain sont bien compris : ils surviennent lorsque la résistance des terrains est inférieure aux efforts moteurs engendrés par la gravité et l'eau souterraine ou par les travaux de l'homme ; leur dynamique répond naturellement aux lois de la mécanique.

Une bonne connaissance du risque "mouvements de terrain" doit permettre de répondre aux 6 questions reproduites ci-après :



Figure 1.1 – Concepts, termes et questions à résoudre pour l'analyse et le zonage du risque « glissement de terrain. Exemple du glissement-coulée de Tessina, Belluno, Italie » (Durville J.L.,1996)

Dans ce chapitre, on présentera les différents types de mouvements de terrain, en portant un intérêt particulier aux glissements de terrain, leurs causes et leurs modes de calculs.

2 – LES DIFFERENTS TYPES DE MOUVEMENTS DE TERRAIN

De nombreuses classifications ont été proposées pour rendre compte de la diversité des mouvements de terrain. Il existe quatre principaux critères de classification de mouvements qui sont :

- Types de terrain affectés.
- Types de mouvements.
- Vitesse des processus.
- Taux de remaniement des matériaux après le mouvement.

Deux ensembles de mouvements de terrains peuvent être distingués : les mouvements lents et les mouvements rapides, ils sont classés selon leurs caractéristiques dynamiques. Parmi ces deux types, les mouvements de terrain les plus fréquents sont classés en :

- Glissements.
- Éboulement et écroulement.
- Coulées.

2.1 – Glissement de terrain

Un glissement de terrain est un phénomène géologique regroupent un ensemble de déplacements, plus ou moins brutaux, du sol ou du sous-sol sur un plan de glissement incliné. Ils résultent le plus souvent d'une rupture par cisaillement à la limite inférieure de la masse en mouvement.

Ils se caractérisent par la translation latérale d'une certaine masse de matériaux au niveau d'une surface de rupture nettement individualisée et se produisent généralement dans des matériaux faiblement cohérents (DSPR.,2008)

2.2 – Les éboulements et les écroulements

Les éboulements au sens large (phénomènes de chute) sont des mouvements rapides de masses. Le matériel éboule, qui s'est détaché du massif rocheux selon des surfaces de discontinuité (pendage, schistosité, fissures ou fractures), parcourt la plus grande partie de son déplacement dans l'air.

Ces phénomènes peuvent être classés en trois catégories : chutes de pierres et de blocs, éboulements (au sens strict) et écroulements. En général, on peut les subdiviser en trois domaines : la zone d'arrachement, la zone de transit et la zone de dépôt. (Chibani M., 2011)

Le tableau suivant regroupe la classification de ce type de mouvement :

Tableau 1.1 – Classification selon la taille des composants, les volumes et les vitesses

Type	Écroulement	Éboulement	Chute de bloc	Chute de pierre
Volume	> 1 M.m ³	100 – 100000 m ³		
Vitesse	> 40m/s	10 – 40m/s	/	/
Épaisseur	/	/	ø > 50cm	ø < 50cm

2.3 – Les coulées boueuses

Elles sont dues à la mise en mouvement, généralement brutale, de masses de sol à l'état "liquide" qui, dans leur écoulement, peuvent transporter un débit solide important (rochers, troncs d'arbres, débris de constructions, etc.) dont l'impact sur les structures peut être désastreux. (DSPR.,2008)

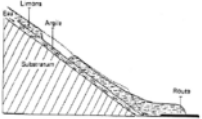
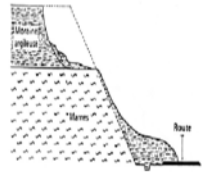





Les coulées de boue se forment souvent sur des versants et se constituent en cours d'eau à régime torrentiel. La puissance destructrice de certaines d'entre elles permet une comparaison avec les avalanches.

Lors d'un phénomène de coulée boueuse :

- Le degré de remaniement de la masse en mouvement est total.
- La vitesse et la distance parcourue par une coulée boueuse sont très variables, dépendant de nombreux facteurs (la nature des matériaux, la quantité d'eau...).

Ces quatre critères de classification de mouvement de terrain sont retenus dans le tableau suivant :

Tableau 1.2 – Principales classes et types de déstabilisation sur les versants en fonction des terrains concernés (Jeans P.,1996)

Classe	Type	Schéma	Terrain concerné	Remaniement interne	Vitesse moyenne
Glissement de terrain	<i>Glissement plan</i>		Roches peu cohérentes - Marnes - Alluvions - Moraines	Plutôt faible	Quelque cm à quelque m par jour discontinu (saison)
	<i>Glissement circulaire</i>				
	<i>Glissement de niveau d'altération</i>		Altérite		Quelque m par jour discontinue (saison)
Écroulement	<i>Écroulement de surplomb</i>		Roche cohérente stratifiée ou non	Plutôt fort	Déclenchement très rapide Chute en quelques secondes
	<i>Écroulement d'aval pendage</i>				
Coulée boueuse	<i>Coulée de solifluxion</i>		Roche meuble		Plutôt fort
	<i>Coulée de boue</i>			Plusieurs m par seconde (variable selon fluidité)	

3 – GLISSEMENT DE TERRAIN

3.1 – Définition de glissement de terrain

Les glissements de terrain sont parmi les mouvements de masse les plus spectaculaires et les plus fréquents, dont l'apparition provoque des déformations de la croûte terrestre. Ils se développent dans un massif de sols meubles ou de roches tendres et se produisent dans des circonstances très variées, affectant les ouvrages construits par l'homme (déblais et remblais) ou tout simplement, des pentes naturelles.

Les volumes en jeux sont compris entre quelques mètres cubes et quelques millions de mètres cubes. L'origine, le déroulement et les effets des mouvements de terrain sont extrêmement hétérogènes (Chibani M.,2011). Les déplacements peuvent être lents (quelques millimètres par an) ou très rapides (quelques centaines de mètres par jour), en fonction des mécanismes initiateurs, des matériaux considérés et de leur structure.



Figure 1.2 – Glissement de terrain (Turque ; 2003)

3.2 – Types de glissement

3.2.1 – Glissement plan

Ce type de glissement se produit lorsque, le massif en pente est constitué de sols meubles reposant sur un substratum, ou encore lorsque la longueur de la surface de rupture potentielle est très grande par rapport à l'épaisseur du terrain.

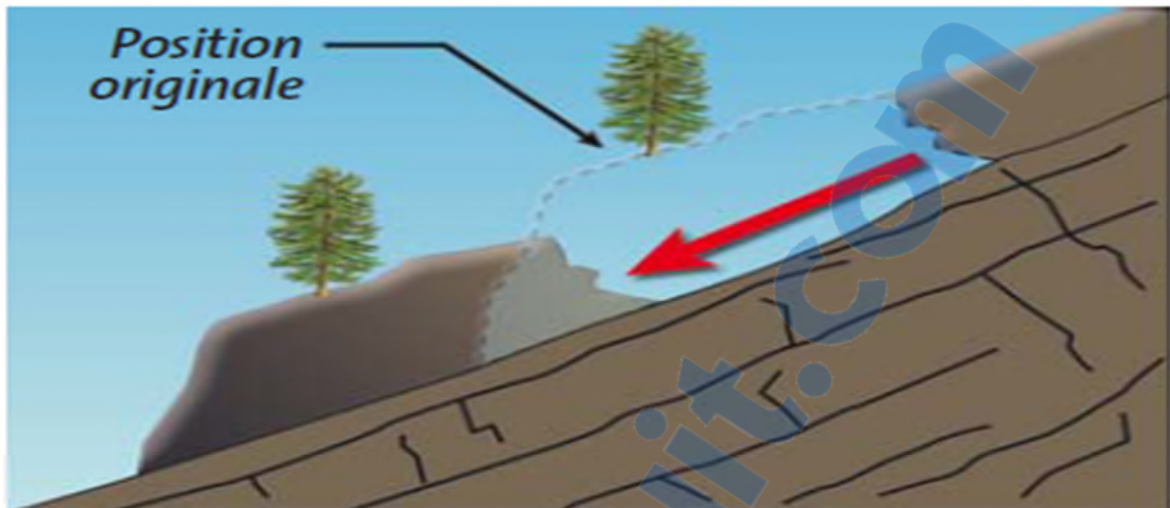


Figure 1.3 – Glissement plan (Aissa M. H.,2011)

3.2.2 – Glissement rotationnel

Lors de glissement rotationnel, la masse se déplace vers l'aval le long d'une surface de rupture circulaire. Habituellement, les glissements de ce type sont de faible volume et le déplacement des matériaux est limité. Ils se produisent principalement dans des terrains meubles homogènes surtout argileux et silteux.

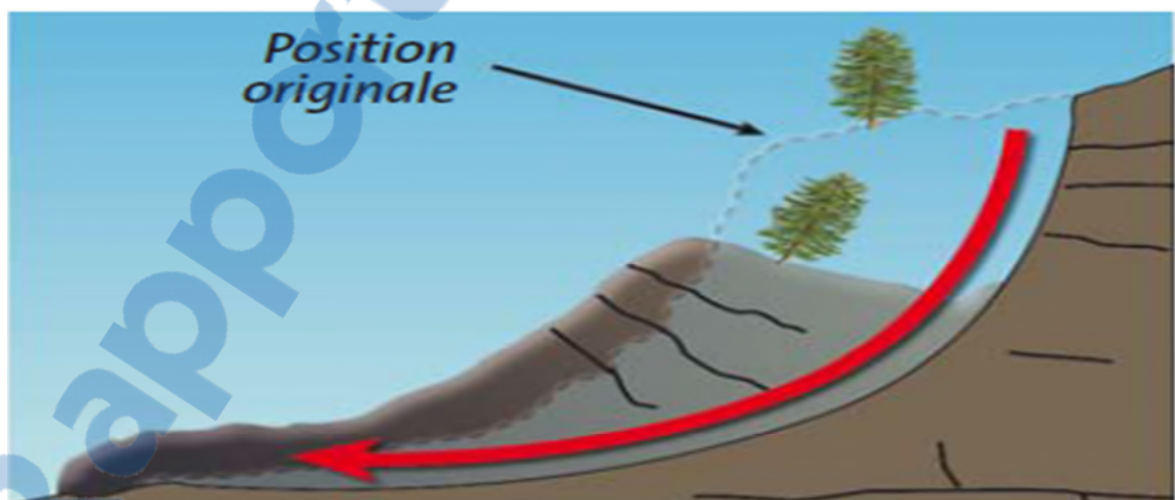


Figure 1.4 – Glissement rotationnel (Aissa M. H.,2011)

3.2.3 – Glissement quelconque

On dit qu'un glissement est quelconque ou composite lorsque la surface de rupture est un mélange des deux types précédemment cités.

3.3 – Classification de glissement de terrain

Les glissements peuvent être classés selon la profondeur estimée de la surface de glissement et selon la vitesse moyenne à long terme des mouvements (comme mesure de leur activité). Lors de l'évaluation du danger potentiel, la profondeur de la surface de glissement ou la vitesse de glissement ne sont pas les seuls facteurs déterminants. Les mouvements différentiels qui apparaissent doivent également être pris en compte. En effet, la masse en mouvement n'a pas la même vitesse ni la même profondeur à mesure qu'elle progresse. Des zones d'extension (fentes, crevasses) et de compression (bourrelets) se forment en surface. Ces phénomènes peuvent entraîner la formation de fissures dans des bâtiments, voire les détruire. (Fahsi M.,2013)

Tableau 1.3 – Classification selon l'activité en fonction de l'évaluation de la surface et de la vitesse moyenne de glissement.

Glissement	Surface de glissement	Vitesse de glissement
<i>Superficiel substabilisé, très lent</i>	0 – 2m	0 – 2 cm /an
<i>Semi profond peu actif, lent</i>	2 – 10m	2 – 10 cm /an
<i>profond actif (ou lent avec phases rapides)</i>	> 10m	> 10 cm /an

3.4 – Les causes de glissement de terrain

En règle générale, les glissements sont dus à des modifications soit dans les moments résistants, soit dans les moments moteurs. Il y a rupture lorsque les moments moteurs sont supérieurs ou égale aux moments résistants, d'origine naturelle ou anthropique.

Donc, pour connaître les causes de glissement de terrain, il est important de connaître les paramètres qui influent sur les moments moteurs et les moments résistants.

Comme on peut distinguer en plus de ces paramètres, des facteurs permanents et des facteurs variables dans le temps qui peuvent provoquer un glissement de terrain.

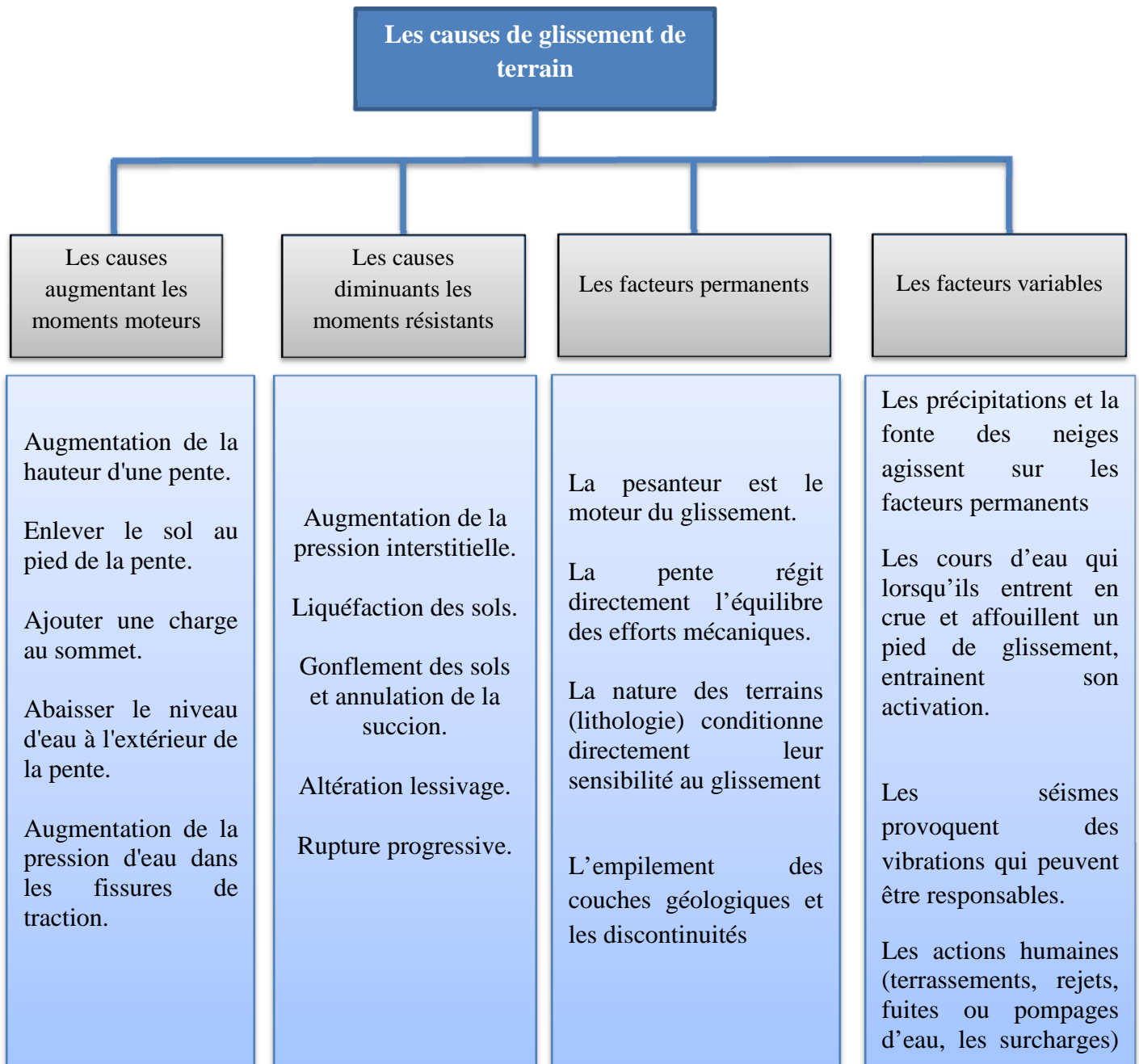


Figure 1.5 – Les différents causes de glissements de terrain

4 – ÉTUDE DE GLISSEMENT DE TERRAIN

L'étude d'un glissement de terrain est composée généralement de trois phases qui sont reliées l'une par rapport à l'autre, le tableau ci-dessous montre les différentes phases de l'étude.

Tableau 1.4 – Méthodologie de l'étude d'un glissement de terrain

PHASE D'ÉTUDE	NATURE DES OPÉRATIONS
Reconnaissance de sol et étude géotechnique	<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;">Reconnaissance Géologique</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;">Reconnaissance Géophysique</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;">Reconnaissance Géotechnique</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;">Hydrogéologie</div> </div>
Analyse de stabilité	<div style="text-align: center;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 10px; margin-bottom: 10px;">Etablissement de modèle de calcul (Géométrie, Hydraulique, Caractéristiques géotechniques)</div> <div style="font-size: 2em; margin-bottom: 10px;">↓</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 10px; margin-bottom: 10px;">Détermination de la cinématique des mouvements</div> <div style="font-size: 2em; margin-bottom: 10px;">↓</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 10px;">Calcul de stabilité</div> </div>
Définition d'un confortement	<div style="text-align: center;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 10px; margin-bottom: 10px;">Calage des caractéristiques mécaniques au moment de la rupture $F_s=1$</div> <div style="font-size: 2em; margin-bottom: 10px;">↓</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 10px; margin-bottom: 10px;">Analyse de l'influence des différents paramètres de calcul de stabilité</div> <div style="font-size: 2em; margin-bottom: 10px;">↓</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 10px; margin-bottom: 10px;">Choix d'une solution</div> <div style="font-size: 2em; margin-bottom: 10px;">↓</div> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 10px;">Travaux</div> <div style="font-size: 2em;">←</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 10px;">Surveillance</div> </div> </div>

La reconnaissance des sols permet d'appréhender les problèmes qui peuvent se poser lors de l'étude d'un projet de construction ou lors de l'expertise de sinistres. La reconnaissance des propriétés d'un terrain constitue le lien entre la cause d'un sinistre et les remèdes que l'on se propose de mettre en place.

4.1 – Reconnaissance du site

Il y a sommairement, deux catégories de moyens de reconnaissances qui complètent les investigations géologiques de surface :

- Les méthodes d'observation du terrain, soit en place, soit à l'aide d'échantillons (prolongement en profondeur de la géologie de surface) : puits, tranchées, sondages...
- Les méthodes de mesure *in-situ* basées sur la mesure d'une propriété physique du terrain, dont font partie les essais géophysiques.

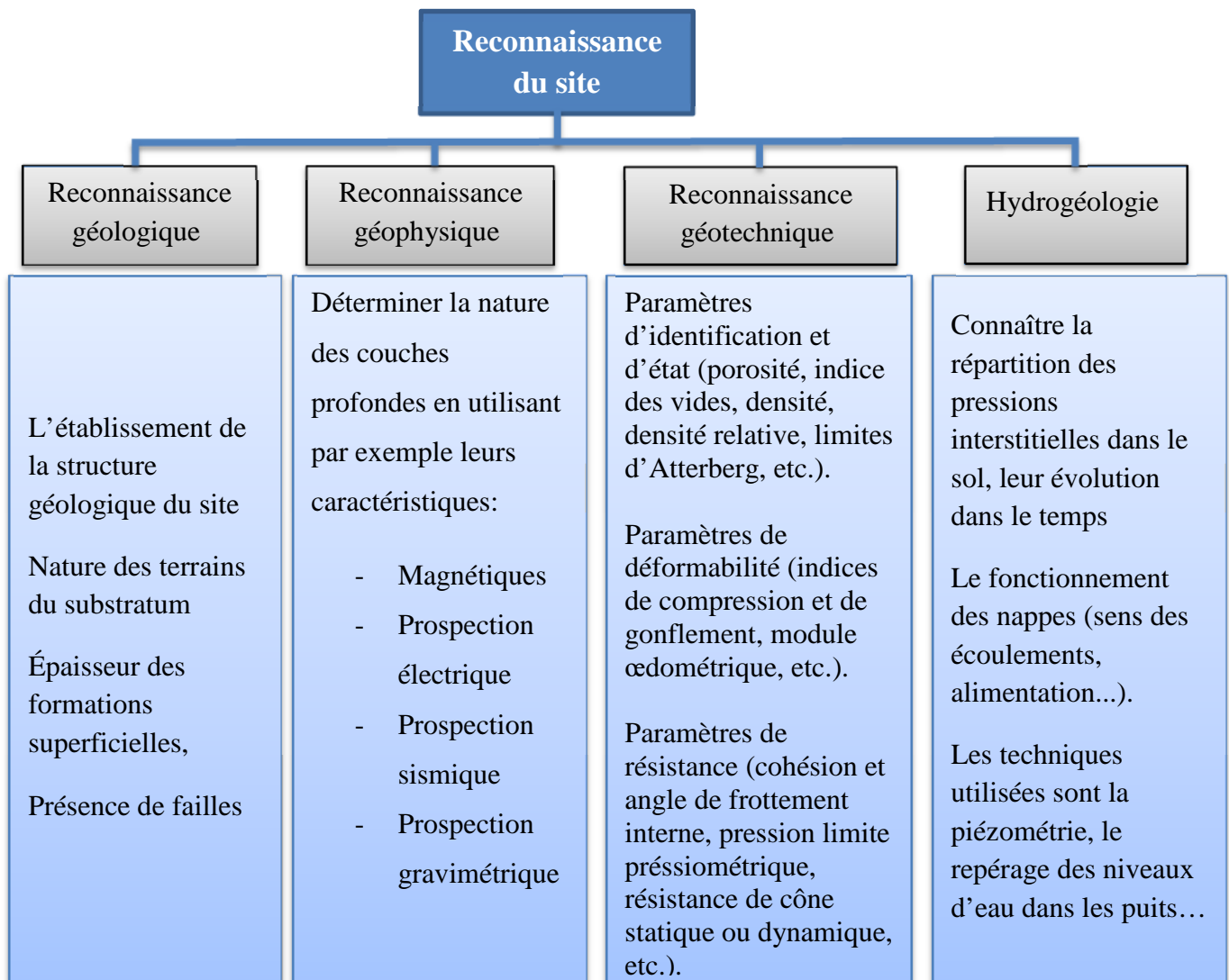


Figure 1.6 – Les facteurs de reconnaissance de site

L'ensemble de ces reconnaissances recueillies fait l'objet, en général, d'une représentation sur un fond de plan et sur une ou plusieurs coupes longitudinales. Un modèle géotechnique est construit pour les calculs de stabilité, dans lequel la surface topographique, les différentes couches de sol et les hypothèses hydrauliques sont définies.

Ces dernières sont essentielles : un préalable à tout calcul de stabilité est de définir la répartition des pressions interstitielles, dont la connaissance est nécessaire pour l'analyse de la stabilité mécanique.

4.2 – Analyse de stabilité

4.2.1 – Définition du coefficient de sécurité

Le calcul de la stabilité des talus est généralement estimé à l'aide d'un coefficient appelé : coefficient de sécurité F_s . Ce coefficient est défini comme étant le rapport du moment par rapport à un point fixe de la résultante des forces résistantes au glissement aux forces provoquant le glissement.

$$F_s = \frac{\Sigma \text{Moment des forces résistant au mouvement}}{\Sigma \text{Moment des forces provoquant le mouvement}} \quad (1)$$

Théoriquement, le talus est dit stable si $F_s > 1$. L'état d'équilibre limite (rupture) est obtenu lorsque $F_s = 1$. Mais dans la pratique, le coefficient F_s est compris entre 1,3 et 1,5 en tenant compte des facteurs suivants :

- Les erreurs dues à l'exactitude des méthodes de calcul de la stabilité du bord.
- Les incertitudes expérimentales de la détermination des propriétés physico-mécaniques des roches, comme par exemple la valeur moyenne du poids volumique des roches composant le massif.
- Les incertitudes de la détermination de l'influence de la fissurité.
- L'influence des charges dynamiques provoquées par le tir, par le mouvement des moyens de transport et par les séismes. (M'zoughem K.,2005)

4.2.2 – Méthodes de calcul de coefficient de sécurité

Une fois la résistance au cisaillement, la pression d'eau dans les pores, la géométrie de la pente et d'autres propriétés du sol et la pente sont établis, les calculs de la stabilité des talus doivent être effectués pour s'assurer que les forces résistant sont suffisamment supérieure à la force qui tend à provoquer le glissement.

a – Calcul du coefficient de sécurité en glissement plane

Le modèle de calcul est celui d'un massif de sol infini représenté par une interface plane sur un substratum, avec un écoulement parallèle à la pente. La *figure 1.5* suivante représente une tranche de sol et les forces qui lui sont appliquées :

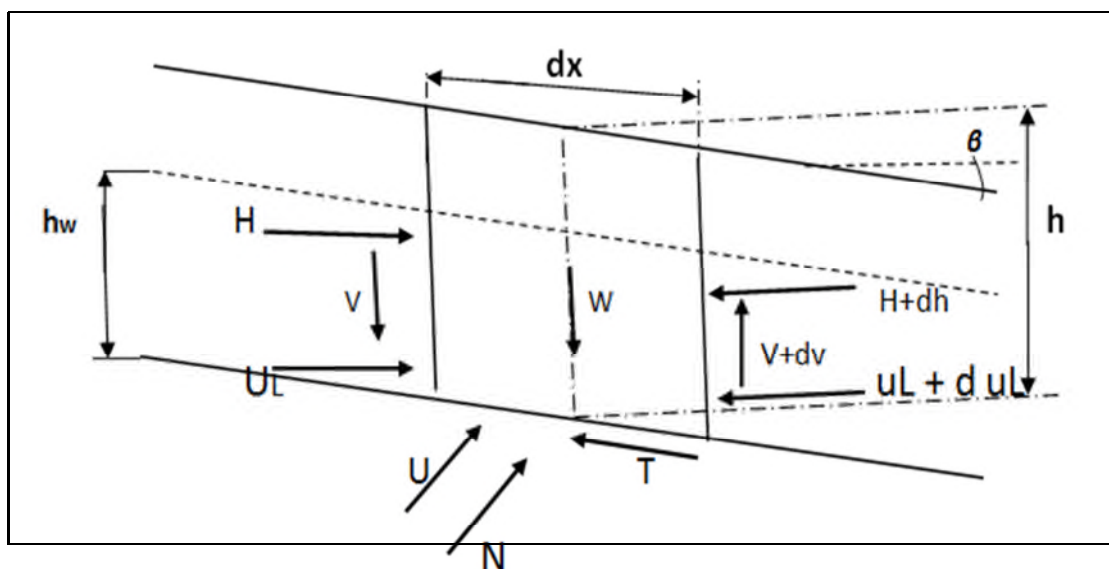


Figure 1.7 – Modèle de calcul on rupture plan (Chibani M.,2011)

Avec :

- W : Le poids du bloc de sol considéré.
- V et H : Les efforts sur les côtés du bloc.
- N et T : Les réactions normale et tangentielle à la base du bloc.
- U_L : L'effort dû à la pression d'eau latérale.
- U : L'effort dû à la pression d'eau à la base.

Compte tenu de l'hypothèse de pente infinie, on peut admettre que $V = 0$ et que H et U_L s'équilibrent de part et d'autre.

En écrivant que la résultante des forces appliquées est nulle, on peut calculer N et T , ainsi que le coefficient de sécurité $F = T_{max} / T$.

Le critère de rupture de Coulomb s'écrit :

$$T_{max} = c' + \frac{dx}{\cos B} + (N - U)tg\Phi'$$

On obtient l'expression suivante pour

$$F = \frac{2}{\sin 2B} \frac{c'}{\gamma} + \frac{(\gamma \cdot h - \gamma \cdot w \cdot hw)}{\gamma \cdot h \cdot tgB} tg\Phi'$$

b – Le coefficient de sécurité en rupture circulaire (Méthode de FELLENIUS)

Cette méthode consiste à considérer les forces qui tendent à retenir un certain volume de terrain, délimité par les forces libres du talus et une surface de rupture potentielle, et celles qui tendent à la mettre en mouvement (Chibani M.,2011).

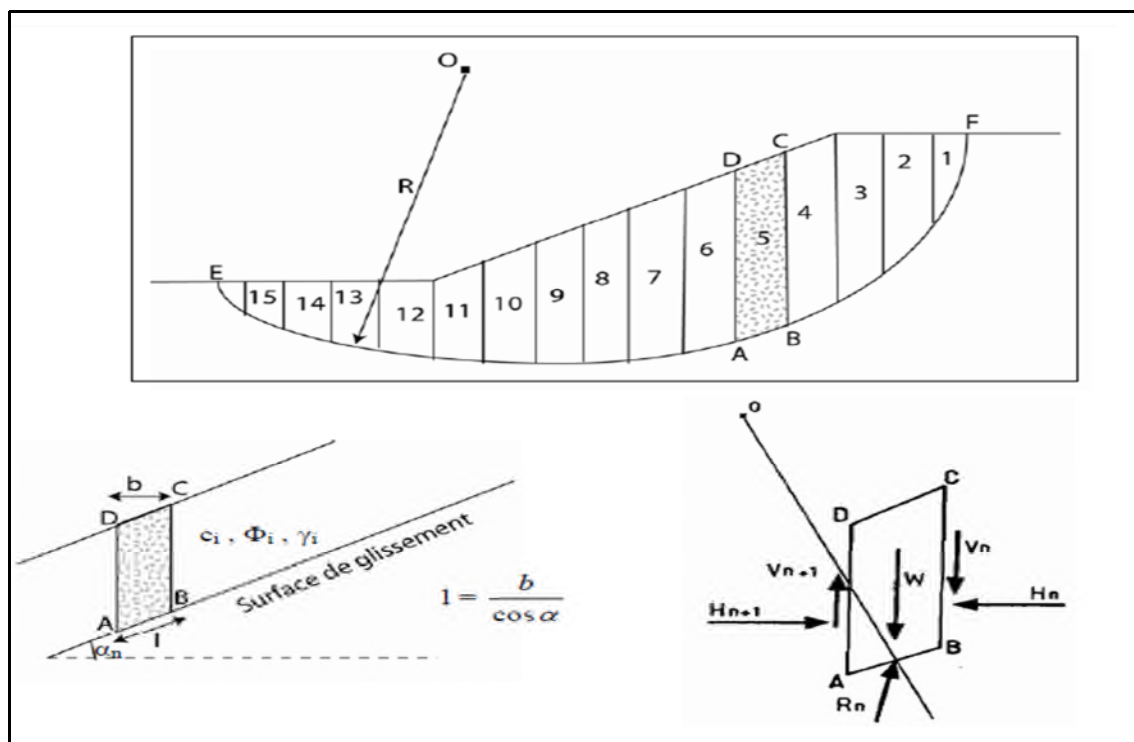


Figure 1.8 – Découpage d'un talus en tranches et les forces agissantes sur une tranche. (Chibani M.,2011)

Soit un cercle quelconque de centre O et de rayon R pour lequel on vérifie la sécurité vis-à-vis du risque de glissement. La méthode des tranches consiste à découper le volume de sol (compris dans l'arc EF) en un certain nombre de tranches limitées par des plans verticaux.

En l'absence d'eau, une tranche (n) est soumise à :

- Son poids $W = \gamma_n \cdot h_n \cdot b_n$
- Les efforts inter-tranches décomposés en efforts horizontaux H_n et H_{n+1} et en efforts verticaux V_n et V_{n+1} .
- La réaction R_n du milieu sous-jacent sur l'arc AB (résistance de cisaillement). Elle se décompose en une composante normale et tangentielle.

Par rapport au centre O, on peut définir :

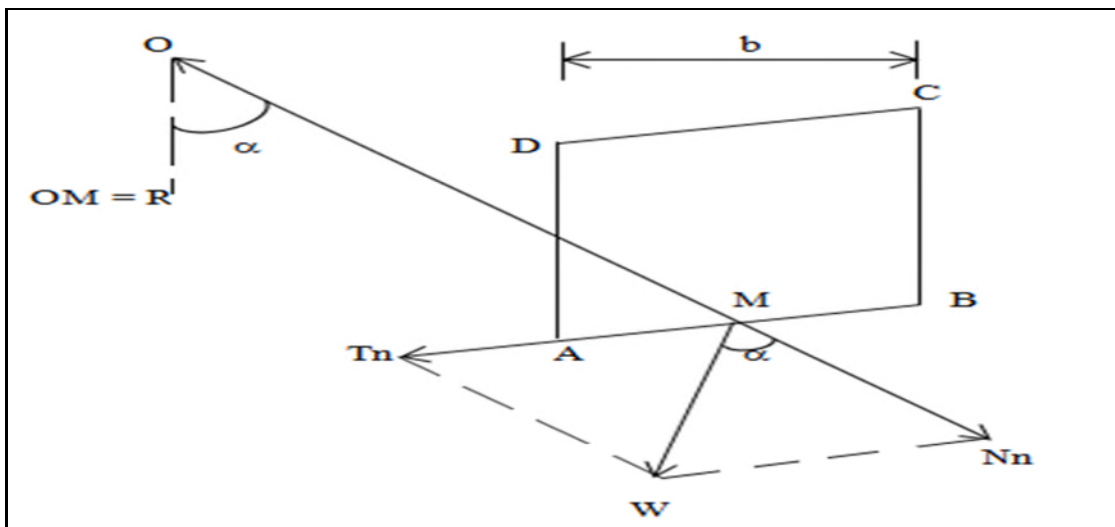


Figure 1.9 – Forces agissantes sur une tranche d'après l'hypothèse de FELLENIUS
(Chibani M.,2011)

D'après la loi de Coulomb :

$$R_n = c_n \cdot AB + N_n \cdot \tan \Phi_n \quad (2)$$

Par ailleurs :

$$N_n = W_n \cos \alpha_n$$

Donc :

$$R_n = c_n \cdot AB + W_n \cos \alpha_n \tan \Phi_n \quad (3)$$

D'autre part

$$AB = \frac{bn}{\cos \alpha} \quad (4)$$

La somme des moments résistants maximaux s'écrit donc :

$$\sum_{n=1}^m R. \left(c_i \cdot \frac{bn}{\cos \alpha} + W_n \cos \alpha_n \tan \Phi_i \right) \quad (5)$$

Où

m = nombre total de tranches.

c_i, Φ_i = caractéristiques mécaniques de la couche dans laquelle est situé l'arc AB.

Le moment moteur est dû à T_n et égal à $T_n \cdot R$

Par ailleurs :

$$T_n = W_n \sin \alpha_n \quad (6)$$

En remplaçant (5) et (6) dans l'équation (1), on obtient l'expression du facteur de sécurité :

$$F_s = \frac{\sum c_i \frac{b_i}{\cos \alpha} + \sum W_n \cos \alpha_n \tan \Phi_i}{\sum W_n \sin \alpha_n}$$

Les paramètres intervenant dans le calcul de F_s sont donc :

- b : La largeur des tranches ;
- α : L'angle orienté que fait le rayon du cercle passant par le milieu de la base de la tranche avec la verticale ;
- La hauteur de la tranche pour le calcul du poids W .

5 – CONCLUSION

L'étude des mouvements des terres à travers le monde a permis de mettre en évidence l'envergure de ces phénomènes qui peuvent mettre en péril la vie des personnes et entraîner des dégâts aux constructions.

La connaissance parfaite des causes d'apparition des glissements de terrains diminue le risque d'occurrence d'une catastrophe et par conséquent évite des pertes à la fois matérielles et humaines.

Afin d'anticiper tout risque de glissement, il y a lieu de mettre en application certaines méthodes de confortement plus ou moins lourdes suivant les pathologies, c'est ce qu'on va présenter dans le chapitre suivant.

Table des matières

1 – INTRODUCTION.....	19
2 – CHOIX DE METHODE DE CONFORTEMENT.....	19
3 – CLASSIFICATION DES METHODES DE CONFORTEMENT.....	20
3.1 – Aspect préventif	20
3.2 – Aspect curatif	21
4 – APPROCHE DOUCE	22
4.1 – Terrassement	22
4.1.1 – Remblai de pied.....	22
4.1.2 – Allègement en tête.....	23
4.1.3 – Reprofilage	23
4.1.4 – Purge.....	23
4.2 - Drainage	24
4.3 – Végétation	25
5 – APPROCHE DURE	25
5.1 – Le renforcement	26
5.1.1 – Le renforcement par géotextiles	26
5.1.2 – Le renforcement par géogrilles.....	27
5.1.3 – La technique pneu sol.....	27
5.1.4 – Le renforcement par ancrage	28
5.1.5 – Le renforcement par coulage	28
5.2 – Amélioration thermique et chimique des sols	29
5.2.1 – Cuisson	29
5.2.2 – Consolidation électro-osmose.....	29
5.2.3 – Consolidation électrochimique	29
5.3 – Confortement par ouvrages de soutènement	30
5.3.1 – Ouvrage à structure apparente	30
5.3.2 – Ouvrage à structure enterré.....	31
6 – TECHNIQUES DE SURVEILLANCE.....	31
7 – CONCLUSION	31

Chapitre 02

Les méthodes de confortement

1 – INTRODUCTION

Les confortements des talus au glissement sont l'ensemble des méthodes qui servent à stabiliser la masse de terrain instable. Les dispositifs utilisés pour le confortement des pentes instables, ou susceptibles de le devenir à cause des travaux, sont nombreux et variés. Ils peuvent être géométriques (modification de la pente du talus ou réduction de sa hauteur) ou hydrauliques (rabattement et drainage de la nappe).

D'autres techniques peuvent aussi être utilisées comme le boisement, la recharge en pied du talus (berges), le clouage à l'aide de pieux ou barrettes et le soutènement par murs gabions ou en béton armé ou à l'aide de palplanches métalliques.

Le choix de l'une de ces solutions dépendra de la nature du talus à conforter (versant naturel ou artificiel), de sa géométrie (pendage, longueur et profondeur), du massif de terrain constitutif (sol meuble ou compact) et du régime hydraulique existant (niveau de la nappe). Parmi les solutions techniquement possibles, on retiendra la moins coûteuse et la plus facile à mettre en œuvre. (Khemissa M.,2006).

Dans ce chapitre on présentera sommairement différentes méthodes de confortement afin d'éviter l'occurrence du phénomène de glissement de terrain.

2 – CHOIX DE METHODE DE CONFORTEMENT

Le choix de la méthode de confortement varie d'une part avec les caractéristiques et l'état de chaque site comme le type de sol, les conditions de drainage et les surcharges, et d'autre part avec le coût économique (quand il existe plusieurs solutions de confortement).

La méthode de confortement choisie doit répondre aux exigences suivantes :

- Coté résistance : la méthode doit assurer la stabilité du talus, ainsi le mode de renforcement ne génère aucun risque d'augmenter les efforts moteurs de notre talus.
- Coté économique : le mode de renforcement doit être le moins coûteux et le plus disponible dans le marché, car il y a des modes de renforcement qui

nécessitent une importation, en règle générale on utilise ce qui est disponible (locale) et moins coûteux.

- Coté technologique (ouvrabilité et maniabilité) : la méthode de renforcement doit être simple et ne demande qu'un minimum d'effort ainsi qu'on peut la réaliser facilement. (Aissa M. H.,2011)

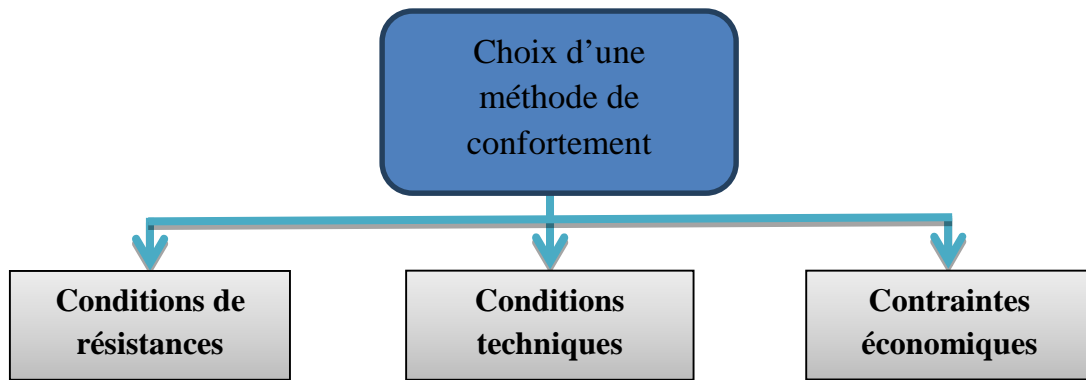


Figure 2.1 – Les critères de choix de la méthode de confortement. (Fahsi M.,2013)

3 – CLASSIFICATION DES METHODES DE CONFORTEMENT

Les méthodes de confortement peuvent être classées selon deux aspects : préventif et curatif.

3.1 – Aspect préventif

Les risques d'instabilité des sols, qu'ils résultent de phénomènes naturels ou des activités humaines, font l'objet de travaux de confortement préventif. Ceux-ci sont effectués avec des méthodes de renforcement, de soutènement, développées par le génie civil, mais mettent aussi en œuvre plusieurs procédés spécifiques comme :

- Soutènements et traitements des talus en déblai ou en remblai devant être réalisés pour le passage des chaussées des routes et autoroutes et des formes d'assise des bâtiments de nature diverses.
- Protections et confortements de site situé géomorphologiquement en zones dites sensibles ou fragiles et contenant un ou plusieurs ouvrages ou installations stratégiques.
- Soutènement et étaielements à mettre en place, en phase provisoire de travaux de terrassement importants ou excavations en sous-sol assez profondes.

3.2 – Aspect curatif

Cas de glissement déjà produit et qui s'est immobilisé et dont il y a lieu de prévoir le soutènement et protections nécessaires vis-à-vis d'éventuels mouvements d'instabilité récurrents.

Cas de glissement amorcé (à partir de signes apparents) et soumis encore à un mouvement actif à vitesse lente ou moyenne.

En effet l'un ou l'autre aspect (préventif ou curatif) suivant le cas posé, ces deux types d'approche sont généralement reconnus à l'emploi, à savoir : l'approche douce et l'approche dure.

L'approche douce faisant appel à l'utilisation des opérations simples telles que les terrassements le drainage et la végétation et d'autre part l'approche dure introduisant un peu plus les facteurs de la reconnaissance géotechnique et de sollicitation du cas et un apport technologique plus développé (DSPR.,2008), tels que les renforcements, l'amélioration des caractéristiques du sol et le soutènement par éléments résistants comme le montre la figure suivante :

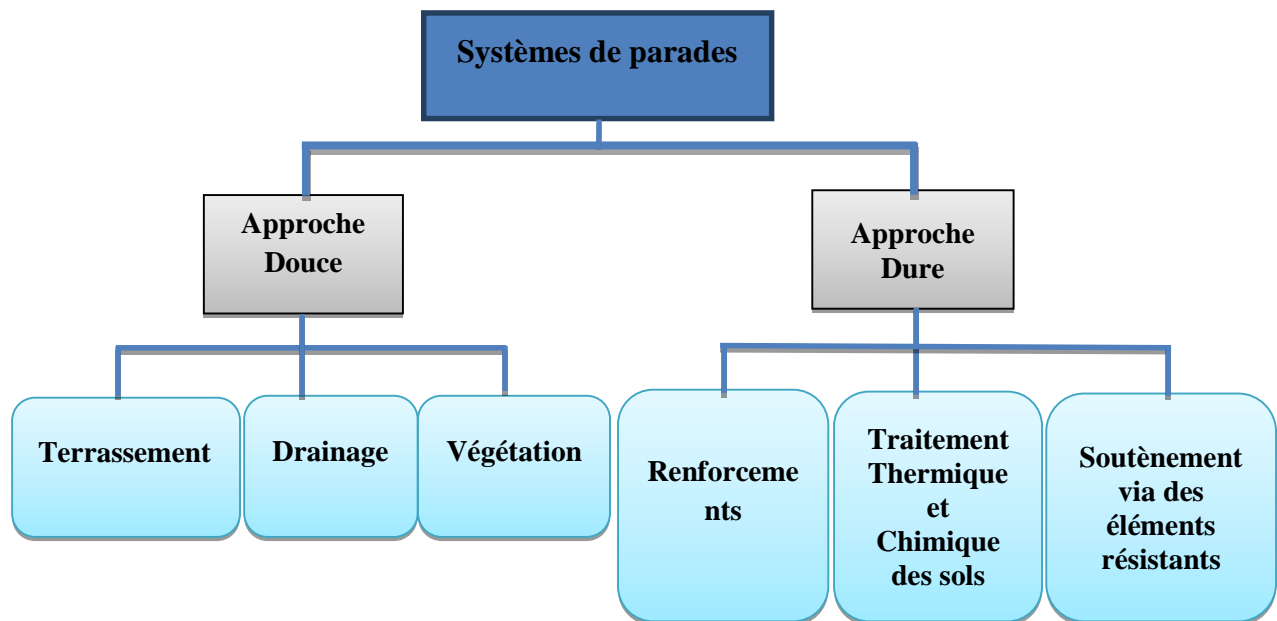


Figure 2.2 – Organigramme montre les types d'approche des systèmes de parade.
(Bedr S.,2008)

4 – APPROCHE DOUCE

4.1 – Terrassement

La stabilité du talus dépend directement de la géométrie du versant, le terrassement reste le moyen d'action le plus naturel. On peut distinguer trois groupes de méthodes de stabilisation par terrassement :

- Les actions sur l'équilibre des masses : allègement en tête, remblai en pied.
- Les actions sur la géométrie de la pente : purge et reprofilage.
- Les substitutions partielles ou totales de la masse instable.

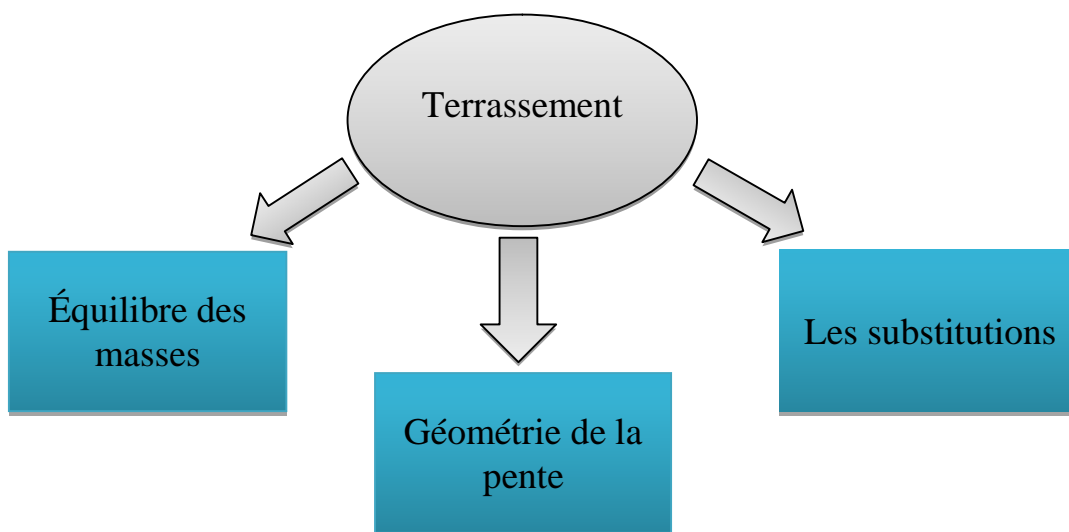


Figure 2.3 – Processus de terrassement. (Bedr S.,2008)

4.1.1 – Remblai de pied

Le chargement en pied d'un glissement est une technique souvent utilisée, généralement efficace. L'ouvrage, également appelé banquettes, berme ou butée, agit par contre-balancement des forces motrices. Pour qu'il soit efficace, il faut réaliser un ancrage dans les formations sous-jacentes en place. Comme dans le cas d'un ouvrage de soutènement, le dimensionnement doit justifier de la stabilité au renversement, de la stabilité au glissement sur la base et de la stabilité au grand glissement. (Philippe L.,2002)

4.1.2 – Allègement en tête

L'allègement en tête de glissement consiste à venir terrasser dans la partie supérieure. Il en résulte une diminution du poids moteur et par conséquent, une augmentation du coefficient de sécurité. La méthode de dimensionnement consiste en un calcul de stabilité le long de la surface de rupture déclarée en prenant en compte la modification de géométrie en tête. On peut également substituer le matériau terrassé par un matériau léger (polystyrène, matériau à structure alvéolaire, etc.). (Philippe L.,2002)

4.1.3 – Reprofilage

Les conditions de stabilité d'un talus étant directement liées à sa pente, on peut assez simplement augmenter la sécurité par retalutage du terrain naturel. Dans ce sens, le procédé s'apparente à l'allègement en tête : il consiste en un adoucissement de la pente moyenne. Ce type de traitement est particulièrement bien adapté aux talus de déblais et il est de pratique courante. Notons que l'exécution de risbermes a l'avantage d'améliorer la stabilité par rapport à une pente unique et de créer des voies d'accès pour l'entretien ou des travaux complémentaires. (Philippe L.,2002)

4.1.4 – Purge

Les techniques de terrassement s'accompagnent fréquemment de purges du matériau déplacé par le glissement. Cette solution est généralement limitée aux glissements de taille modeste. On peut dans certains cas purger l'ensemble du matériau glissé à condition que la surface mise à nu soit stable.

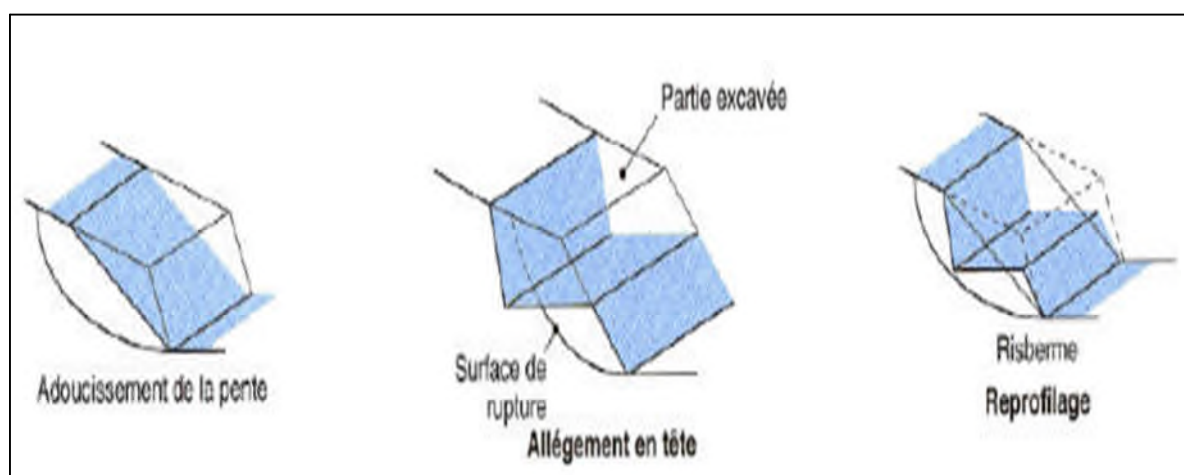


Figure 2.4 – Les techniques de terrassement (DSPR.,2008)

4.2 - Drainage

L'eau joue un rôle très important dans les sols, en particulier dans les sols fins cohérents. En effet, la présence de l'eau dans le sol crée des pressions interstitielles au sein de ce dernier et diminue sa cohésion. Comme il est à rappeler aussi que le poids des terres augmente avec la présence de l'eau.

En ce sens que l'eau constitue un facteur moteur déterminant dans les phénomènes de glissements des terrains où le plus souvent, pour prévenir ou limiter les effets d'un glissement déclaré, on fait recours aux techniques de drainage qui ont pour but de réduire les pressions interstitielles dans les masses de sol jugées critiques. Pour ce faire, deux dispositifs de drainage sont généralement employés, le drainage superficiel et le drainage profond, selon qu'on veut éviter que le sol reçoive de l'eau où qu'on veut expulser l'eau du sol. (Sekkak M.,2014)

La figure qui suit illustre les deux dispositifs employés.

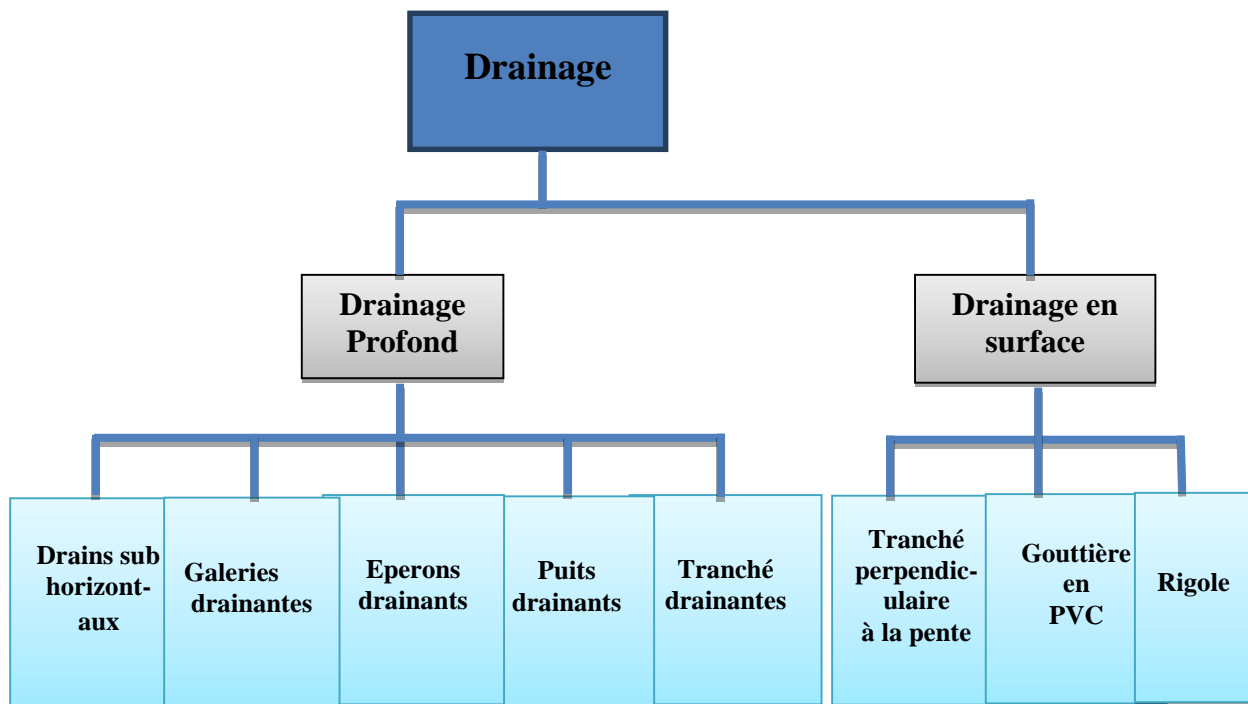


Figure 2.5 – Schémas montre les dispositifs de drainages. (Fahsi M.,2013)

4.3 – Végétation

La végétation possède un rôle stabilisateur mécanique par enracinement dans le sol. C'est une méthode écologique et économique qui consiste à stabiliser le sol avec des plantations appropriées au terrain et à l'environnement. L'utilisation de la végétation arboricole et herbacée a de tout temps donné des résultats positifs dans la prévention de l'érosion et le renforcement de la stabilité des pentes. D'ailleurs, ces dix dernières années, l'approche "douce" par l'utilisation de la végétation pour la stabilisation des pentes l'emporte sur l'approche "dure" qui utilise des dispositifs de stabilité mécanique. Ainsi à ce souci pour l'environnement s'ajoutent une meilleure connaissance et la disponibilité de plus d'informations relatives à la végétation dans les travaux d'ingénierie. (Louis C.,1984)



Figure 2.6 – L'implantation des plantes dans un talus.

5 – APPROCHE DURE

Dans le domaine de la stabilisation des talus, l'utilisation d'une approche dure s'impose régulièrement comme une méthode pertinente, car les délais d'exécution sont réduits eu regard des méthodes utilisées selon l'approche douce. Cette approche s'attaque au problème en modifiant, d'une manière directe, les propriétés, mécanique, physique ou chimique du sol. Les systèmes de parades qui utilisent cette approche sont :

- Le renforcement.
- Le soutènement.
- Le durcissement.

5.1 – Le renforcement

Le renforcement est un domaine récent et particulier. Il recouvre toute technique permettant d'améliorer le comportement géotechnique d'un massif de sol.

En général, on renforce un massif de sol pour deux raisons principales :

- Soit pour limiter ses déformations à chargement fixé.
- Soit pour augmenter la capacité du sol à supporter des déformations élevées.

Parmi les différents procédés décrits dans la norme (NF P 94-210 qui est spécifique aux méthodes de renforcement des sols) on peut retenir quelques techniques valables au confortement des talus.

5.1.1 – Le renforcement par géotextiles

Les géotextiles sont des produits textiles à bases de fibres polymères utilisés au contact du sol dans le cadre d'applications dans le domaine de la géotechnique et du génie civil. Leurs domaines d'utilisation sont très vastes et concernent aussi bien la géotechnique routière, les centres de stockage de déchets, les aménagements hydrauliques, la stabilisation des sols et le renforcement des fondations. (Bouffoul K.,2005)



Figure 2.7 – Renforcement par géotextiles (Bouffoul K.,2005)

5.1.2 – Le renforcement par géogrilles

Les géogrilles sont classées parmi les produits géosynthétiques. Elles se présentent sous la forme de grilles monolithiques, tissées ou à fils soudés dont la maille peut avoir des formes diverses. On distingue, en particulier, les géogrilles uni-axiales ayant une résistance à la traction plus élevée dans une direction que dans la direction perpendiculaire et dont la maille est allongée, et les géogrilles biaxiales ayant la même résistance dans les deux directions du maillage qui, dans ce cas, est carré. (Boulfoul K.,2005)

La figure qui suit présente un exemple de géogrille uniaxiale.



Figure 2.8 – Renforcement par géogrilles. (Boulfoul K.,2005)

5.1.3 – La technique pneu sol

Cette technique diffère du procédé géogrilles par le fait que le renforcement n'est plus assuré par des nappes géotextiles mais par des niveaux de pneumatiques usagés de véhicules légers, reliés entre eux par sangles en polyester ou attaches métalliques et dont les flancs sont entièrement découpés.



Figure 2.9 – Renforcement par Pneusol. (Bedr S.,2008)

5.1.4 – Le renforcement par ancrage

Il s'agit de renforcer le sol par des barres métalliques au bout desquelles sont placés des blocs d'ancrage. Le renforcement est ainsi assuré par frottement ainsi que par contrebutée. Les barres ont une section ronde pour réduire la surface soumise à la corrosion et sont liées au parement composé d'écailles en béton.



Figure 2.10 – Renforcement par ancrage. (Cartier G.,1986)

Le principe consiste à réduire les forces actives du glissement et à accroître les contraintes normales effectives sur la surface de rupture. Pour ce faire, on ancre des tirants constitués de câbles d'acier multi-torons dans le terrain stable situé sous la surface de rupture, et on applique en tête un effort de traction. Cet effort peut être réparti sur la surface du terrain par l'intermédiaire de plaques ou de petits massifs en béton armé. Dans de nombreux cas, les tirants sont combinés à un mur ou à des longrines. (Sekkak M.,2014)

5.1.5 – Le renforcement par clouage

Le clouage des pentes consiste à goujonner les masses instables sur le substratum fixe en répartissant *in situ* des groupes de pieux verticaux ou des inclusions perpendiculaires à la surface de glissement. Cette méthode connaît actuellement un certain essor pour les cas où les méthodes classiques de stabilisation par drainage ou terrassement ne sont pas applicables. L'efficacité de la technique s'appuie, d'une part, sur le transfert des efforts de glissement vers le substratum au droit des points durs

constitués par les clous et, d'autre part, sur un renforcement global de la masse déformable par effet de voûte et effet de groupe dû à la densité de clous. (Cartier G.,1986)

5.2 – Amélioration thermique et chimique des sols

Ces techniques consistent principalement à changer les paramètres essentiels du sol en fonction des conditions du site sensible au risque de glissement après avoir analysé et diagnostiqué le terrain concerné. On peut distinguer quelques techniques pour le confortement des glissements :

5.2.1 – Cuisson

La cuisson est depuis quelques millénaires utilisée pour faire des céramiques. Il est donc normal que l'on ait pensé à cette méthode pour améliorer les caractéristiques de certains sols. Cuire ou chauffer modérément sont deux choses tout à fait différentes. Seuls des essais de laboratoire systématiques peuvent préciser la limite de ces procédés effectués sur des échantillons saturés et non saturés. (Fahsi M.,2013)

5.2.2 – Consolidation électro-osmose

Cette technique a été découverte par (Veder, 1968). Si on fait passer un courant électrique continu entre deux électrodes séparées par une paroi poreuse de longueur l et de section S , il s'écoule un débit. Si on réalise une telle expérience on constate que le débit initial décroît progressivement pour presque s'annuler à la longue. On constate en outre que cette simple électro-osmose fait durcir le sol entre la barrière et la cathode.

5.2.3 – Consolidation électrochimique

La consolidation électrochimique consiste à introduire des ions convenables à l'anode pour que la barrière se rapproche le plus possible d'elle et ainsi le volume de la zone durcie augmente. Initialement la consolidation se faisait en utilisant des anodes en aluminium. Mais les anodes métalliques ont un très grave défaut. Le sol se dessèche autour de l'anode et se décolle d'elle : il en résulte une forte augmentation des résistances électriques de contact. (Fahsi M.,2013)

5.3 – Confortement par ouvrages de soutènement

Les ouvrages de soutènement comprenant tous les types de murs et de systèmes d'appui dans lesquels des éléments de structure subissent des forces imposées par le matériau soutenu. Ils peuvent être classés de plusieurs façons d'où, on peut distinguer quatre principales façons décrites et illustrées dans le schéma de la figure suivante :

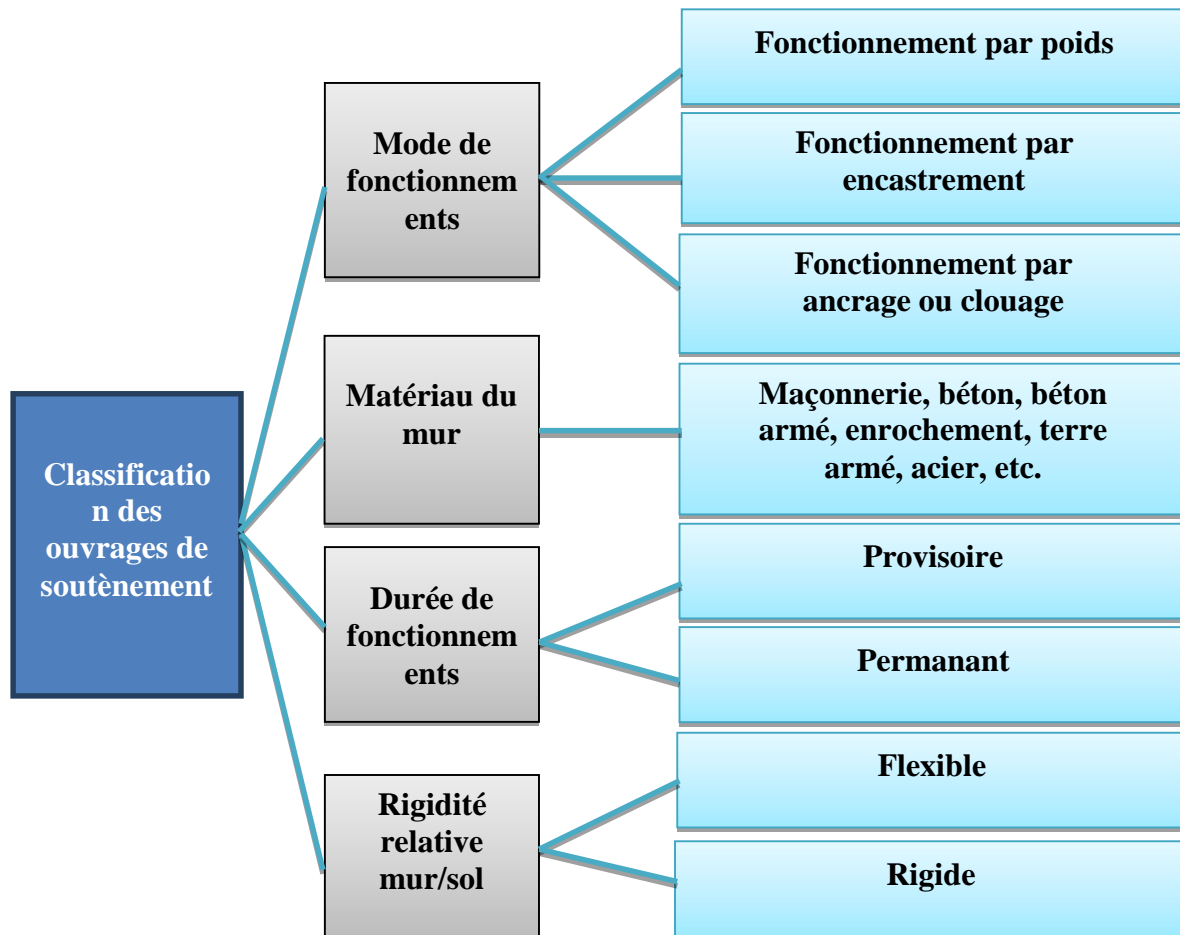


Figure 2.11 – Classification des ouvrages de soutènement. (Fahsi M.,2013)

L'intersection de ces classifications se divise en deux grandes familles :

5.3.1 – Ouvrage à structure apparente

- Murs poids en maçonnerie de pierres sèches.
- Murs poids en maçonnerie jointoyée.
- Murs poids en béton.
- Murs poids en gabions.
- Murs poids en éléments préfabriqués en béton empilés.
- Murs en béton armé encastres sur semelle.

5.3.2 – Ouvrage à structure enterré

- Rideaux de palplanches métalliques.
- Parois moulées ou préfabriquées.
- Parois composites.
- Terre armée.
- Murs en remblai renforcé par des éléments géosynthétiques.
- Voiles ou poutres ancrés.
- Ouvrages divers.

6 – TECHNIQUES DE SURVEILLANCE

L'objectif principal du système de surveillance est de fournir des informations sur l'évolution du phénomène de façon à pouvoir prendre les mesures nécessaires : on redoute soit l'accélération plus ou moins brutale du phénomène (la rupture), pouvant mettre en danger des vies humaines, soit le dépassement du seuil de déformation admissible sur un ouvrage.

Les dispositions incluses dans une surveillance comprennent donc essentiellement un contrôle (visuel ou par des instruments de mesure) de l'évolution, auquel succèdent un dépouillement et une interprétation qui amènent éventuellement à prendre des dispositions de sécurité. (Aissa M. H.,2011)

7 – CONCLUSION

Les moyens mis en œuvre actuellement pour améliorer la stabilité des pentes reposent sur plusieurs techniques. Le choix à adopter sur terrain doit satisfaire plusieurs critères, à savoir : la maîtrise des techniques employées, l'existence localement des moyens de confortement et le critère économique. L'ingénieur doit trouver la solution optimale pour satisfaire en même temps les exigences techniques et les contraintes économiques.

Dans le chapitre suivant, on va aborder quelques cas de pathologies existantes sur le tronçon ouest de l'autoroute Est-Ouest. Ceci en montrant différentes pathologies et les solutions adoptées sur chantier.