

TABLE DES MATIERES

Introduction générale.....	1
Chapitre 1. - Cadre géographique et géologique.....	2
1.1 - Cadre géographique.....	2
1.1.1. – Localisation.....	2
1.1.2. – Climat	2
1.2. - Cadre géologique	6
1.2.1. – Cadre lithostratigraphique.....	6
1.2.1.1. – L’ensemble sédimentaire	6
1.2.1.2. - L’ensemble volcanique.....	7
1.2.1.3 – La cuirasse latéritique	8
1.2.2 – Cadre structural.....	9
1.2.3. –Hydrogéologie	11
Conclusion.....	12
Chapitre 2. – Généralités sur la stabilité des pentes	13
2.1. - Les pentes naturelles : classification et description des mouvements.....	13
2.1.1. - Différents mouvements de terrains.....	13
2.1.2. - Les glissements.....	15
2.2. - Différentes méthodes de calcul analytique.....	17
2.2.1. - Notion de coefficient de sécurité.....	17
2.2.2 Quelques méthodes de calcul analytique	19
Conclusion.....	24
Chapitre 3. - Généralités sur la modélisation	25
Introduction	25
3.1. - Notions de contrainte et de déformation	25
3.1.1. - Notion de contrainte	25
3.1.2. - Notion de déformation.....	26
3.2. - Lois de comportements mécaniques des matériaux	27
3.2.1. - Loi de Hooke	27
3.2.2. - Comportement élastique, élastoplastique et plastique.....	28
3.3. - Modélisation par la méthode des éléments finis	30
Introduction	30
3.3.2. – La démarche de la méthode des éléments finis (MEF).....	30
3.3.3 - Calcul par la MEF	31
3.3.4. - Présentation de GEO- SLOPE.....	32
Chapitre 4. – Résultats et discussion	34

4.1. – Résultats de terrain	34
4.1.1. – plage de Rebeuss.....	34
4.1.2. – Pointe des Madeleines	35
4.1.3. – Pointe Diop	37
4.2. – Résultats de la modélisation avec GEO- SLOPE	40
4.2.1. – Plage de Rebeuss	40
4.2.2. – Falaise de la pointe des Madeleines.....	42
4.2.3. – Pointe Diop	43
Conclusion.....	45
Conclusion générale et recommandations	46
Références bibliographiques	47

LISTE DES FIGURES

Fig. 1. – Localisation de la zone d'étude.....	2
Fig. 2. - Carte géologique de Dakar (Elouard, 1980 modifiée par Mbengue 2009).....	3
Fig. 3. - Variation mensuelle de la pluviométrie à la station de Dakar-Yoff (1977-2008).....	4
Fig. 4. - Variation de la pluviométrie annuelle à la station de Dakar-Yoff (1977-2008)	4
Fig. 5. - Variation de la température moyenne mensuelle à la station de Dakar-Yoff (1970-2004)	5
Fig. 6. - Variation de l'humidité relative moyenne mensuelle et l'évaporation Piche moyenne mensuelle à la station de Dakar-Yoff (1977-2007).....	5
Fig. 7. - Log stratigraphique synthétique des formations de la presqu'île de Dakar (Elouard, 1980 modifié par Sarr, 1995).....	8
Fig. 8. – Interprétation photogéologique de la tectonique de la Presqu'île du Cap- Vert (d'après ESSO exploration in Dia 1980, modifiée par Mbengue 2009).....	9
Fig. 9. - Coupe géologique de la Pointe de l'Abattoir au Cap Manuel «Corniche-Ouest» (Mpassi, 2004).....	10
Fig. 10. - Glissement plan	15
Fig. 11. - Glissement rotationnel	15
Fig. 12. - Différents types de rupture circulaire	16
Fig. 13. - Glissements successifs emboîtés	16
Fig. 14. - Découpage en tranches d'un talus	19
Fig. 15. - Forces agissant sur une tranche n	20
Fig.16. - Force sur une surface élémentaire	25
Fig. 17. - Déformation infinitésimale du milieu.....	26
Fig. 18. - Action de la force normale sur les faces opposées du parallélépipède	27
Fig. 19. - Comportement élastique linéaire	28
Fig. 20. - Comportement plastique parfait.....	29
Fig. 21. - Comportement élastoplastique.....	29
Fig. 22. –Types de comportements d'un matériau	30
Fig. 23. - Courbe intrinsèque du modèle de Mohr-Coulomb	33
Fig. 14. – Coupe géologique de la plage de Rebeuss (Formation de la Prison)	35
Fig. 25. - Coupe géologique de la falaise de la Pointe des Madeleines.....	37
Fig. 36. - Coupe géologique de la Pointe de Diop.....	39
Fig. 27. – Plage de Rebeuss : avant modélisation	40
Fig. 28. – Plage de Rebeuss : avec entrants et sortants	40
Fig. 29. – Plage de Rebeuss : Rupture de talus	41
Fig. 30. – Plage de Rebeuss : rupture de pied de pente	41

Fig. 31. – Plage de Rebeuss : rupture circulaire profonde.....	41.
Fig. 32. – Pointe des Madeleines : avant modélisation	42
Fig. 33. – Pointe des Madeleines : entrants et sortants.....	42
Fig. 34. – Pointe des Madeleines : rupture de talus.....	43
Fig. 35. – Pointe des Madeleines : rupture profonde.....	43
Fig. 36. – Pointe Diop : avant modélisation	44
Fig. 37. – Pointe Diop : entrants et sortants	44
Fig. 38. – Pointe Diop : rupture de talus.....	44
Fig. 39. – Pointe Diop : rupture de pied de pente.....	45

LISTE DES PHOTOS ET TABLEAUX

Photo 1. – Plage de la Rebeuss.....	34
Photo 2. – Falaise de la Pointe des Madeleines.....	36
Photo 3. – Détails de la Falaise de la Pointe des Madeleines.....	36
Photo 4. – Pointe Diop	38
Photos 5 et 6. – Failles observées au niveau de la Pointe Diop.....	38
Tableau. 1. - Epaisseurs de la nappe au droit de quelques forages.....	12
Tableau. 2. - Facteur de sécurité en fonction de l'importance de l'ouvrage	19
Tableau 3. - Caractéristiques utilisées pour le modèle de Mohr-Coulomb	39
Tableau 4. - Facteurs de sécurités calculés par Geo- slope	45

RESUME

La zone d'étude correspond au sud est de la presqu'île de Dakar.

Sur le plan géologique, on distingue essentiellement dans la zone, des formations datant du Tertiaire et affleurant le long de la côte.

La tectonique est marquée par l'existence de nombreuses failles.

Du point de vue hydrogéologique les marnes de l'Eocène qui affleurent dans la zone sont décrits comme étant le mur de l'aquifère des sables infrabasaltiques.

L'étude de la stabilité de la zone est réalisée à partir de trois (3) coupes géologiques, dont une à la Plage de Rebeuss, une au niveau de la falaise de la Pointe des Madeleines et une au niveau de la Pointe Diop. Ces coupes sont modélisées grâce au code de calcul par éléments finis GEO- SLOPE[®].

La modélisation est faite à partir de l'hypothèse suivante nous avons considéré qu'il n'y a pas de nappe.

Le modèle de Mohr-Coulomb est utilisé pour simuler le comportement des sols et le modèle Rocher pour le comportement de la cuirasse latéritique au niveau de la Pointe Diop.

Les résultats obtenus montrent que, les talus naturels ont des facteurs de sécurité relativement élevé. Les déformations sont représentées par des cercles de rupture.

Tous ces résultats nous ont permis de conclure que la corniche-ouest est stable.

Mots clés : stabilité, corniche-ouest, Mohr-Coulomb.

INTRODUCTION GENERALE

La stabilité de Dakar en général et celle de ses corniches particulier est un problème récurrent qui à fait l'objet de plusieurs études antérieures notamment par Tessier (1950, 1952 et 1953) Gladima (1988) Fall (1993), Diop (2000)...

Le secteur étudié est localisé dans la partie sud de la presqu'île de Dakar. Dans ce secteur nous avons, affleurant le long de la côte, des formations du Tertiaire.

De par leur position géographique, les corniches ont vu leur occupation s'accroître très rapidement. Cette intense occupation du littoral due notamment aux activités hôtelières et l'importance stratégique de cette corniche a suscité de notre part une interrogation sur la stabilité des talus.

L'objectif de cette étude est de déterminer l'état actuel de la stabilité de la Corniche Ouest à partir de calculs basés sur les caractéristiques géotechniques des terrains. Ces calculs sont effectués avec le logiciel Geo-slope

Ce mémoire s'articulera autour comme suit :

- D'abord dans le premier chapitre nous présenterons la zone d'étude (climat, géologie),
- Ensuite le second chapitre développera les généralités sur la stabilité des pentes ;
- Puis un troisième chapitre, dans lequel nous exposerons les généralités sur la modélisation surtout celle de la méthode des éléments finis et le code de calcul Geo-slope[®] ;
- Et enfin dans le quatrième chapitre seront présentés nos résultats et discussions.

CHAPITRE 1 : CADRE GEOGRAPHIQUE ET GEOLOGIQUE

1. 1. - Cadre géographique

1. 1. 1. - Localisation

La zone faisant l'objet de cette étude se situe dans la partie occidentale de la tête de la presqu'île de Dakar en bordure de l'océan atlantique (Figure 1). Elle est localisée entre les latitudes 14°15' et 14°40' Nord et les longitudes 17°25' et 17°30' Ouest. Elle s'étend de la pointe de Reubeuss à la Pointe Diop (Figure 2).

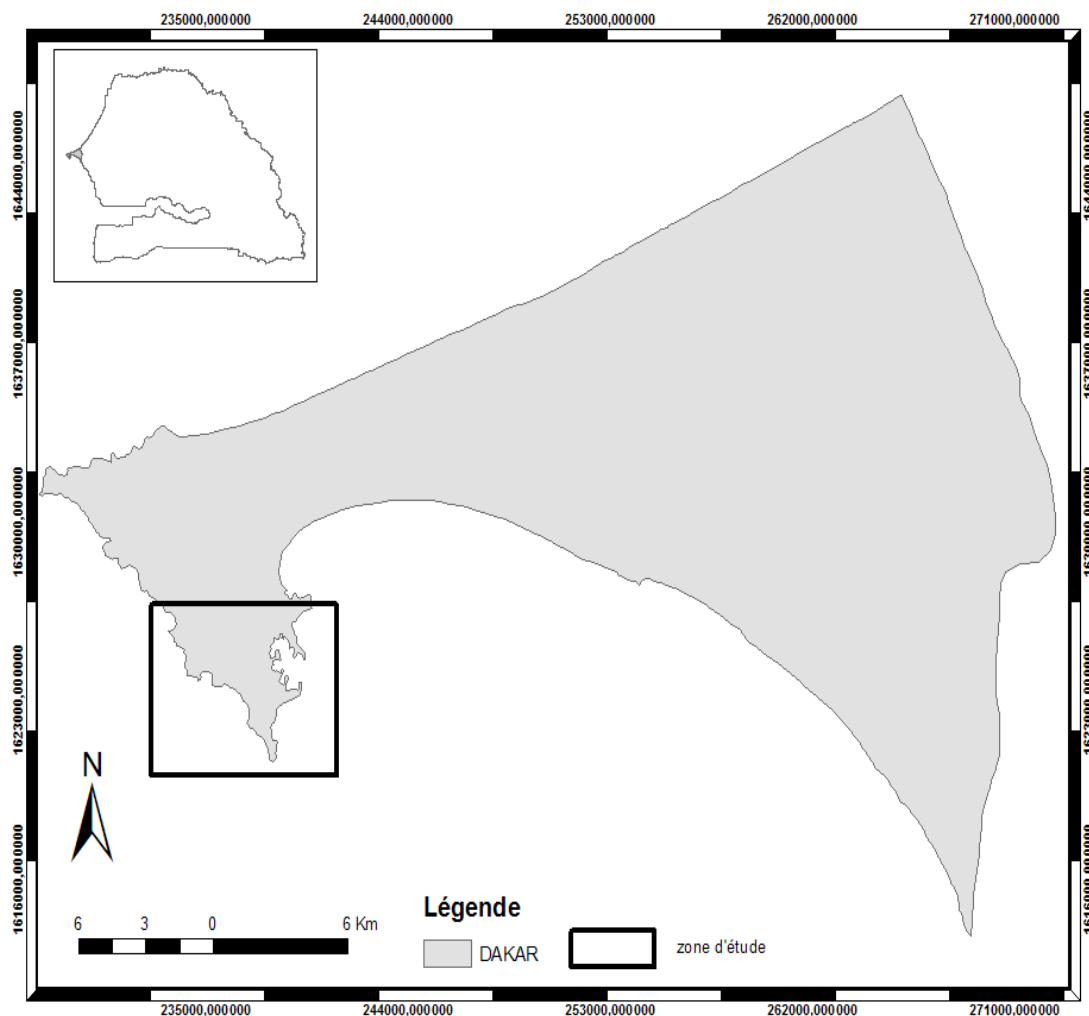


Fig. 1. – Localisation de la zone d'étude

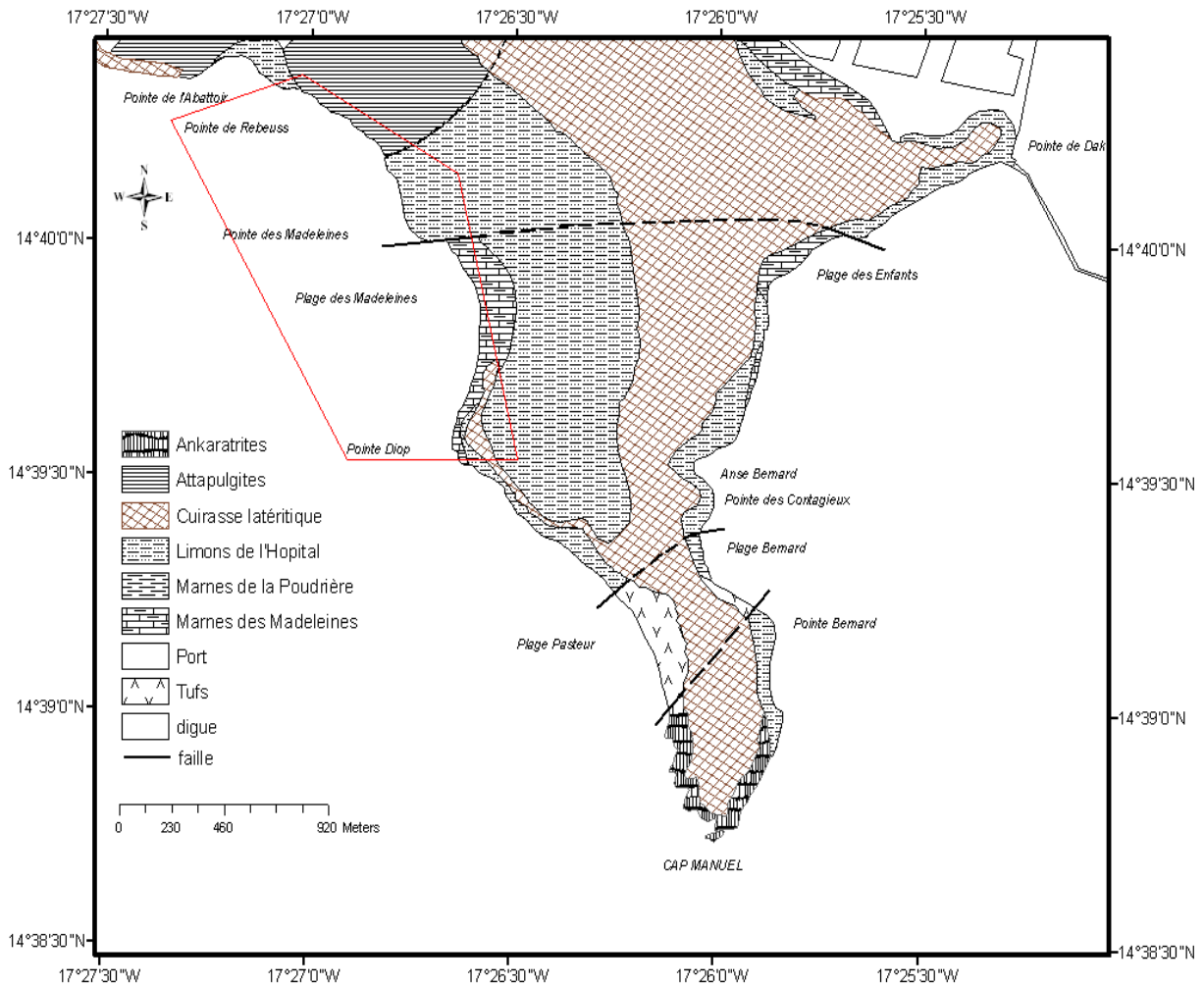


Fig. 2. - Carte géologique de Dakar (Elouard, 1980)

1. 1. 2. - Climat

Au Sénégal, il est de type soudano- sahélien marquée par l'alternance d'une saison des pluies avec une saison sèche. Ces dernières varient en fonction des localités. Du fait de sa position avancée dans l'océan atlantique, la région de Dakar, subit l'influence des alizés maritimes de novembre à juin et celle de la mousson de juillet à octobre. Le climat de Dakar est donc de type côtier (Leroux, 1983).

Les données climatiques ont été recueillies à la Direction de la Météorologie Nationale et concernent la station de Dakar-Yoff. Les paramètres retenus sont : la pluviométrie (variation mensuelle et annuelle), la température, l'humidité relative et l'évaporation Piche (variation de la moyenne mensuelle).

➤ La pluie

L'analyse des précipitations moyennes mensuelles de 1977 à 2008 (Figure 3) montre que l'essentiel des pluies se concentre sur trois mois (juillet, août et septembre) avec un maximum au mois d'août de 158 mm.

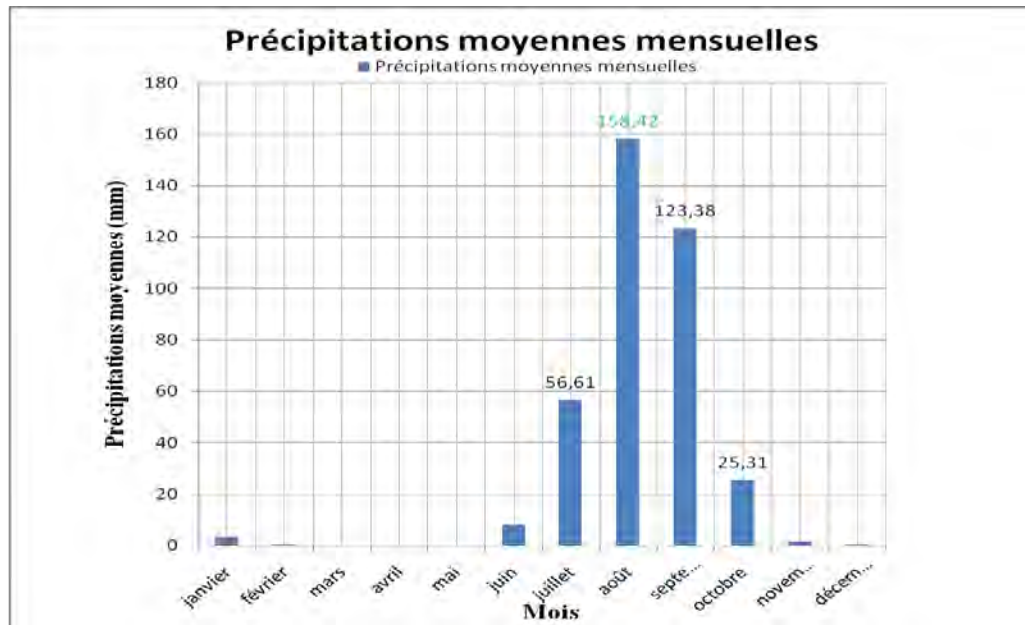


Fig. 3. - Variation mensuelle de la pluviométrie à la station de Dakar-Yoff (1977-2008)

Pour la station de Dakar Yoff, la moyenne annuelle des précipitations est d'environ 365 mm (Figure 4) avec des années déficitaires et des années excédentaires. Les hauteurs extrêmes sont 154,9 mm (1983) et 663,2 mm (2005).

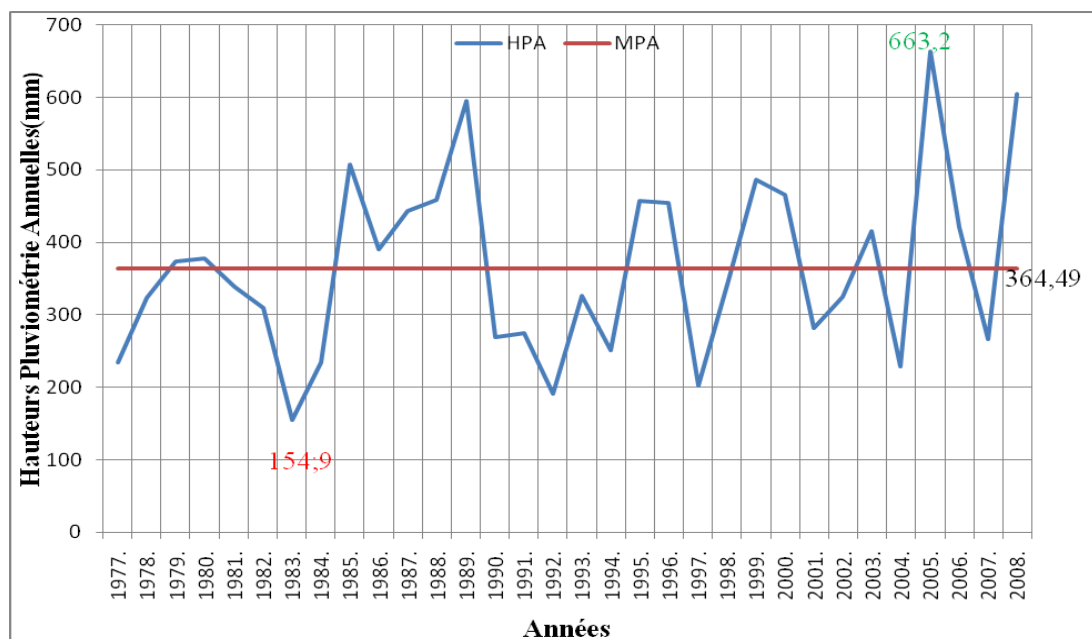


Fig. 4. - Variation de la pluviométrie annuelle à la station de Dakar-Yoff (1977-2008)

HPA = Hauteur Précipitations Annuelles et
MPA=Moyenne Précipitations Annuelles

➤ **la température**

Les températures moyennes mensuelles (Figure 5) sont généralement comprises entre 20°C et 30°C. On distingue une période chaude (de juin à octobre), une période moins chaude (de décembre à mars).

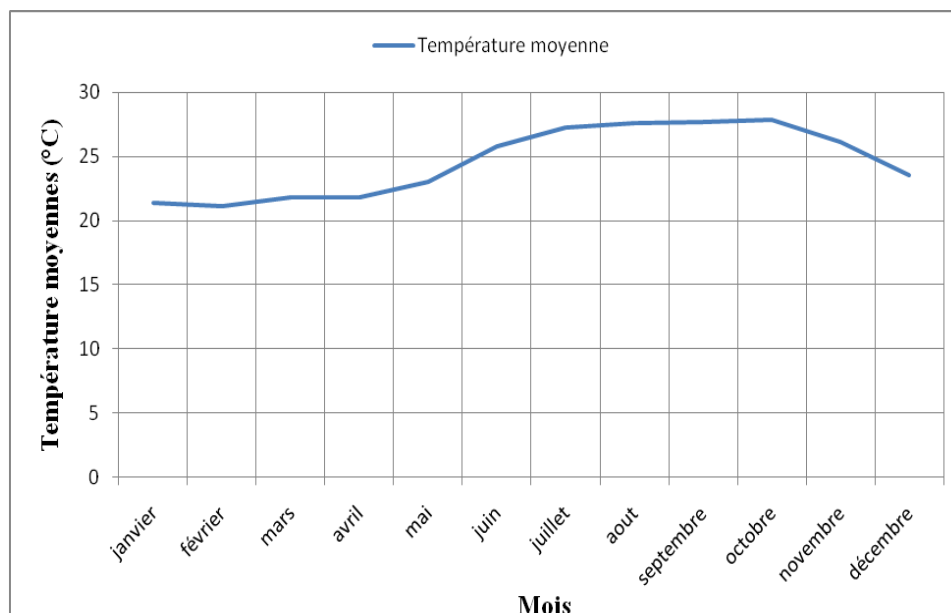


Fig. 5. - Variation de la température moyenne mensuelle à la station de Dakar-Yoff (1970-2004)

➤ **Humidité relative et Evaporation Piche**

L'évaporation moyenne mensuelle atteint son maximum en décembre et son minimum pendant l'hivernage (au mois de septembre). L'humidité relative quant à elle évolue en sens inverse (Figure 6) C'est pendant la saison des pluies que l'humidité relative est maximale à Dakar (80% environ)

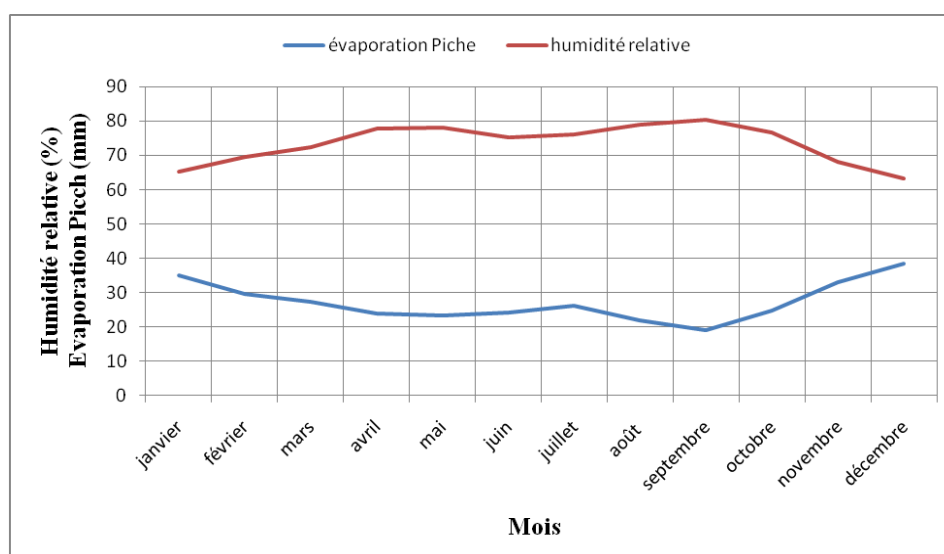


Fig. 6. - Variation de l'humidité relative moyenne mensuelle et l'évaporation Piche moyenne mensuelle à la station de Dakar-Yoff (1977-2007)

➤ **La végétation**

La végétation varie du point de vue tailles et espèces provoquant en certains endroits la fissuration de massifs cohérents. Cette fissuration entraînant un déséquilibre hydrique. Elle est souvent dominée par des espèces halophytes résistantes aux embruns marins.

➤ **Influence de l'océan**

Du point de vue océanographique les marées mais surtout les houles jouent un rôle très important dans l'évolution du littoral. En effet, selon Sall (1982), Nardari(1993) et Niang Diop (1995), la presqu'île du Cap Vert reçoit trois types de houles définies selon leur direction

- ✓ Les houles NW dominant (98% des observations) avec une énergie moyenne de 18kW/m,
- ✓ Les houles SW présentent de juillet à octobre dans la partie sud de la presqu'île avec une énergie moyenne de 11 kW/m ;
- ✓ Les houles exceptionnelles d'W présentent d'octobre à décembre avec une énergie moyenne de 22,7kW/m.

Les effets de la houle sont cependant atténués par une série de diffraction et de réflexion qui se produit à la hauteur Almadies, du Cap Manuel et l'île de Gorée.

1. 2. - Cadre géologique

La géologie du Cap-Vert s'inscrit dans un cadre plus général du bassin post-paléozoïque sénégal-mauritanien. Ce bassin correspond à un bassin côtier de type marge passive, avec un faible pendage vers l'Ouest, affectée par des failles sub méridiennes délimitant des horsts et des grabens.

1. 2. 1. - Cadre lithostratigraphique

La stratigraphie locale est connue grâce aux affleurements, aux prospections pétrolières et aux forages hydrauliques. Le socle anté-mésozoïque se situerait à la verticale de Dakar à une profondeur de 8000 m. Des dépôts marins continus allant du Lias à l'Oligocène sont connus. Au Miocène et au Quaternaire, se produisent différentes manifestations volcaniques, des altérations latéritiques à l'origine de cuirasses et des dépôts de sable éoliens et littoraux. D'après les travaux de Tessier (1950), Castalain et Monciardini (1965), nous pouvons distinguer dans notre zone d'étude deux ensembles distincts :

- Un ensemble sédimentaire comprenant la formation des Madeleines, la formation de l'hôpital et la formation de Prison,
- Un ensemble volcanique constitué par l'ankaratrite du Cap Manuel, les tufs joignant la plage Pasteur à la plage Bernard et un réseau dense de filons disséminés à travers et au delà même du secteur d'étude ;
- Le tout est surmonté d'une cuirasse latéritique.

1. 2. 1. 1. - L'ensemble sédimentaire :

✓ La formation des Madeleines

Elle est datée du Paléocène et est représentée surtout par des marnes et calcaires argileux. Celle-ci affleure dans l'Anse des Madeleines, à la plage des Enfants et autour du Port Autonome de Dakar. D'après Elouard (1965). Cette formation est caractérisée par des marnes grises litées contenant du gypse et de petites intercalations de lits calcaires jaunes ou gris parfois des intercalations d'argiles. Ces marnes ont été traversées sur 81m et sur 105 m et

reposent en discordance sur le Maastrichtien. La formation des Madeleines date de la totalité du Paléocène (Castelain et *al*, 1965).

✓ **La formation de l'Hôpital**

Connus également sous le nom de limons de l'Hôpital du fait de leur granulométrie, ces argiles silteuses sont caractérisées par une forte teneur en silice de l'ordre de 60 à 80% Chatelet et K'Vadec, (1975). Bogrand et Elouard (1968) et Sarr (1995) considèrent ces limons comme d'anciennes marnes à fractions argileuses kaoliniques de la formation des Madeleines localement dolomitisées puis silicifiées. Autrefois attribuée à l'Yprésien la formation de l'Hôpital est maintenant datée du Paléocène supérieur (Sarr, 1995). Cette formation affleure largement au Sud de Dakar et forme des falaises jaunes orangées. L'épaisseur maximale est de 35m.

✓ **La formation de la Prison**

Les attapulgités de la Prison sont de couleur grise et affleurent principalement à la plage de Reubeuss et forment un talus entre la route de la corniche et la mer dans toute la zone de la prison et du stade (Elouard, 1980). Il s'agit d'une formation argileuse feuilletée. Elles sont, de ce fait, plus ou moins plastiques et peuvent même présenter des lits consolidés, mais discontinus et de faible épaisseur. Dans les forages au Nord de Dakar, la formation de la Prison est surmontée par des argiles et marnes de la base de l'Eocène inférieur. L'épaisseur totale de l'Yprésien est de 105m (Castelain et *al*, 1965).

1. 2. 1. 2. - L'ensemble volcanique

L'ensemble volcanique de notre zone d'étude correspond aux roches issues du volcanisme tertiaire de la presqu'île du Cap Vert. Il s'agit : des filons de pyroxénolite, des tufs; de l'ankaratrite.

✓ **Les filons de pyroxénolites :**

Ils s'observent à la partie basale de la pointe des madeleines et au Sud de la pointe Diop. Ils sont d'âge Oligocène et correspondent à un épanchement volcanique qui s'est effectué sous l'eau et qui est caractérisé par des formations en strates de laves alternant avec des horizons sédimentaires marneux ou calcaires (Elouard, 1965). La roche de couleur noire verdâtre est très dure à l'affleurement. Ces filons de pyroxénolite lités forment des intrusions dans la formation des Madeleines selon une direction générale NE-SW. Au niveau de la pointe Diop, ce réseau filonien est affecté par un système de fractures ouvertes d'orientation globale NE-SW et NW-SE.

✓ **Les tufs :**

Ils se situent dans la partie occidentale de l'isthme du Cap-Manuel. Cette formation résulte de l'accumulation de produits pyroclastiques accumulés au nord Cap-Manuel (Elouard, 1965) L'observation de ces tufs montre qu'ils renferment des blocs de calcaires jaunâtres à Lépidocyclines. Ils constituent une roche très friable, peu cohérente, et très propice aux phénomènes d'éboulement de ravinement (Fall, 1993).

Du point de vue âge, ils sont attribués au Miocène. Cette formation est très intensément ravinée et selon une direction relativement constante NE-SW à E-W. Ceci fait que ces tufs volcaniques sont très sensibles aux actions des eaux de ruissellement et des vagues.

✓ **L'ankaratrite :**

A l'échelle de notre zone d'étude, son extension est très réduite puisqu'il ne constitue que l'extrême pointe du Cap- Manuel. Il s'agit d'une roche magmatique effusive de couleur

bleu noire à aspect de basalte caractérisé par son débit prismatique presque parfait résultant d'un refroidissement brutal du magma au contact de l'air. Morphologiquement ces ankaratrites constituent le point culminant de notre zone d'étude avec des prismes subverticaux.

Par ailleurs l'ankaratrite présente une fracturation très intense qui, à bien des endroits se confond avec la prismation.

1. 2. 1. 3. - La cuirasse latéritique:

Elle forme la partie supérieure du plateau de Dakar et le niveau stratigraphique le plus récent (Plio- quaternaire). A l'échelle de la Presqu'île du Cap- Vert trois niveaux de cuirasse surmontent les ensembles sédimentaire et volcanique.

La succession de ces formations dans la presqu'île de Dakar est résumée par log synthétique (Figure 7) proposé par Elouard (1980).

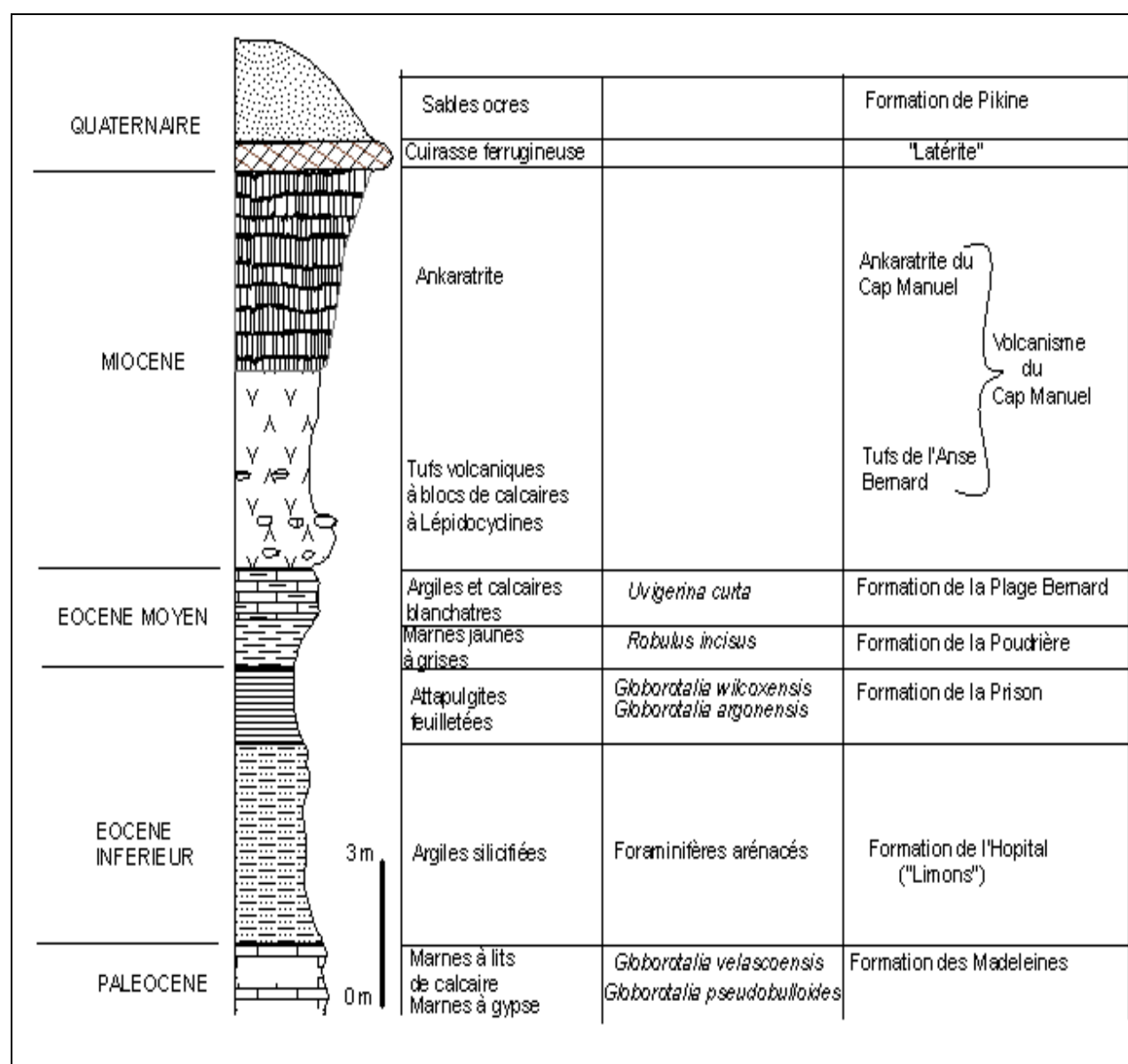


Fig. 7. - Log stratigraphique synthétique des formations de la presqu'île de Dakar (Elouard, 1980 modifié par Sarr, 1995)

1. 2. 2. - Cadre structural

Du point de vue tectonique, Liger (1980) montre la presqu'île du Cap-Vert correspond au passage de la croûte continentale à la croûte océanique avec un amincissement brutal de la marge continentale vers l'Ouest. Cet amincissement provoque un soulèvement dont la conséquence est la fracturation liée à la poussée pré atlantique, c'est ainsi que la mission américaine ESSO (1969) distingue trois unités directionnelles (Figure 8) :

- l'unité directionnelle méridienne localisée essentiellement dans la région de l'actuel horst de Ndiass. La principale direction est N-S, mais parfois légèrement déviée vers le NNE ou affectée par des rejeux orthogonaux,
- l'unité directionnelle de Sébikhotane ou la distribution des différentes fractures est représentée par la direction générale NE, mais s'étend cependant du NNE à l'ENE ;
- l'unité directionnelle transverse concernant essentiellement les failles orientées NW et parfois WNW.

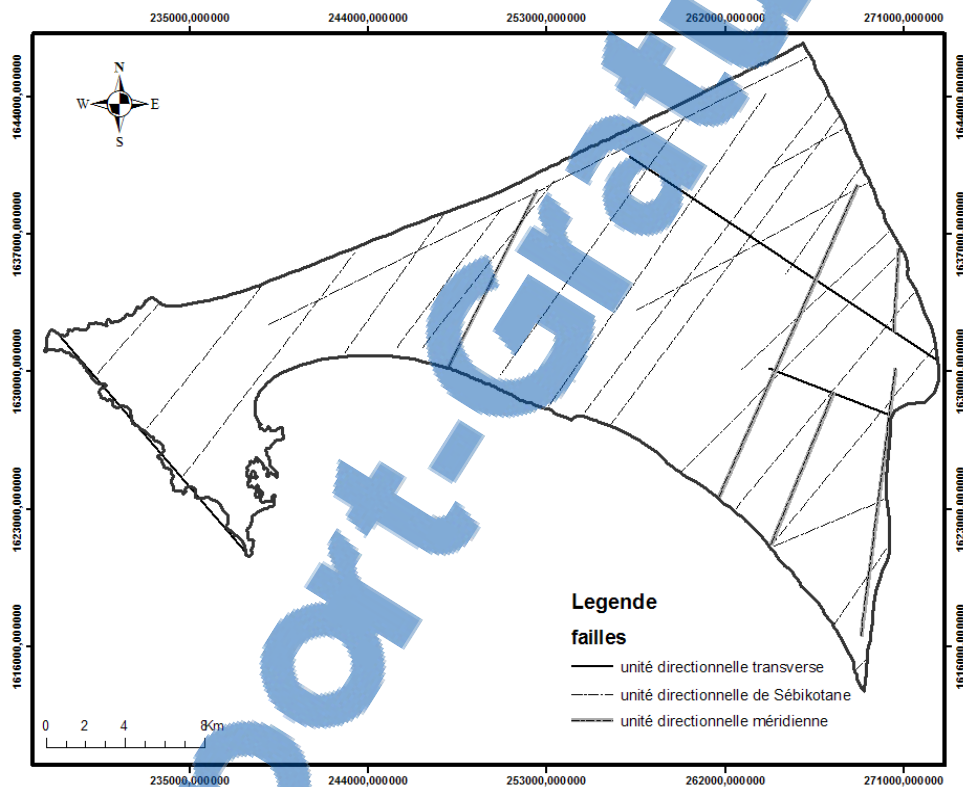


Fig 8. – Interprétation photogéologique de la tectonique de la Presqu'île du Cap- Vert (d'après ESSO exploration in Dia 1980)

Ces résultats sont parfaitement corroborés par une étude plus récente basée sur l'interprétation d'images Landsat et de photographies aériennes à différentes échelles (Lompo, 1987).

Dans la partie Sud de la presqu'île de Dakar, Mpassi (2004) a réalisé des coupes géologiques sur les deux corniches et a dénombré un certain nombre de failles normales.

Au niveau de la Corniche-Ouest (Figure 9), elles sont observées au niveau des pointes Diop, des Madeleines, et de l'Abattoir. Ces failles affectent les limons et suivent des directions comprises entre N65 à N70E et N118 à N175E avec des pendages assez raides et des rejets verticaux de faibles dimensions.

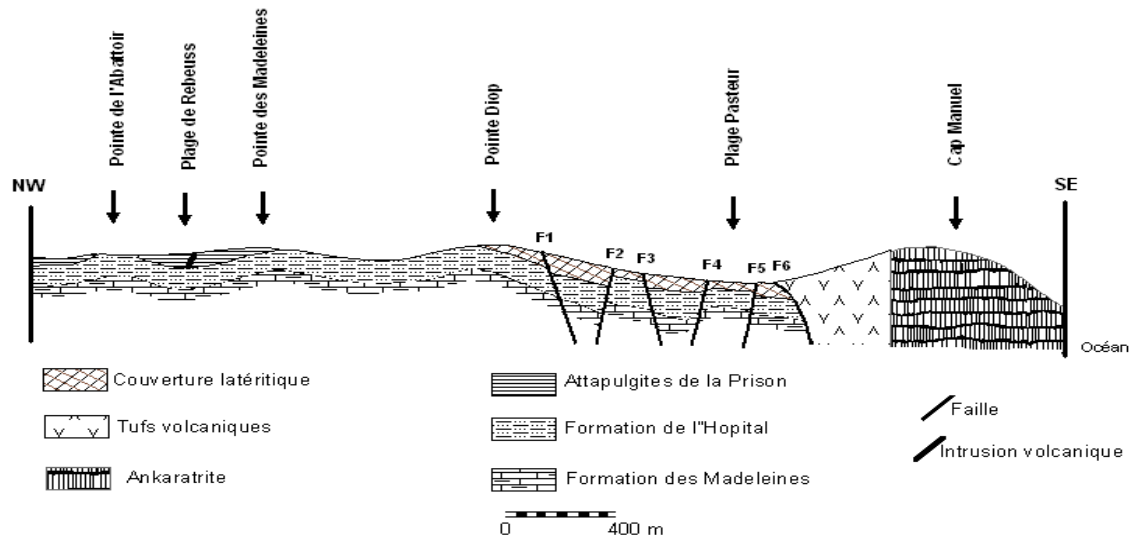


Fig. 9. - Coupe géologique de la Pointe de l'Abattoir au Cap Manuel «Corniche-Ouest» (Mpassi, 2004)

Cependant la distribution spatiale et temporelle des différentes familles d'accidents montre que la région est marquée par deux grandes périodes d'activités s'étendant du Secondaire au Tertiaire.

Au Secondaire on note une importante activité tectonique sans doute associée à l'ouverture de l'Atlantique centrale. Nous pourrions relever entre autre deux épisodes majeures :

- ✓ le premier qui se manifeste après le rifting du Trias au Jurassique inférieur, est marqué par une famille d'accidents profonds de direction E-W correspondant à d'anciennes grandes fractures de la Pangée propagées sous forme de failles transformantes dans la croûte océanique ;
- ✓ le second est marqué par une famille d'accidents profonds de direction N-S. Il s'agirait d'accidents fortement redressés à l'affleurement et qui s'incurvent probablement un peu en profondeur. Certains d'entre eux peuvent être des failles listriques sans doute superposées à des fractures de socle dont les réactivations leur ont donné naissance (Bellion, 1987). Ces failles affectent les séries sédimentaires subhorizontales du bassin en délimitant des horsts (Dakar et Ndiass) et un graben (Rufisque) ébauchés à la fin du Crétacé ou du paléocène (Elouard, 1980). Par ailleurs, et de façon ponctuelle, on observe dans le horst de Ndiass quelques failles inverses dans le Crétacé supérieur, ainsi que de rares décrochements.

Au Tertiaire, les anciens accidents sont réactivés et la région est en grande partie exondée. Deux épisodes tectoniques principaux sont distingués :

- ✓ le premier, majeur dans tout le bassin, entre la fin du Lutétien et la fin de l'Eocène, conduit à une émergence généralisée et détermine une structure en blocs faillés ;
- ✓ le second, généralement associé au Néogène est très caractéristique de la presqu'île du Cap-Vert et correspondrait à une double extension des directions d'allongement NE-SW attestées par des failles normales à composante décrochant (Lompo, 1987).

En définitive l'instabilité du bassin sénégalais vers la limite Eocène moyen-Eocène supérieur ne fait donc pas de doute. Mais s'il existe des traces de déformations d'origine compressive, ces dernières sont toutefois peu importantes (Diop, 2000).

1. 2. 3. - Hydrogéologie

Le système hydrogéologique de la tête de la presqu'île de Dakar est constitué par des sables marins quaternaires recouverts par les coulées du volcanisme des Mamelles. Cet aquifère, dit infrabasaltique, s'étend sous l'ensemble de la tête de la presqu'île, hormis sous le plateau de Dakar. Les formations argilo-marneuses de l'Eocène inférieur rencontrées correspondent au mur de la nappe (O.M.S, 1972).

➤ Géométrie de l'aquifère

L'analyse des données sur la morphologie du toit et du mur permet de déterminer en différents points l'épaisseur de l'aquifère des sables infrabasaltique. La nappe infrabasaltique est en contact avec l'océan sur ses trois flancs ouest, nord et sud-ouest.

➤ Le mur de l'aquifère

Il est formé de marnes et d'argiles de l'Eocène moyen et inférieur. Le sommet de la couche forme un plan incliné vers le Nord en passant de la côte de -20 m au pied du plateau de Dakar à -75 m vers la zone de Yoff- Cambérène.

➤ Le toit de l'aquifère

Le toit de la nappe est formé par des coulées volcaniques issues de l'ancien volcan des Mamelles, ils recouvrent la presque totalité de la presqu'île. Cette couverture basaltique présente une allure irrégulière avec une puissance qui varie de quelques mètres à plusieurs dizaines de mètres (O.M.S, 1972).

La limite orientale de la nappe infrabasaltique correspond schématiquement à une ligne nord-ouest passant par la Patte d'oie. Au delà de cette limite, la nappe devient libre et se confond avec celle du système dunaire de Thiaroye.

➤ l'épaisseur de l'aquifère

La formation présente d'importantes variations d'épaisseurs en fonction de la morphologie du toit et du mur. Le tableau 1 ci-dessous présente quelques valeurs de l'épaisseur de cette nappe. Au nord, se dessinent deux zones de fortes épaisseurs «Terme Nord » 65 m et « Front de Terre » - « Cambérène » 72 m à 75 m séparés par une zone d'épaisseur moindre correspondant au puissant recouvrement volcanique du Fort A.

A l'approche du plateau de Dakar vers le Sud, l'aquifère disparaît par le phénomène de biseautage entre la couverture volcanique et le mur argilo- marneux.

Forages	Epaisseurs (m)
Terme Sud	65
Fort A Ter	15
Terme Nord	48
Point M	45
Point N Ter	45
Camp pénal	50
Front de Terre	75

Tableau 1: Epaisseurs de la nappe au droit de quelques forages

Conclusion

La zone étudiée se localise dans la partie sud- ouest de Dakar. Le climat est de type côtier.

Du point de vue de la géologie, on distingue deux grands ensembles lithologiques surmontés par une cuirasse latéritique (un ensemble sédimentaire et un ensemble volcanique).

Sur le plan tectonique, la zone est affectée par plusieurs failles qui sont à l'origine de l'affleurement ou non de certaines formations au niveau de certaines zones. Ces failles jouent un rôle déterminant dans la stabilité des talus.

Du point de vue hydrogéologique c'est la nappe des sables infrabasaltique qui est présente dans la tête de la presqu'île de Dakar.

CHAPITRE 2 : GENERALITES SUR LA STABILITE DES PENTES

2. 1. - Les pentes naturelles : classification et description des mouvements.

Les pentes aussi bien naturelles qu'artificielles sont souvent sujettes à des mouvements dont les plus connus sont les glissements de terrains qui sont généralement spectaculaires et parfois dangereux. De ce point de vue, l'étude de la stabilité est une nécessité et il est important de déterminer, pour la sécurité des personnes, les risques de rupture qui sont très délicates, particulièrement pour les pentes naturelles. Notre étude sera axée sur les pentes naturelles au niveau desquelles nous essayerons de déterminer les différents mécanismes qui conduisent à leur rupture.

2. 1. 1. - Différents mouvements de terrains.

Un mouvement de terrain est un déplacement plus ou moins brutal du sol ou du sous-sol ; il est fonction de la nature et de la disposition des couches géologiques. Il s'inscrit normalement dans le cadre des processus généraux d'érosion mais peut être favorisé (agent d'érosion, pesanteur, séisme, etc.), voire provoqué, par certaines activités anthropiques (exploitation de matériaux ou de nappes aquifères, déboisement, terrassement, etc.).

Dans notre secteur d'étude la plupart des mouvements de terrains étant des ruptures par glissement ; nous présenterons les glissements après avoir présenté les autres mouvements de terrains.

Les déplacements peuvent être lents (quelques millimètres par an) ou très rapides (quelques centaines de mètres en quelques secondes). D'après leurs vitesses nous allons distinguer des mouvements lents et des mouvements rapides.

➤ Les mouvements lents

Ils touchent principalement les biens. Ils entraînent une déformation progressive des terrains, pas toujours perceptible par l'homme, les constructions se fissurent. Ces désordres peuvent se révéler graves pour la sécurité des occupants.

Ces mouvements regroupent les tassements, le retrait-gonflement, les affaissements, la solifluxion, le fluage, le fauchage et les glissements.

- **les tassements** : Certains sols compressibles peuvent se tasser sous l'effet de surcharges (constructions, remblais) ou en cas d'assèchement (drainage, pompage).
- **le retrait-gonflement** : Les variations de la quantité d'eau dans certains terrains argileux produisent des gonflements (période humide) et des tassements (périodes sèches) qui peuvent avoir des conséquences importantes sur les bâtiments n'ayant pas pris en compte cet aléa dans leur conception.
- **les affaissements** : sont liés à la présence de cavités souterraines d'origine naturelle (phénomène de dissolution) ou anthropique (exploitation souterraine, sape de guerre). L'évolution est amortie par le comportement souple des terrains superficiels.
- **La solifluxion** La solifluxion caractérise essentiellement les pentes constituées de sols argileux gonflants et rétractables. Elle est due au fait que les terrains soient gorgés d'eau, autrement dit à une variation volumétrique des sols au cours des saisons. Lorsque ces phénomènes affectent les pentes, les mouvements alternés conduisent à une reptation du sol vers l'aval. Ce type de

mouvement se manifeste par une ondulation des sols et par une inclinaison des arbres.

- **Le fluage** est un mouvement lent et irrégulier de matériaux plastiques (argiles) sur faible pente qui résulte d'une déformation gravitaire continue d'une masse de terrain non limitée par une surface de rupture clairement identifiée, mais par une zone de transition avec le massif. Les phénomènes de fluages correspondent à des mouvements dus à des sollicitations atteignant le domaine plastique donc proches de la rupture. L'état ultime peut être soit une stabilisation soit une rupture.
- **Le fauchage** est une déformation superficielle, sous l'influence de la gravité, des couches de roches qui affleurent sur une pente.
- **Le glissement** est un déplacement lent d'une masse de terrain cohérente le long d'une surface de rupture.

➤ **Les mouvements rapides**

Ils touchent majoritairement les personnes avec des conséquences souvent dramatiques. Ces mouvements ont des incidences sur les infrastructures (bâtiments, voies de communication...), allant de la dégradation à la ruine totale.

Ils peuvent être subdivisés en deux groupes :

- ✓ **Le premier groupe** (propagation en masse) regroupe : les effondrements, les chutes de pierres ou de blocs, les éboulements ou écroulements.
 - **Les effondrements** résultent des ruptures brutales des appuis ou des toits de cavités souterraines naturelles ou artificielles, sans atténuation par les terrains de surface.
 - **Les éboulements, écroulements et chute de pierres** : L'évolution des falaises et des versants rocheux engendre des chutes de pierres, de blocs ou des écroulements en masse ; la masse rocheuse se propage dans l'air, au dessus de la surface topographique, avec contacts épisodiques avec le sol (puis arrêt sur le sol). A l'échelle de notre secteur d'étude, ces mouvements de masses affectent les blocs de latérites surtout au niveau de la pointe Diop.

Ils sont traités par la mécanique des roches car concernant des masses rocheuses.
- ✓ **Le second groupe** (propagation en état remanié) comprend les laves torrentielles et les coulées boueuses.
 - **Les laves torrentielles** résultent du transport de matériaux en coulées visqueuses ou fluides dans le lit de torrents de montagne.
 - **Les coulées boueuses** Les coulées boueuses sont dues à une infiltration d'eau qui provoque des mouvements de sols dans lesquels les matières glissées se comportent comme un liquide. Elles se produisent essentiellement en montagne. Les coulées boueuses se produisent sur des pentes, par dégénérescence de certains glissements avec afflux d'eau.

2. 1. 2. - Glissements

Ils sont précédés de signes précurseurs et s'effectuent dans le temps avec des vitesses très variables. Ils se rencontrent le plus souvent dans les pentes naturelles et les ruptures sont souvent liées à des problèmes d'écoulement d'eau. Les ruptures peuvent être causées soit par une modification des conditions hydrauliques (vidange rapide d'un réservoir, apparition d'un écoulement) soit par une modification des caractéristiques géotechniques. Les profondeurs des surfaces de glissement sont très variables; de quelques mètres à plusieurs dizaines de mètres, voire la centaine de mètres pour certains glissements de versant, ce qui les rend difficilement détectables dans ce dernier cas. Les glissements affectent généralement les sols et on peut distinguer :

➤ **Les glissements plans (Figure 10) :**

La ligne de rupture suit une couche mince ayant de mauvaises caractéristiques mécaniques et sur laquelle s'exerce souvent l'action de l'eau, une telle couche est appelée « couche savon ».

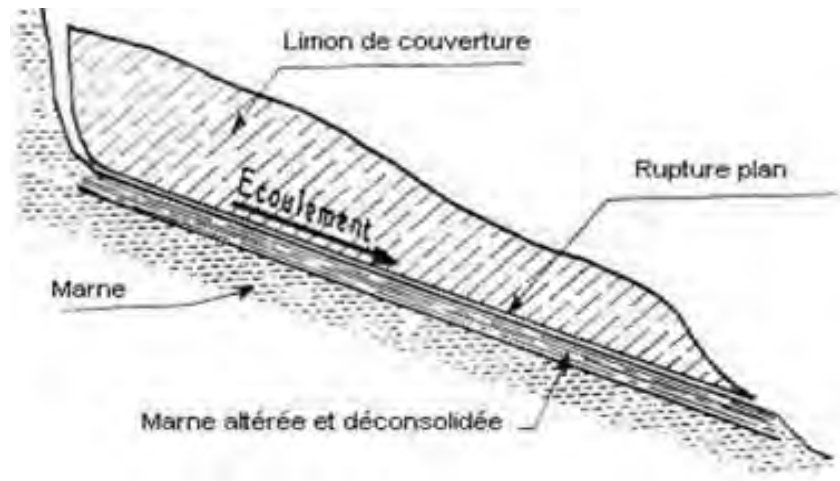


Fig. 10. - Glissement plan

➤ **Les glissements rotationnels simples (Figure 11) :**

Ils constituent les plus fréquents des glissements et leur surface de rupture a une forme simple et peut être assimilée à une portion de cylindre.

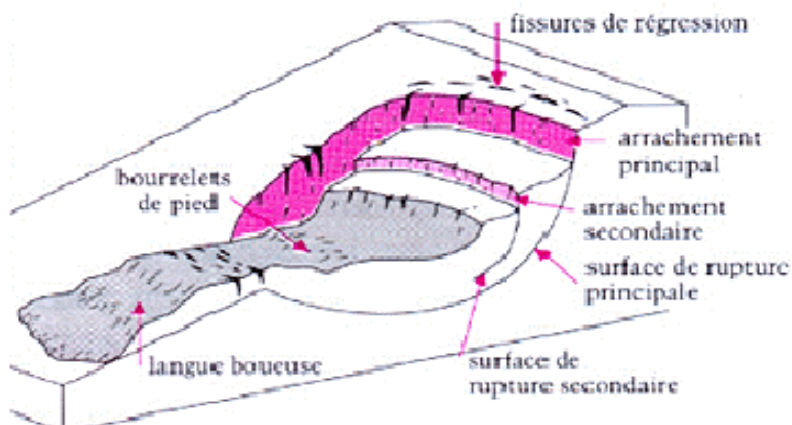


Fig. 11. - Glissement rotationnel

La figure 11 représente un glissement rotationnel simple qui est caractérisé comme suit:

- En tête, des fissures en traction,
- Un escarpement correspondant à l'amont de la surface de glissement ;
- À la base, un bourrelet formé par des matériaux glissés ou déplacés.

L'évolution de certains glissements sous l'action de l'eau peut donner naissance à des coulées boueuses qui correspondent à une mise en mouvement rapide d'une masse de matériaux remaniés à forte teneur en eau et de consistance plus ou moins visqueuse. En représentant en coupe la partie centrale du glissement, l'intersection de cette coupe avec la surface de rupture est appelée ligne de rupture. Si la ligne de rupture a une forme circulaire on parle de glissement circulaire et dans ce cas on distingue les cercles de pieds, les cercles profonds et les cercles de talus (Figure 12). Par contre si la rupture s'effectue suivant une ligne complexe, on parle de glissement non circulaire.

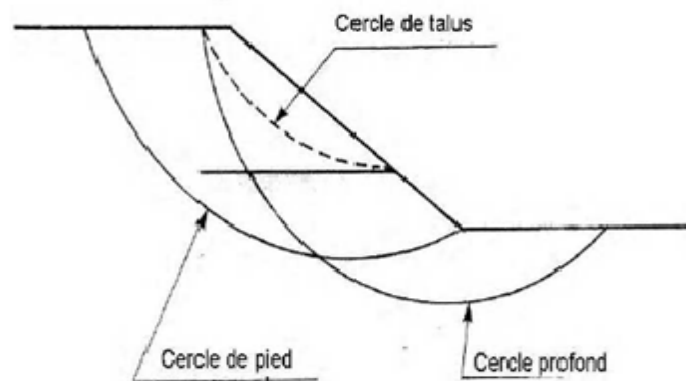


Fig. 12. - Différents types de rupture circulaire

- Les cercles de talus qui se produisent généralement dans les sols hétérogènes, la base du cercle correspond à une couche plus résistante,
- Les cercles de pied sont plus courants dans les remblais ;
- Les cercles profonds qui ne se produisent que dans le cas où le sol situé sous le niveau du talus est de mauvaise qualité.

➤ **Les glissements rotationnels complexes (Figure 13):**

Il s'agit de glissements multiples « emboîtés » les uns dans les autres. L'apparition du premier glissement, en bas de la pente, conduit à une perte de butée pour les terres situées au dessus, et ainsi provoque des glissements successifs remontant vers l'amont

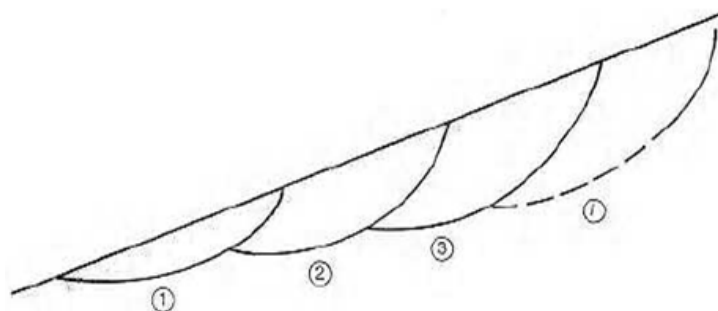


Fig. 13. - Glissements successifs emboîtés

➤ La rupture par glissement

Les glissements de terrain se manifestent généralement par des fissures en crête de talus perpendiculaires à la direction générale du mouvement. Sur un profil, on observe une dépression vers le haut et un bombement vers le pied.

Les fissures de traction, quand elles ne sont pas cicatrisées, renseignent en plus sur l'actualité de l'instabilité par contre, il est difficile de tirer des dépressions et des bombements des informations du point de vue temporel.

La rupture par glissement d'un talus se manifeste habituellement par un déplacement en bloc d'une partie du massif. La surface de glissement est assimilable à une surface cylindrique. On fera donc l'étude pour des tranches de massif d'épaisseur unité, découpées perpendiculairement à l'axe de la surface de rupture. Si on représente la coupe transversale du terrain (donc une tranche), l'aspect de la surface de rupture sera donc un arc de cercle. Le sommet du talus s'affaisse et il se forme un bourrelet de pied.

La stabilité des talus dépend :

des moments résistants (pris par rapport au centre du cercle de rupture), dus à la résistance au cisaillement le long de la ligne de rupture et ;

des moments moteurs dus principalement au poids du massif en déplacement.

Il y'aura donc glissement si à un moment donné les moments moteurs sont supérieurs aux moments résistants.

➤ Cause des glissements

D'après ce qui précède, les glissements sont dus à des modifications soit dans les moments résistants, soit dans les moments moteurs. On distinguera donc deux types de causes :

Diminution des moments résistants : Les causes de diminution des moments résistants peuvent être naturelles (changement des conditions hydrauliques du terrain) ou consécutives à des travaux (tranchées en pied de pente, ou chargement rapide augmentant les pressions interstitielles en pied de pente.).

Une augmentation des moments moteurs : Certaines causes sont évidentes (surcharge du sommet de la pente, changement de pente,...), d'autres le sont beaucoup moins. Les problèmes d'infiltration, en particulier, sont souvent difficiles à cerner. Par exemple, les écoulements ont une action hydrodynamique qui tend à augmenter les moments moteurs. C'est le cas des drainages en pied de talus servant au rabattement de la nappe. En effet, l'écoulement provoque des forces de percolation qui augmentent les moments moteurs; il ne faut donc plus simplement considérer l'aspect statique du problème de stabilité de pente.

L'évaluation de la stabilité d'un talus se fait au moyen d'un facteur de sécurité préalablement fixé.

2. 2. - Différentes méthodes de calcul analytique

2. 2. 1. - Notion de coefficient de sécurité

Il est donné par la relation suivante :

$$FS = \frac{\tau_{max}}{\tau}$$

FS est le facteur de sécurité ou coefficient de sécurité

τ_{max} est la contrainte de cisaillement qui s'exerce le long de la surface de rupture.

τ est la résistance au cisaillement mobilisée.

Il y aura glissement si FS est supérieur à 1 c'est-à-dire τ_{max} est supérieure à τ .

On distingue deux cas pour le calcul du facteur de sécurité :

Dans le premier cas, le glissement a déjà eu lieu, il s'agit d'une valeur de FS inférieure ou égale à 1, donc :

- ✓ soit, on connaît la surface exacte et on cherche à déterminer, pour FS=1, les caractéristiques correspondantes ;
- ✓ soit, on a les caractéristiques et on cherche à déterminer la surface de glissement.

Dans le second cas, le plus fréquent, il faut déterminer la marge de sécurité disponible et adopter les solutions adéquates pour améliorer la sécurité de l'ouvrage en répondant à des exigences en fonction de l'emploi des talus.

D'une manière générale, les différentes méthodes de calcul de la stabilité des pentes aboutissent à la détermination d'un coefficient de sécurité Fs qui est défini comme étant le rapport entre les moments résistants et les moments moteurs.

$$F_s = \frac{\sum \text{Moments Résistants}}{\sum \text{Moments Moteurs}}$$

Pour déterminer le coefficient de sécurité réel d'un talus, il faut rechercher le cercle donnant la valeur minimale de Fs puisque c'est le long de cette surface de glissement que la rupture risque de se produire. En fonction de la valeur de Fs, trois situations sont à considérer :

- Si ce coefficient est inférieur à l'unité, la rupture est inévitable,
- S'il est égal à l'unité, on est en équilibre limite ;
- Si le coefficient est supérieur à l'unité, le milieu est en équilibre. Il est estimé stable dans des conditions satisfaisantes, si le coefficient atteint un chiffre, que l'on se fixe à l'avance, compte tenu de la nature de l'ouvrage et des conditions que pourraient entraîner sa rupture.

L'expérience a montré, sauf erreur grossière sur les hypothèses de calcul, que les talus restent stables si $F_s > 1,5$ et le glissement est pratiquement inévitable s'il est inférieur à 1.

Entre ces deux valeurs, s'étend un domaine où il existe un risque de rupture, risque d'autant plus grand que Fs diminue. Le coefficient global de sécurité minimal requis est généralement de 1,4 à 1,5.

Mais pour pouvoir se rapprocher ainsi de 1, c'est-à-dire de la rupture, il faut être sûr de la validité des hypothèses et des paramètres adoptés, ce qui souvent est difficile en géotechnique.

Le tableau ci-dessous, nous donne les valeurs de FS en fonction de l'importance de l'ouvrage et des conditions particulières qui l'entourent.

FS	Etat de l'ouvrage
<1	danger
1.0-1.25	sécurité contestable
1.25-1.4	sécurité satisfaisante pour les ouvrages peu importants sécurité contestable pour les barrages, ou bien quand la rupture serait catastrophique
>1.4	satisfaisante pour les barrages et les digues.

Tableau. 2. - Facteur de sécurité en fonction de l'importance de l'ouvrage

La définition des seuils des facteurs de sécurité dépend de l'approche adoptée, des fréquences de sollicitations de l'ouvrage en question et du risque créé par la rupture.

En condition normale, Fellenius propose un seuil égal à 1.25, alors que $FS = 1.5$ pour Bishop (l'approche de Fellenius est plus conservatoire que celui de Bishop).

2. 2. 2. – Quelques méthodes de calcul analytique

➤ La méthode des tranches de Fellenius (Figure 14) :

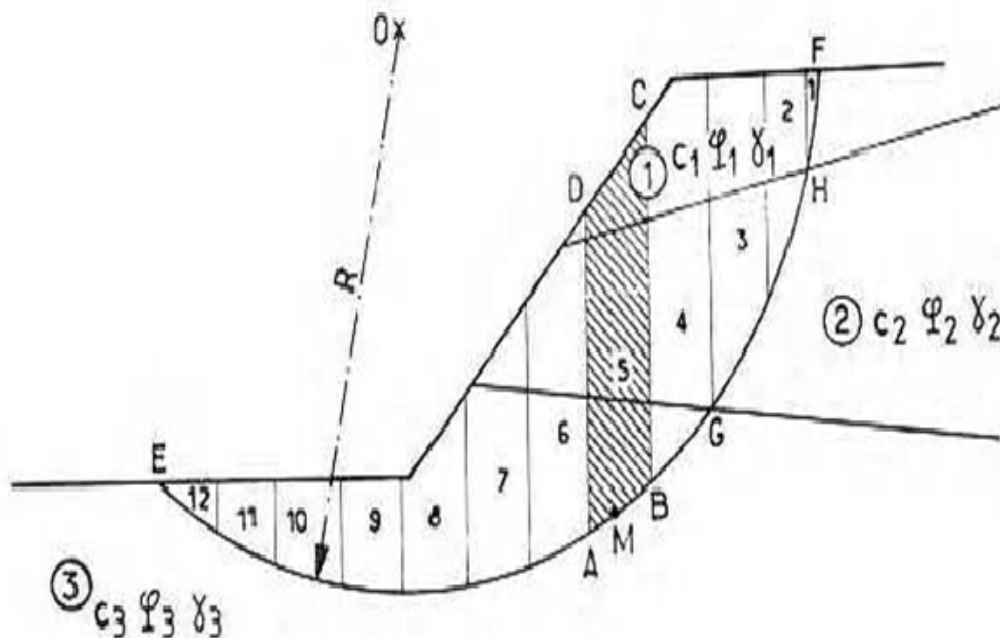


Fig. 14. - Découpage en tranches d'un talus

Considérons un talus recoupant un certain nombre de couches de sols de caractéristiques différentes c_i, ϕ_i, γ_i . La stabilité est étudiée en analysant l'équilibre d'une masse de sol d'épaisseur unité dans le sens perpendiculaire à la figure. Le principe de la méthode est remarquablement simple. On se donne un cercle de centre O et de rayon R pour lequel on vérifie la sécurité vis à vis du glissement. La tranche circulaire (Arc EMF) est découpée en un certain nombre d'éléments verticaux de sorte que l'intersection du cercle de glissement et d'une limite de couche (point G et H sur la figure correspond à une limite entre deux couches).

On se propose par la suite d'examiner si le milieu est en équilibre le long de ce cercle et de définir le coefficient de sécurité.

Soit la tranche « ABCD », les forces agissant sur elle sont:

- Son poids **W**,
- La réaction **R_n** du milieu sous jacent sur l'arc AB ;
- Les réactions sur les faces verticales BC et AD décomposées en réactions horizontales.

H_n et **H_{n+1}** et en réactions verticales **V_n** et **V_{n+1}** (forces internes au massif).

Ces forces se classent en deux catégories :

- Celles dont le moment par rapport au centre O du cercle peuvent provoquer le glissement (moments moteurs) : il s'agit du poids des terres et des surcharges éventuelles ;
- Celles dont les moments par rapport à O s'opposent globalement au glissement (moments résistants) ; c'est le cas des réactions R_n, H_n, H_{n+1}, V_n et V_{n+1}.

La somme des moments due aux forces internes est nulle puisque pour une tranche n-1 donnée, le moment des forces -V_n et -H_n s'oppose à celui de V_n et H_n et pour la tranche n+1 le moment des forces -V_{n+1} et -H_{n+1} s'oppose à celui de V_{n+1} et H_{n+1}.

Pour simplifier les calculs, Fellenius a émis l'hypothèse à savoir que la seule force qui agit sur l'arc AB est le poids des terres W (Figure 15) à l'exception des forces internes. Il n'y a donc que la réaction R_n pour résister aux forces motrices W et dans ce cas $W = -R_n$.

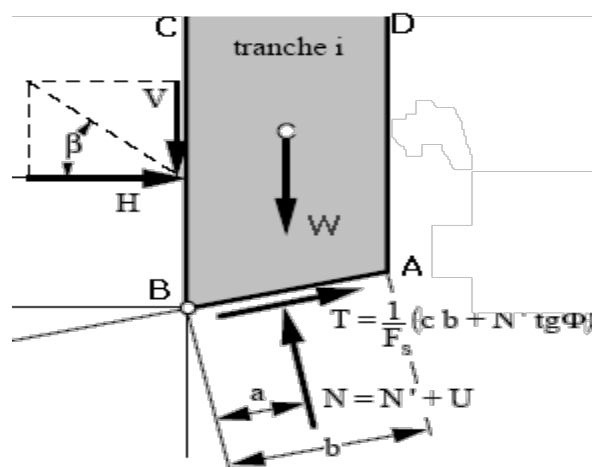


Fig. 15. - Forces agissant sur une tranche n

Le poids des terres W peut se décomposer en une force tangentielle T_n et une force normale N_n à AB .

Dans ces conditions, le moment résistant maximal est fourni par la valeur maximale que peut prendre la composante tangentielle de R_n et par application de la loi de Coulomb ou du critère de Mohr-Coulomb, la réaction R_n a pour composante tangentielle maximale :

$$(R_n) = C_i \times AB + N_n \times \tan \phi_i$$

Si la longueur des tranches n'est pas trop grande, l'arc AB peut être confondu avec la corde.

La composante normale de R_n passe par O et par conséquent son moment par rapport à ce point s'annule de même que celui de la composante normale au poids des terres N_n .

Si nous désignons par M_r , le moment résistant maximal dû à l'ensemble des réactions R_n , nous avons :

$$F_s = \frac{\sum_{n=1}^{n=m} R(C_i \times AB + N_n \times \tan \phi_i)}{\sum_{n=1}^{n=m} T_n}$$

Avec m le nombre total de tranches.

Pour qu'il y ait équilibre il faut que le moment résistant M_r correspondant à l'équilibre limite soit au moins égal à M_m .

Le rapport $F_s = \frac{M_r}{M_m}$ est, par définition le coefficient de sécurité le long du cercle de glissement. A l'équilibre limite, F_s est égal à l'unité.

$$F_s = \frac{\sum_{n=1}^{n=m} (C \times AB + \tan \phi \sum N_n)}{\sum_{n=1}^{n=m} T_n} \quad (1)$$

Si le sol est homogène, c'est à dire que les paramètres c et ϕ sont constants tout au

long de l'arc, la formule (1) devient : $F_s = \frac{C \times L + \tan \phi \sum N_n}{\sum T_n} \quad (2)$

Avec L la longueur développée de la surface de rupture.

La formule (1) qui est la plus générale peut s'écrire sous la forme :

$$\sum T_n = \sum N_n \frac{\tan \phi_i}{F_s} + \frac{C_i}{F_s} \times AB \quad (3)$$

Par conséquent, si l'on prend sur $\tan \phi_i$ et sur C_i le même coefficient de sécurité F_s , on obtiendra des caractéristiques fictives ϕ_i^* et C_i^* telles que :

$$\left\{ \tan \phi_i^* = \frac{1}{F_s} \times \tan \phi_i \right.$$

$$\left\{ C_i^* = \frac{1}{F_s} \times C_i \right.$$

Avec ces caractéristiques ϕ^* et C^* , le coefficient de sécurité défini comme étant le rapport du moment résistant au moment moteur sera égal à l'unité pour le cercle de glissement envisagé.

En considérant les paramètres donnés dans l'hypothèse de Fellenius, la formule (1) peut s'écrire sous la forme :

$$F_s = \frac{\sum_{n=1}^{n=m} \left(C_i \frac{b}{\cos \alpha} + W \cos \alpha \tan \phi_i \right)}{\sum_{n=1}^{n=m} W \sin \alpha}$$

Le calcul du coefficient de sécurité fait intervenir les paramètres géométriques que sont :

- ✓ **b**, la longueur 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 des terres **W**.

En 1954, la méthode de Fellenius est reprise et perfectionnée par Bishop qui proposa deux méthodes l'une dite méthode détaillée et l'autre méthode de Bishop simplifiée.

Dans ces méthodes de Bishop, la pression interstitielle (U_n) est prise en compte qu'elle soit statique ou influencée par des écoulements.

➤ Méthode de Bishop

✓ méthode de Bishop détaillée

Dans la méthode de Fellenius, on a fait l'hypothèse d'un déplacement en bloc d'une partie du massif de sol par rapport à l'autre. Ainsi les tranches verticales ne développent entre elles que des forces internes qu'il n'était pas nécessaire de prendre en considération dans le problème global. Les composantes V_n , V_{n+1} , H_n et H_{n+1} des réactions sur les tranches verticales interviennent dans les efforts appliqués sur AB (Figure) et influence la réaction R_n .

Le coefficient de sécurité est donné par la formule suivante :

$$F_s = \frac{1}{\sum_{n=1}^{n=m} W \sin \alpha} \sum_{n=1}^{n=m} \frac{[W + (V_n - V_{n+1}) - U_n b] \tan \varphi'_i + c'_i b}{\cos \alpha \sin \alpha \frac{\tan \varphi'_i}{F_s}} \quad (4)$$

Pour définir F_s , il faut:

- procéder par itérations successives puisque F_s figure dans les deux membres de l'équation ;
- définir $V_n - V_{n+1}$. Pour cela, une hypothèse supplémentaire est nécessaire, par exemple admettre que le long des plans verticaux les contraintes sont proportionnelles à la distance verticale de leur point d'application à la surface libre. Compte tenu des équations régissant l'équilibre général du massif de sol limité par le cercle de glissement, déterminer $V_n - V_{n+1}$ est alors possible.

✓ Méthode de Bishop simplifiée

C'est la méthode la plus utilisée des méthodes de calcul en rupture circulaire. Bien qu'elle présente un certain nombre d'imperfections son grand usage lui confère un statut de méthode de référence.

L'hypothèse supplémentaire est que le terme $V_n - V_{n+1}$ est pris égal à zéro. Ceci est dû au fait que Bishop a montré que ce terme était toujours négligeable et l'a assimilé à zéro conduisant à une erreur qui ne dépassait guère 1%.

L'équation précédente devient alors :

$$F_s = \frac{1}{\sum_{n=1}^{n=m} W \sin \alpha} \sum_{n=1}^{n=m} \frac{(W_n - U_n b) \tan \varphi_i + c_i b}{\cos \alpha + \sin \alpha \frac{\tan \varphi_i}{F_s}} \quad (5)$$

L'expression du coefficient de sécurité montre que le procédé est itératif puisque F_s apparaît dans les deux membres de l'équation.

Conclusion :

Ils existent plusieurs mouvements de terrains et leur classification est basée sur de nombreux critères.

L'évaluation de la stabilité d'un ouvrage se fait à partir d'un facteur de sécurité préalablement fixé.

Le calcul pratique de la stabilité des talus naturels est, en réalité, beaucoup plus délicat que la théorie ne peut laisser croire. En effet les caractéristiques mécaniques des sols sont le plus souvent mal connues ainsi que le réseau hydrodynamique de la nappe. A ceci, s'ajoute le fait que les moyens disponibles pour l'étude sont généralement insuffisants.

Pour les milieux hétérogènes, on applique généralement la méthode des tranches de Fellenius et il n'est pas nécessaire de rechercher une plus grande précision en calculant l'influence des forces qui se développent le long des faces verticales de chaque tranche.

La méthode de Bishop simplifiée est la plus couramment utilisée par contre la méthode de Bishop détaillée ne présente que peu d'intérêt puisque les écarts entre ces deux méthodes de Bishop sont négligeables.

CHAPITRE 3 : GENERALITES SUR LA MODELISATION

Introduction :

Au cours de ces dernières années, la modélisation est devenue une des composantes de la méthode scientifique, au même titre que ses deux composantes traditionnelles à savoir la théorie et l'expérience. C'est évidemment l'apparition des ordinateurs puissants qui est à l'origine de ce développement rapide de la simulation numérique.

Ce développement a permis de trouver une solution à de nombreux problèmes, autrefois long, voir irrésolubles, avec les moyens de calcul classiques. En effet il existe aujourd'hui des modèles numériques permettant d'étudier des problèmes aussi complexes que l'action des trafics routiers et ferroviaires, des glissements de terrains, des montées de niveau d'eau, etc.

La modélisation est quasiment devenue aujourd'hui un point de passage obligé pour qualifier les structures en configuration extrêmes.

Malheureusement dans nos pays en voie de développement, la modélisation est très peu utilisée en mécanique des sols, ce qui incite certaines entreprises et Bureaux d'études à faire appel à des structures étrangères spécialisées dans le domaine.

Souvent même s'ils sont utilisés, les logiciels de mécanique des sols ne sont pas exploités au maximum de leurs possibilités, ceci à cause de la méconnaissance de leur méthode de fonctionnement et des modèles qu'ils proposent, mais aussi de la difficulté d'interprétation des résultats.

Dans ce rapport, nous commencerons par faire un bref rappel sur les notions de contraintes déformations (tenseur des contraintes, tenseur des déformations) et sur les notions de comportement rhéologique (comportement élastique, élasto-plastique et plastique). Ensuite, nous évoquerons quelques modèles de comportement élastoplastique (Mohr-Coulomb, Drucker-Prager, Cam-Clay, Von Mises....) appliqués aux sols. Nous insisterons sur le modèle de Mohr-Coulomb de qui constitue la base théorique permettant une meilleure interprétation des résultats expérimentaux. Nous parlerons enfin de la modélisation par la méthode des éléments finis qui est l'une des méthodes de simulation numérique les plus utilisées, avant de proposer un exemple de Modélisation avec le logiciel GEO- SLOPE[®], ceci après avoir présenté le dit logiciel.

3. 1. - Notions de contraintes et de déformations.

3. 1. 1. - Notion de contrainte

Soit M un point entouré par une surface élémentaire ds (Figure 16) et $d\vec{F}$ une force élémentaire agissant sur cette surface ds ($d\vec{F}$ est portée par la normale extérieure \vec{n} à la surface ds).

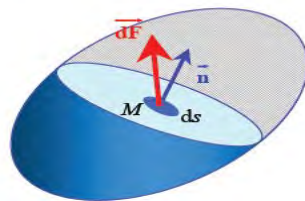


Fig.16. - Force sur une surface élémentaire

On appelle T la contrainte au point M définie par la limite du rapport $\frac{d\bar{F}}{ds}$ lorsque ds tend vers zéro

$$\vec{T} = \lim_{ds \rightarrow 0} \frac{d\bar{F}}{ds}$$

La contrainte T peut être décomposée en une contrainte normale σ perpendiculaire à la surface et en une contrainte tangentielle ou de cisaillement τ dans le plan de cette surface.

3. 1 2. - Notion de déformation

Les déformations sont engendrées par des sollicitations extérieures mécaniques, par des évolutions chimiques et des réorganisations structurales, etc.

Elles posent un problème de compatibilité c'est-à-dire qu'il reste à savoir si elles sont compatibles avec la continuité du milieu. Les déformations imposées, non compatibles, induisent des efforts intérieurs qui, s'ils sont excessifs, peuvent entraîner des désordres, voire même des ruptures.

Après la description des contraintes, nous allons introduire ici le tenseur des déformations, noté e , plus ou moins complexe en chaque point du matériau.

On considère, afin d'étudier le comportement du milieu à l'occasion de la variation du système de charge qu'il supporte et de décrire la déformation, un petit élément de volume entourant un point M (Figure 17). On sait qu'une déformation infinitésimale de ce petit volume est le produit d'une translation, d'une rotation et d'une déformation pure (distorsion).

Soit deux points M et M' appartenant au volume V .

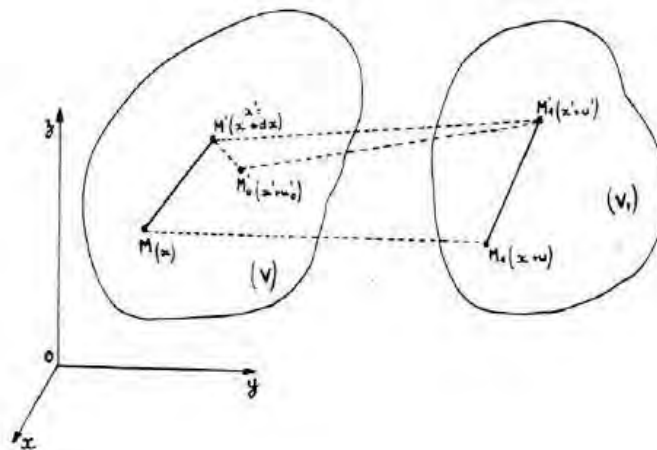


Fig. 17. - Déformation infinitésimale du milieu

Dans la déformation qui transforme le volume V en un volume V_1 , ces points viennent en M_1 et M_1' .

On peut donc décomposer le déplacement de M' en une déformation pure qui amène M' en M_0' suivie d'un déplacement $M_0'M_1'$ correspondant à la translation et à la rotation d'ensemble rapportées au point M .

Les déplacements élémentaires des particules du corps ayant subi la déformation sont en général exprimés à l'aide de leurs composantes : \mathbf{u} , \mathbf{v} et \mathbf{w} respectivement parallèles aux trois axes de coordonnées x , y et z .

L'étude des déformations et des contraintes est essentiel notamment dans la formulation de lois de comportements.

3. 2. Lois de comportements mécaniques des matériaux

3. 2. 1. - Loi de Hooke

La loi de Hooke va relier les deux tenseurs précédemment définis. Pour étudier ces relations, considérons un parallélépipède rectangle soumis à l'action d'une force normale σ_x uniformément répartie sur deux faces opposées (Figure 18).

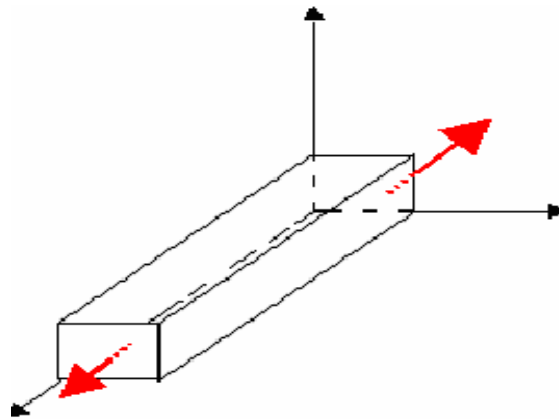


Fig. 18. - Action de la force normale sur les faces opposées du parallélépipède

L'expérience prouve que dans le cas où le corps est isotrope ces contraintes normales ne déterminent aucune distorsion des angles du solide élémentaire.

- Notons d'une part que l'allongement ε_x dans le sens des x est lié à la contrainte σ_x par la relation :

$$\varepsilon = \frac{1}{E} \times \sigma$$

Dans cette relation E est le module d'élasticité longitudinale ou module d'Young (c'est une constante) qui, pour un matériau homogène isotrope, lie la contrainte à la déformation. Il s'exprime en MPa dans le système international. Il caractérise la raideur du matériau. À contrainte égale, un matériau ayant un module d'élasticité élevé subira une déformation plus faible qu'un matériau ayant un module d'élasticité petit. Pour déterminer le module E d'un matériau isotrope, on réalise un essai en traction et on enregistre la courbe contrainte = f (déformations). La pente de la courbe dans sa partie linéaire correspond au module élasticité du matériau.

- D'autre part l'allongement de l'élément dans le sens des x s'accompagne d'une contraction latérale :

$$\varepsilon_y = \varepsilon_z = -\nu \varepsilon_x = -\frac{\nu}{E} \times \sigma_x$$

où ν est le coefficient de Poisson.

Si on considère par ailleurs que le matériau est soumis à l'action de contraintes normales σ_x , σ_y et σ_z uniformément réparties sur les facettes principales, l'expérience prouve qu'on peut appliquer la méthode de superposition.

Ceci se traduit par les équations donnant l'expression générale de la loi de Hooke pour un corps isotrope. Ces équations reliant la contrainte à la déformation sont :

$$\begin{aligned}\varepsilon_x &= 1/E [\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)] \\ \varepsilon_y &= 1/E [\sigma_y - \nu(\sigma_x + \sigma_z)] \\ \varepsilon_z &= 1/E [\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)]\end{aligned}$$

Ces différentes expressions montrent que la déformation d'un milieu élastique homogène et isotrope ne peut être déterminée, sur la base des contraintes, que si deux modules de déformations sont connus à savoir le module d'Young et le coefficient de poisson.

3. 2. 2. - Comportement élastique, élastoplastique et plastique

Les lois de comportement calées parfaitement sur des essais conduisent à des calculs très lourds et complexes. On utilise ainsi le plus souvent des lois simplifiées reliant contraintes et déformations et qui se prêtent mieux à l'établissement de codes de calcul fournissant ainsi une bonne image du comportement réel du sol.

Ainsi tous les matériaux peuvent être classés en trois types de corps :

- **Corps élastique ou solide de Hooke (Figure 19) :** c'est le modèle de comportement de matériau le plus simple. Il se caractérise par une relation linéaire (réversible et indépendante de l'histoire des sollicitations) entre la contrainte totale et la déformation (lois de Hooke). Le matériau retrouvera sa forme initiale après relâchement des contraintes externes, à condition toutefois que celles-ci soient inférieures à la limite élastique.

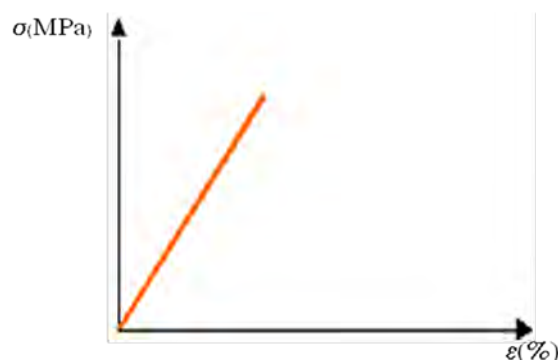


Fig. 19. - Comportement élastique linéaire

- **Corps plastique ou corps de Saint-Venant (Figure 20):** à partir d'un premier seuil appelé limite élastique, la déformation augmente à contrainte relativement constante. On note une déformation permanente du matériau.

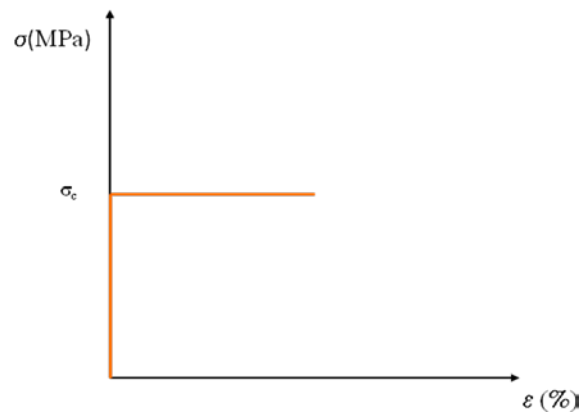


Fig. 20. - Comportement plastique parfait

- **Corps élastoplastique (Figure 21) :** en complément de la déformation élastique définie par la loi de Hooke, les modèles élastoplastiques intègrent un degré de déformation plastique permanent. Le matériau présente donc une élasticité linéaire jusqu'à un certain seuil (limite élastique) puis devient parfaitement plastique. La déformation totale se décompose alors en deux parties une élastique et une autre plastique

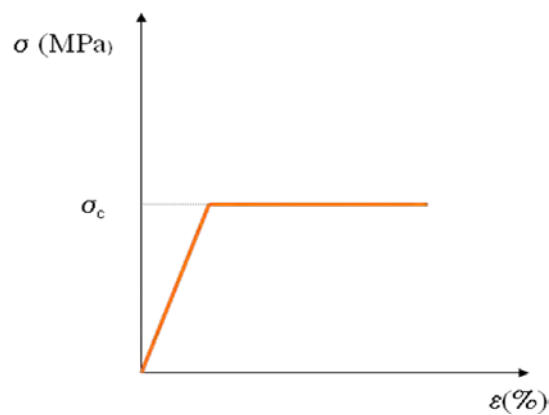


Fig. 21. - Comportement élastoplastique

On remarquera que les matériaux parfaitement plastiques et élastoplastiques continuent de se déformer même sans accroissement de contraintes.

En résumé la figure 22 donne une illustration pour les différents types de comportements d'un matériau. Entre les états A et B, le matériau est élastique; il deviendra ensuite plastique si l'on augmente la déformation jusqu'à C. Relâcher la contrainte en C fera revenir le matériau dans une nouvelle position d'équilibre D, selon une pente égale à celle de son comportement élastique.

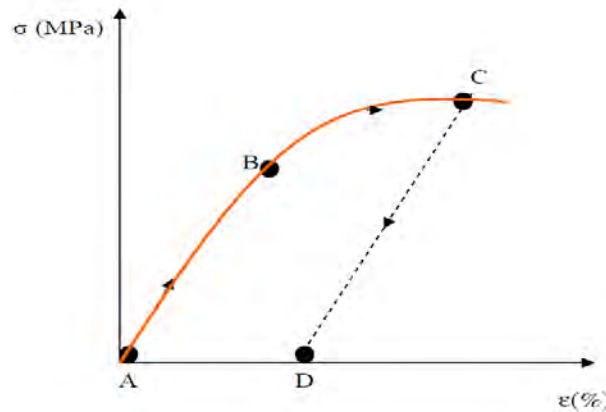


Fig. 22. - Types de comportements d'un matériau

La diversité des corps conduit à l'existence d'une diversité de lois de comportement. En ce qui nous concerne nous développerons certaines lois de comportement prises en compte par le logiciels Geoslope; lois qui nous ont permis de modéliser les pentes naturelles de nos affleurements tel que la loi de comportement Mohr-Coulomb

3. 3. - Modélisation par la méthode des éléments finis

Introduction

Dans son sens le plus général, le terme « modélisation » désigne la conception et l'établissement d'un modèle théorique. Elle consiste à formaliser mathématiquement un processus afin d'être en mesure d'utiliser les avantages de la programmation sur ordinateur.

La modélisation s'attache donc à établir un modèle qui est une représentation mathématique simplifiée destinée à mieux appréhender un phénomène complexe, son évolution et les relations et interactions qui le régissent.

La simulation numérique touche actuellement un large éventail de disciplines scientifiques et diverses méthodes ont été développées parmi lesquelles nous pouvons citer :

- La méthode des « éléments limites »,
- La méthode «des éléments finis» ;
- La méthode des «éléments discrets».

3. 3. 1. - La démarche de la méthode des éléments finis

La démarche de la méthode peut être exposée ainsi ; pour ce faire, on considère un domaine Ω . La méthode consiste à rechercher une solution approchée de la solution exacte sous forme de champ $F(M, t)$ défini par morceaux sur des sous domaine de Ω . Les n domaines Ω_i doivent être tels que :

$$\bigcup_{i=1}^n \Omega_i = \Omega \text{ et } \tilde{\Omega}_i \cap \tilde{\Omega}_j = \emptyset \quad \forall i \neq j$$

où Ω_i désigne l'intérieur de Ω_i . Autrement dit, les Ω_i sont une partition de Ω .

Le champ dans chaque sous domaine Ω_i est déterminé par un nombre fini de valeur du champ (ou de valeur de ses dérivées) en des points choisis arbitrairement dans le sous domaine, et appelés nœuds. Le champ local est une interpolation entre les valeurs aux nœuds.

Chercher une solution par éléments finis consiste donc à déterminer quel champ local on attribue à chaque sous domaine pour que le champ global $F(M, t)$ obtenu par juxtaposition de ces champs locaux soit proche de la solution du problème.

Le champ dans chaque sous domaine Ω_i est déterminé par un nombre fini de valeurs du champ (ou de valeurs de ses dérivées) en des points choisis arbitrairement dans le sous domaine et appelés nœuds. Le champ local est une interpolation entre les valeurs aux nœuds. Le sous domaine muni de son interpolation est appelé élément.

Chercher une solution par élément fini consiste donc à déterminer quel champ local on attribue à chaque sous domaine pour que le champ global $F(M, t)$ obtenu par juxtaposition soit proche de la solution du problème.

En résumé, la MEF consiste à remplacer la structure physique à étudier par un nombre fini d'éléments ou de composants discrets qui représentent un maillage. Ces éléments sont liés entre eux par un nombre de points appelés nœuds. On considère d'abord le comportement de chaque partie, puis on assemble ces parties de telle sorte qu'on assure l'équilibre des forces et la compatibilité des déplacements réels de la structure en tant qu'objet continu.

3. 3. 2. - Calcul par la MEF

La méthode aux éléments finis est théoriquement, la plus satisfaisante puisqu'elle permet la modélisation des problèmes géotechniques complexes.

- Elle nécessite :
 - ✓ La définition de la géométrie du problème, pour que les frontières du calcul n'influencent pas sur les résultats.
 - ✓ Le choix d'une loi de comportement du sol, de type Mohr-Coulomb, Bilinéaire,...
 - ✓ L'état initial des contraintes et des pressions interstitielles.
- Elle permet :
 - ✓ d'effectuer des calculs d'écoulements ;
 - ✓ de simuler toutes les phases de travaux ;
 - ✓ de prendre en compte les variations des caractéristiques : des ouvrages, des couches de terrain et des lits de butons ou de tirants ;
 - ✓ de calculer un coefficient de sécurité.
- Les sorties fournissent :
 - ✓ Pour les ouvrages
 - Les déplacements des ouvrages
 - Les efforts dans les butons ou les tirants.
 - ✓ Pour les sols
 - Les déplacements du sol ;
 - Les déformations du sol ;
 - Les pressions interstitielles
 - De calculer un coefficient de sécurité.

De nombreux programmes d'analyse de structure par éléments finis ont été mis au point ces dernières années : PLAXIS 7.2[©], MAC STAR 2.2[©], NASTRAN (NASA, USA), CASTEM (CEA), etc.

Nous avons utilisé dans le cadre de ce mémoire GEO- SLOPE[©], logiciel 2D qui aide les ingénieurs civils à modéliser le comportement du sol ;

3. 3. 3. - Présentation de GEO- SLOPE[©]

Le logiciel GEO- SLOPE[©] a été développé par GEO-SLOPE International Ltd Fondée 1977 et aide les ingénieurs civils à modéliser le comportement du sol.

GEO- SLOPE[©] est un programme d'éléments finis (Geostudio 6.22[©] est la version utilisée dans ce mémoire) en deux dimensions spécialement conçu pour réaliser des études de stabilité pour différents types d'applications géotechniques. Les situations réelles peuvent être représentées par un modèle plan ou axisymétrique. Le programme utilise une interface graphique pratique permettant aux utilisateurs de générer rapidement un modèle géométrique et un maillage d'éléments finis basés sur la coupe verticale de l'ouvrage à étudier.

L'interface d'utilisation de GEO- SLOPE[©] se compose de sept modules : SLOPE/W (analyser la stabilité d'une pente), SEEP/W (analyse de l'infiltration), SIGMA/W (contrainte/déformation), QUAKE/W (analyser l'impact de secousses sismique), TEMP/W (analyse géothermal), CTRAN/W (analyse de transports de contaminants), VADOSE/W (analyse de la zone non saturée).

➤ Analyse de la stabilité de talus avec GEO- SLOPE[©]

Dans le cadre de mémoire des analyses de stabilité de talus naturel ont été réalisées, donc c'est le module SLOPE/W qui a été utilisé pour évaluer la stabilité des talus.

La vérification de la stabilité globale est effectuée avec les méthodes de l'équilibre limite. Le bloc de sol soumis à la rupture est divisé en tranches et pour chacune d'elle le programme calcule le bilan des forces : forces externes, poids, forces agissant à la base de chaque tranche et forces de cisaillement agissant le long de l'interface des tranches. L'équilibre du bloc de sol entier est la superposition des équilibres de chaque tranche. La surface de rupture est un arc de glissement dont la base est assimilée à un arc de cercle. Tous les points situés sur la surface de glissement ont le même coefficient de sécurité. Le code de calcul de GEO- SLOPE emploie les méthodes simplifiées de Bishop, Janbu et la méthode ordinaire.

Pour l'analyse de la stabilité d'un talus la démarche est la suivante :

- ✓ Entrer les données du problème :
 - La géométrie du modèle, c'est-à-dire représenter sur la feuille de dessin les contours du talus à étudier en séparant les différentes couches.
 - Les propriétés du sol :
 - Types de sol (limons, marnes, latérites, etc.) ;
 - Modèle de sol (Mohr Coulomb, Rocher, non drainé...) ;
 - Masse volumique (sèche, humide ou saturée?) ;
 - Cohésion ;
 - Angle de frottement interne.

- ✓ Préparer la feuille de dessin :
 - Echelle de la zone de dessin
 - Affichage des axes
- ✓ Entrer les propriétés des différents matériaux de la base au sommet
- ✓ Définition de la géométrie
- ✓ Définir la méthode d'analyse (Bishop, Jambu,...)
- ✓ Control de l'analyse :
 - Surface de glissement (entrant et sortant)
 - Direction du glissement : change selon la zone à étudier
 - Ligne piézométrique ou isopotentiels
- ✓ Analyse des résultats (le facteur de sécurité sera calculé)
- ✓ Visualisation des résultats

➤ **Exemples de modèles de sols présents dans GEO- SLOPE[®] : Model de Mohr-Coulomb**

Le modèle de Mohr-Coulomb présente un comportement élastique parfaitement plastique sans écrouissage. Ce modèle bien connu est utilisé généralement comme une première approximation du comportement d'un sol.

Dans le plan de Mohr, la droite intrinsèque est représentée par :

$\tau = \sigma_n \tan \varphi + c$ et σ_n sont respectivement les contraintes de cisaillement et

normale, et C et φ respectivement la cohésion et l'angle de frottement du matériau (**Fig. 23**).

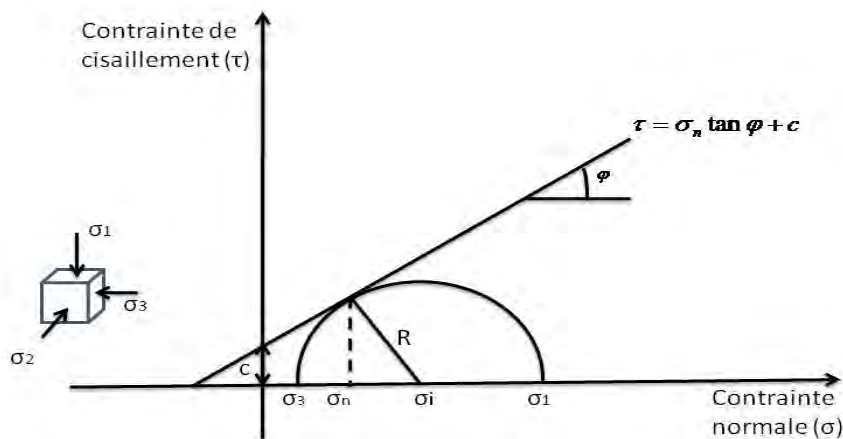


Fig. 23. - Courbe intrinsèque du modèle de Mohr-Coulomb

Le modèle demande la détermination des paramètres d'élasticité ; la cohésion (c) et l'angle de frottement (φ) sont les paramètres classiques de la géotechnique et sont nécessaires à des calculs de déformation ou de stabilité. Ils sont déterminés à partir de l'essai de cisaillement à la boîte de Casagrande.

CHAPITRE 4. – RESULTATS ET DISCUSSIONS

4. 1. – Résultats de terrain

Dans le cadre de ce mémoire nous avons d'abord effectué un travail de terrain dont les résultats ont été exploités à l'aide de l'outil informatique. Le travail de terrain a consisté à lever des coupes, observer et décrire les discontinuités et les désordres au niveau des ouvrages. Au total trois (3) sites d'observations ont été choisis : la plage de la prison de Prison, la Pointe des Madeleines et la Pointe Diop.

4. 1. 1. - Plage de Rebeuss

Pour ce site (photo 1 ; Figure 24), nous avons à l'affleurement uniquement des attapulgites blanchâtres débitées en plaquettes (recouvertes à la base par le sable) ; à rares grains de quartz (formation de la Prison). Les couches ont des pendages très faibles (entre 0 et 5° SE). Ces attapulgites présentent de multiples diaclases remplies quelques fois de calcite et affleurent sur huit mètres (8 m) environ surmontées d'altérites sur un à deux mètres (1 à 2 m).

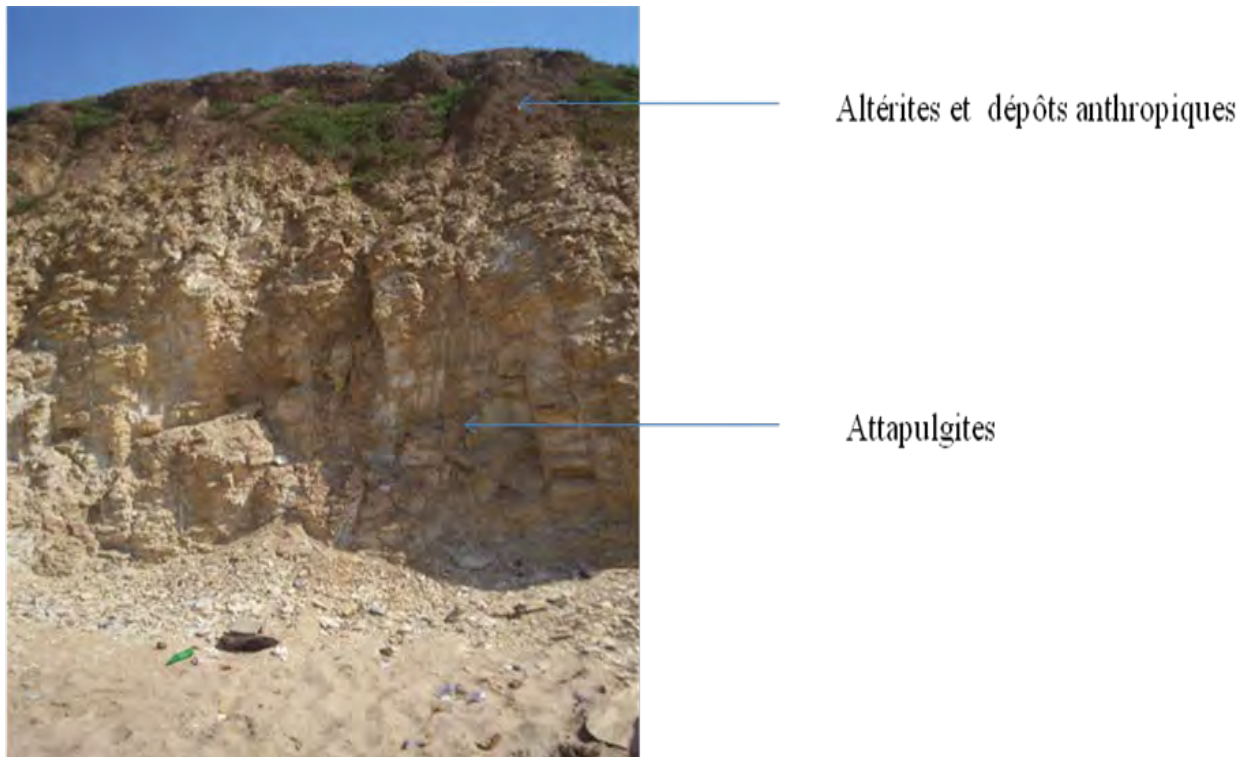


Photo 2. – Plage de la Rebeuss

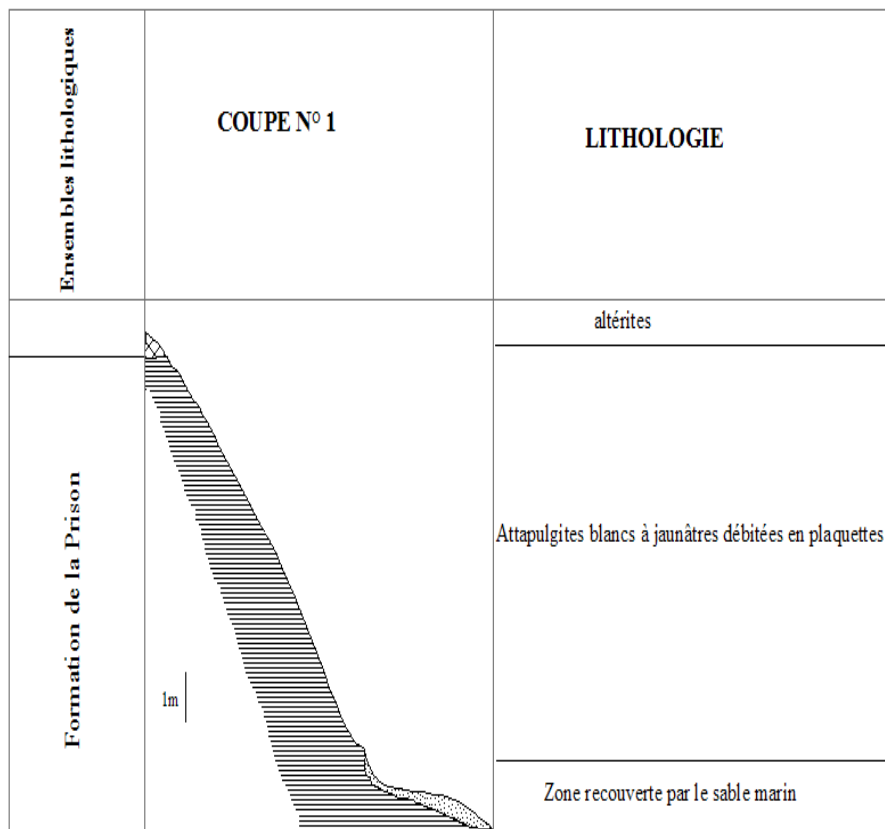


Fig. 44. – Coupe géologique de la plage de Rebeuss (Formation de la Prison)

4. 1. 2. - Pointe des Madeleines

Nous avons à l’affleurement les limons de l’Hôpital qui sont recouverts par la cuirasse latéritique (Photos 2 et 3 ; Figure 25). Ces limons se présentent sous deux faciès avec pour le premier niveau environ 8m et pour le second environ 6 m. La cuirasse est d’environ 2m d’épaisseur. A ce niveau les différentes couches ont un fort pendage (60°).



Photo 2. –Falaise de la Pointe des Madeleines

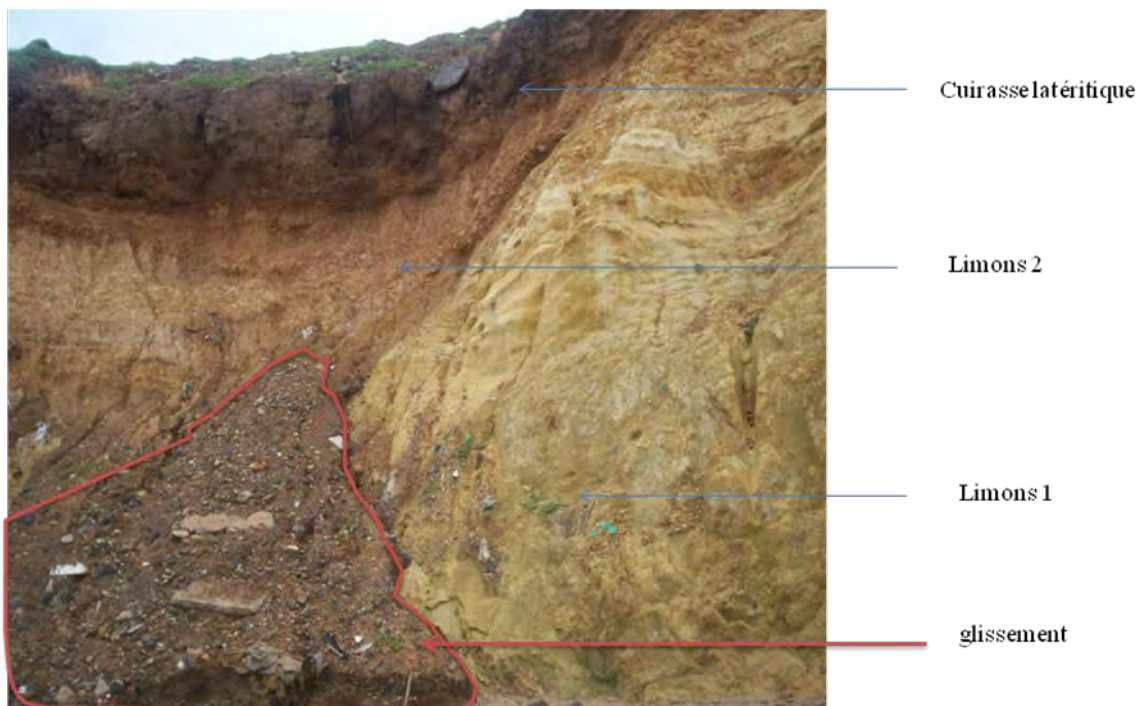


Photo 3. – Détails de la Falaise de la Pointe des Madeleines

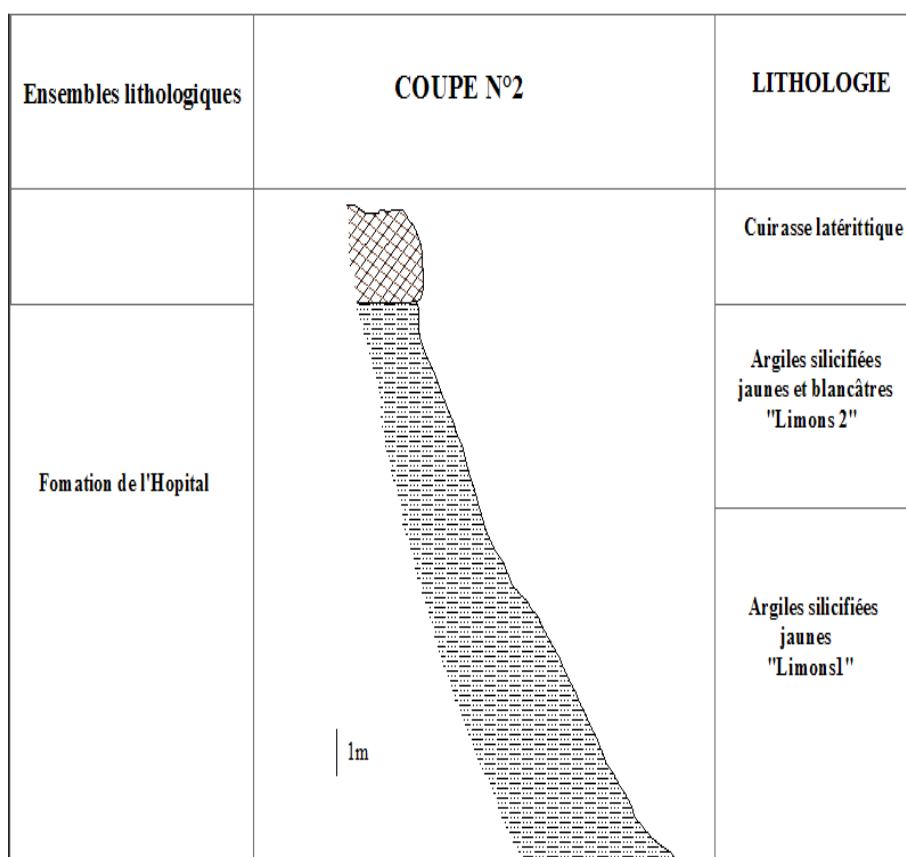


Fig. 55. – Coupe géologique de la falaise de la Pointe des Madeleines

4. 1. 3. - Pointe Diop

Nous avons à l’affleurement pour ce site (Photo 4 ; Figure 26) les marnes de la Madeleines (6 m) surmontées des limons de l’Hôpital qui se présentent aussi en deux niveaux comme au niveau de la pointe des Madeleines (1^{er} niveau 12 m et 2^e niveau 5 à 6 m) le tout étant surmonté par une cuirasse latéritique puissante de 3 à 4 m. Des failles normales sont observées a ce niveau (Photos 5 et 6).

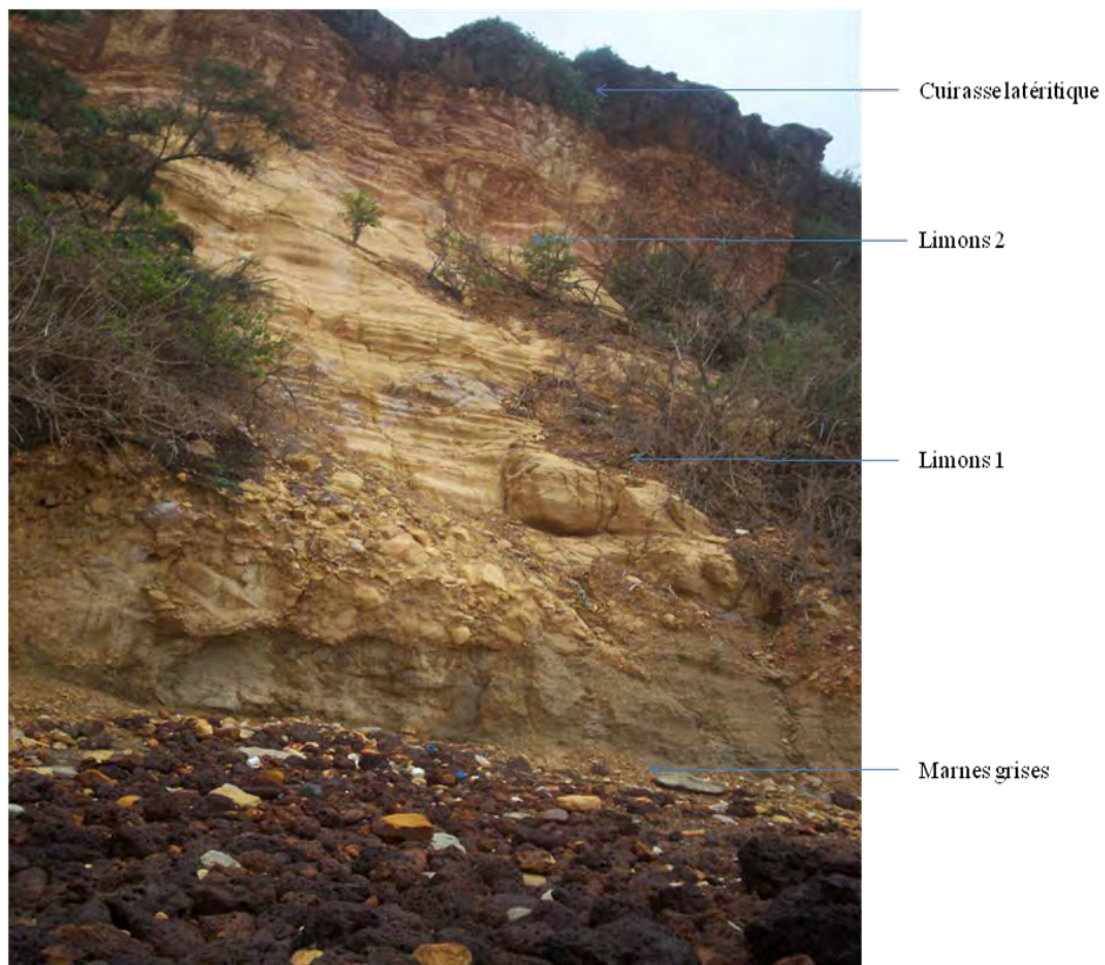


Photo 4. – Pointe Diop



Photos 5 et 6. – Failles observées au niveau de la Pointe Diop

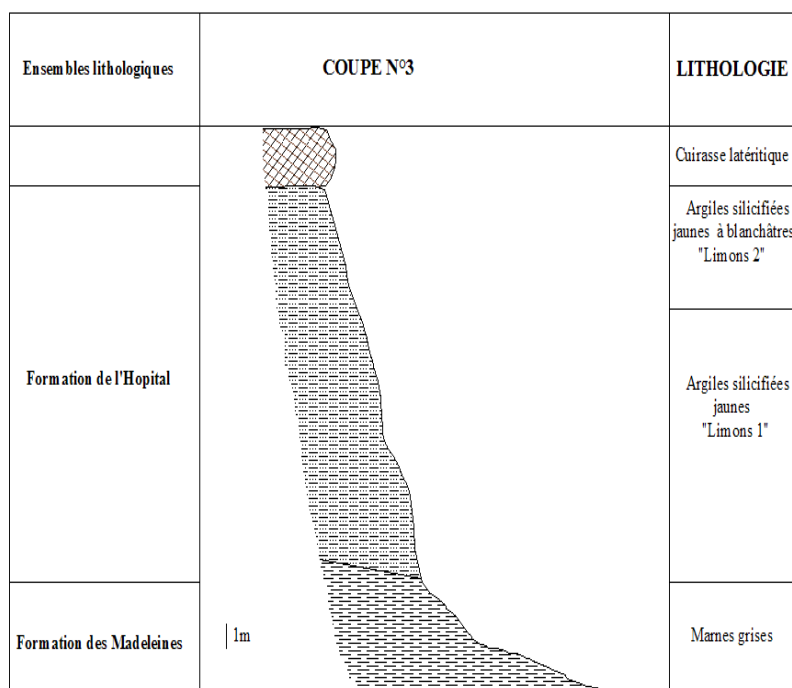


Fig. 66. – Coupe géologique de la Pointe de Diop

Ces différentes coupes nous ont servi de modèles pour étudier la stabilité de corniche ouest avec Geo- slope ; et pour cela nous avons utilisé différents modèles de comportements (Mohr-Coulomb et Rocher principalement).

Le modèle Mohr-Coulomb a été utilisé pour les limons, les attapulgites de la Plage de Rebeuss, les marnes des Madeleines, la couche d'altérite au niveau de la plage de la prison et la cuirasse latéritiques au niveau de la pointe des madeleines. Pour le modèle Rocher, les blocs de latérites comme une charge au dessus des couches sur lesquelles elle se trouve, il est seulement utilisé pour simuler le comportement des blocs de latérites observés au niveau de la Pointe Diop.

Pour le modèle de Mohr Coulomb nous avons utilisé les caractéristiques suivantes pour les couches (tableau 3).

formations caractéristiques	Marnes des Madeleines	Limon 1 de l'Hôpital	Limon 2 de l'Hôpital	Attapulgites de la Prison
γ_{sat} (kN/m ³)	23,6	23,4	23	23,6
c (kPa)	500	292,5	292,5	70
ϕ (°)	30	31,52≈32	30,94≈31	30,53≈31

Tableau 3 - Caractéristiques utilisées pour le modèle de Mohr-Coulomb

γ_{sat} = Poids volumique saturé
 φ = angle de frottement interne

c = cohésion

Après avoir défini les propriétés de chaque terrain, introduit les entrants et les sortants de chaque talus la limite du côté opposé à la pente et de la base c'est-à-dire la limite inférieure et supérieures sont placées à l'infinie.

Les coupes ont été modélisées sans nappes. Ce qui nous a permis d'aboutir à différents résultats.

4. 2. – Résultats de la modélisation avec GEO- SLOPE

Après avoir délimité les différentes couches qui constituent les talus naturels, nous avons introduit les caractéristiques mécaniques de chaque couche en leur affectant à chacun une loi de comportement. Ainsi nous avons procédé à la modélisation de trois coupes (Plage de Rebeuss, Falaise de la pointe des Madeleines et au niveau de la Pointe Diop).

4. 1. 1. - Plage de Rebeuss

Les figures 27 et 28 représentent respectivement la Plage de Rebeuss avant modélisation et avec les entrants et sortants. Les résultats de la modélisation étant donnés par les figures 29, 30 et 31 respectivement rupture de talus, rupture de pied de pente et rupture profonde.

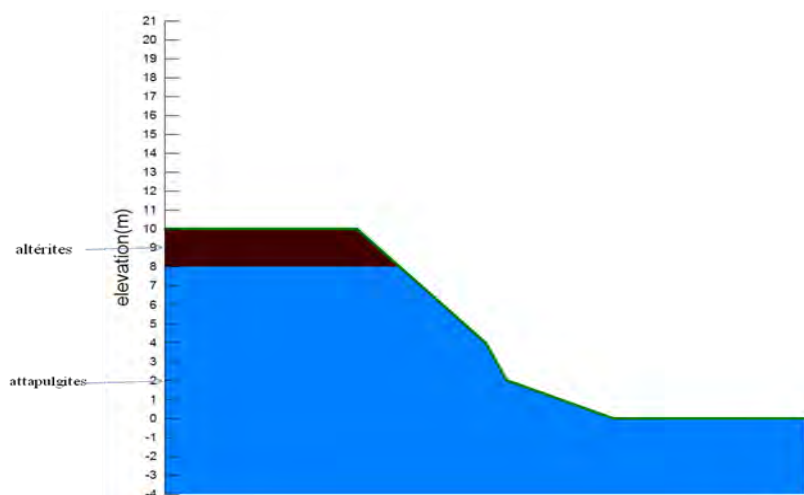


Fig. 27. – Plage de Rebeuss : avant modélisation.

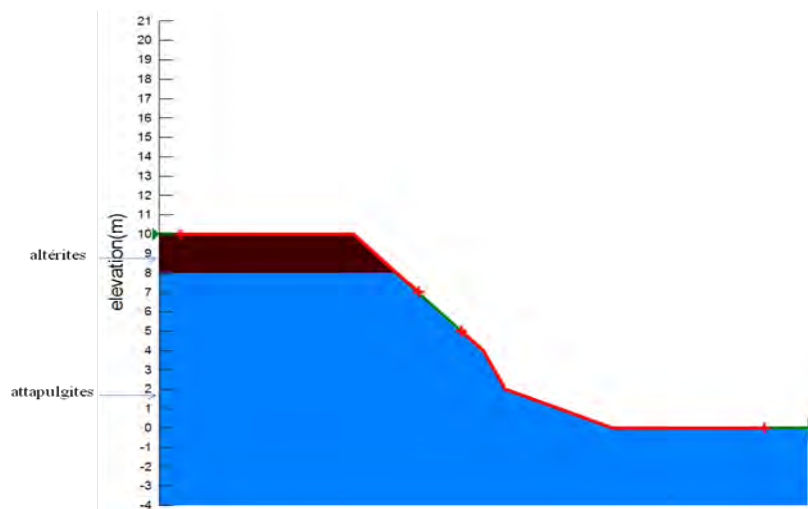


Fig. 28. – Plage de Rebeuss : avec entrants et sortants.

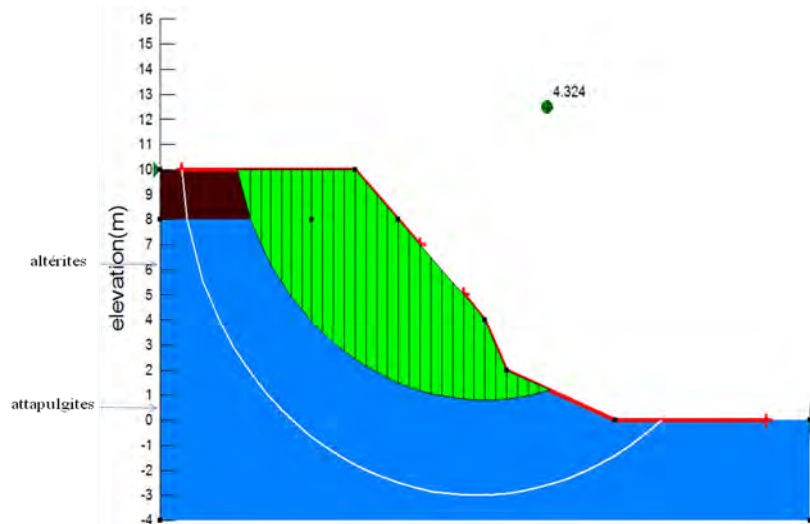


Fig. 29. – Plage de Rebeuss : Rupture de talus

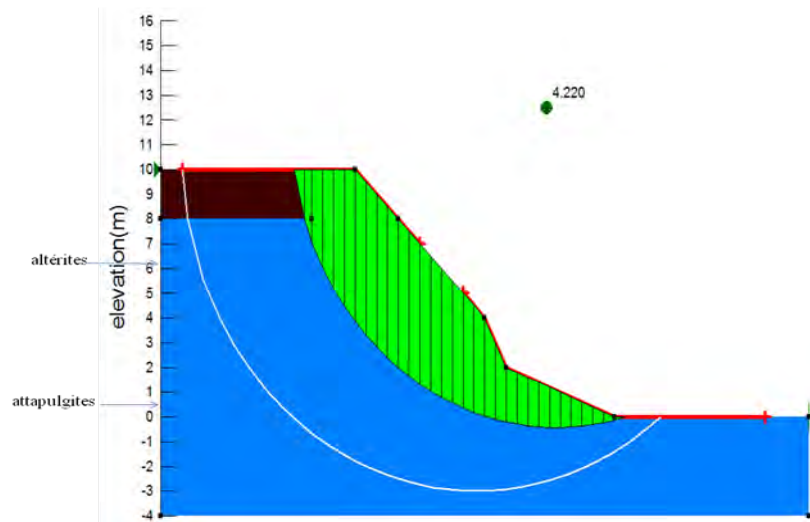


Fig. 30. – Plage de Rebeuss : rupture de pied de pente

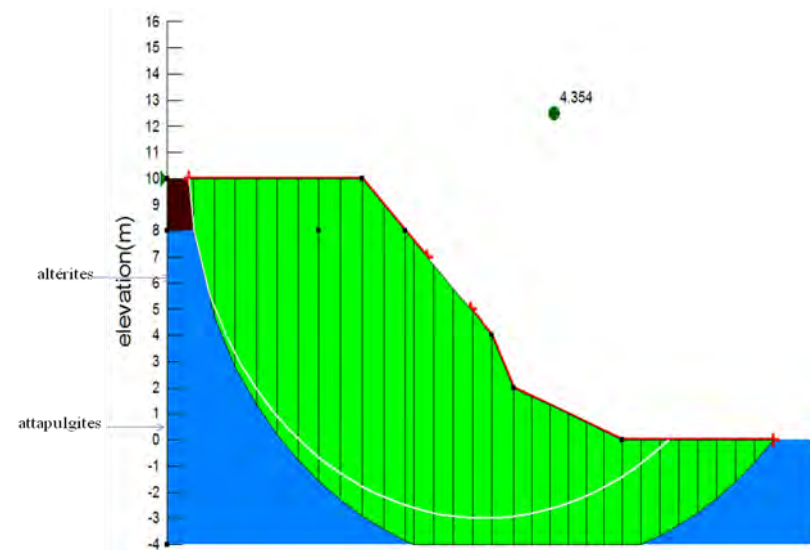


Fig. 31. – Plage de Rebeuss : rupture circulaire profonde

Au niveau de la Plage de Rebeuss les facteurs de sécurité sont différents selon que les cercles de ruptures soit de talus, de pied de pente ou profonds. Ces facteurs de sécurité faibles peuvent s'expliquer par la nature même des attapulgites qui sont des roches tendres très friables affectées par une fracturation intense.

4. 1. 2. – Falaise de la pointe des Madeleines

Les figures 32 et 33 représentent respectivement la falaise de la Pointe des Madeleines modélisation et avec les entrants et sortants. Les résultats de la modélisation étant donnés par les figures 34 et 35 respectivement rupture de talus et rupture profonde, le logiciel n'ayant pas proposé de rupture de pied de pente.

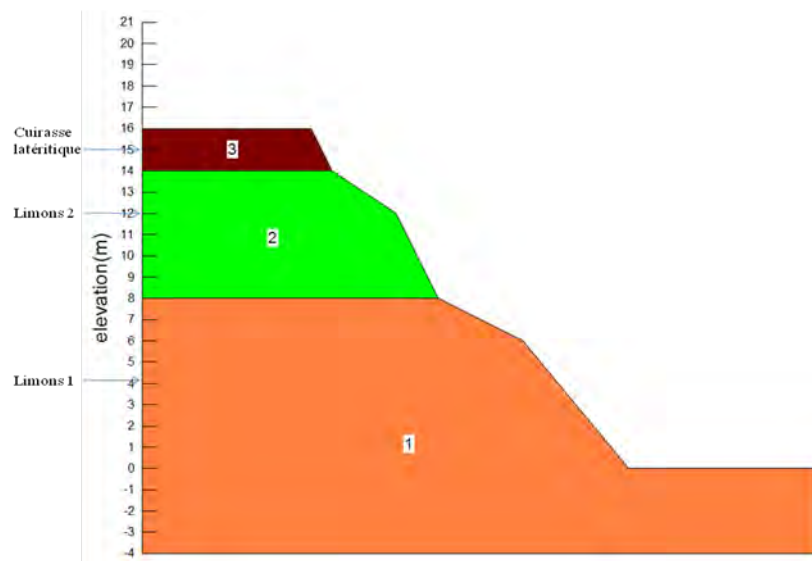


Fig. 32. – Pointe des Madeleines : avant modélisation

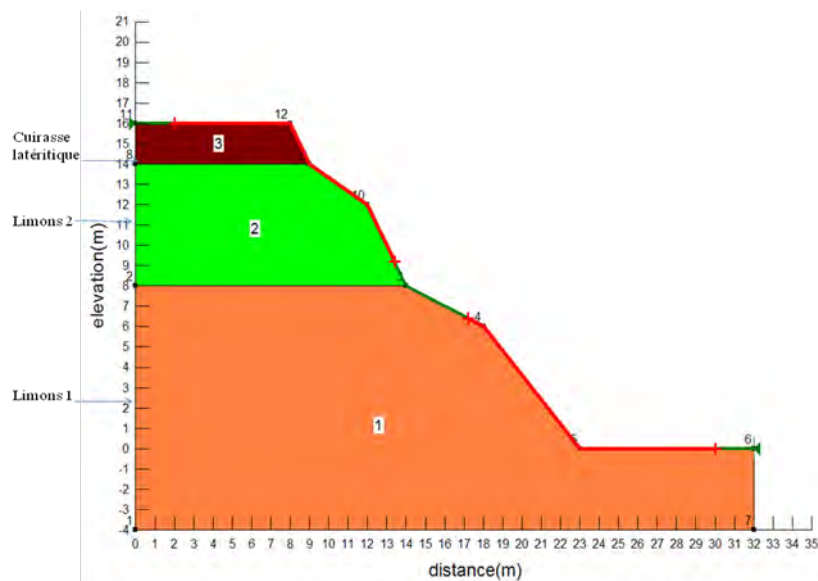


Fig. 33. – Pointe des Madeleines : entrants et sortants

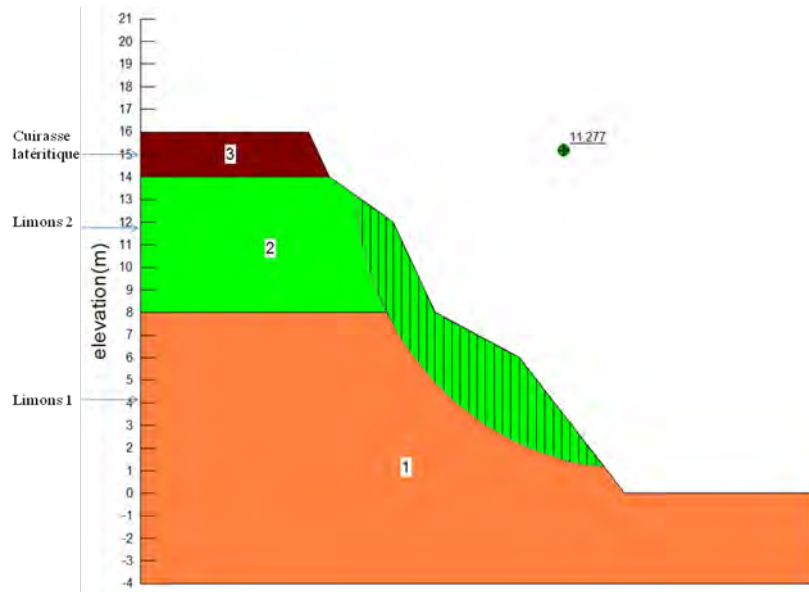


Fig. 34. – Pointe des Madeleines : rupture de talus

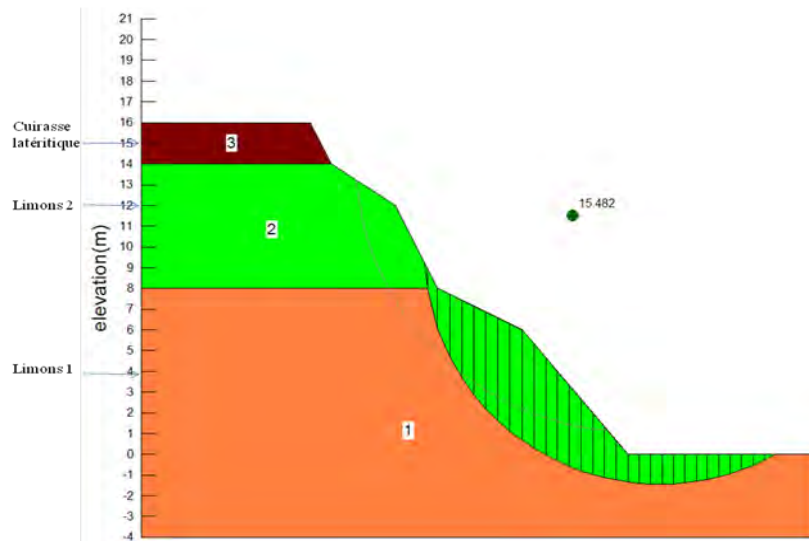


Fig. 35. – Pointe des Madeleines : rupture profonde

La falaise de la Pointe des Madeleine possède des facteurs de sécurités très élevés et ont sont donc relativement très stables. Cette stabilité peut être expliquée par la nature pétrographique des limons de l'Hôpital qui sont des terrains argileux assez compacts.

4. 1. 3. - Pointe Diop

Les figures 36 et 37 représentent respectivement la falaise de la Pointe des Madeleines modélisation et avec les entrants et sortants. Les résultats de la modélisation étant donnés par les figures 38 et 39 respectivement rupture de talus et rupture de pied de pente, le logiciel n'ayant pas proposé de rupture profonde.

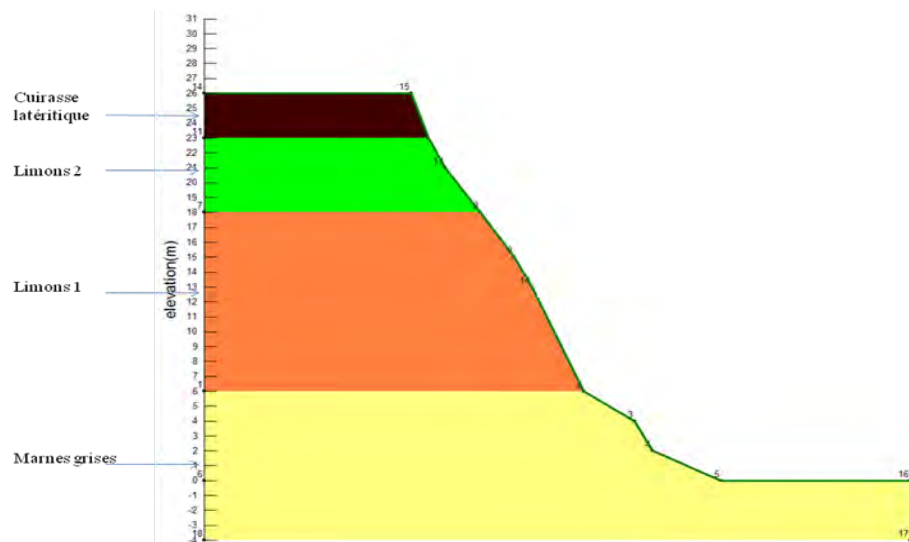


Fig. 36. – Pointe Diop : avant modélisation

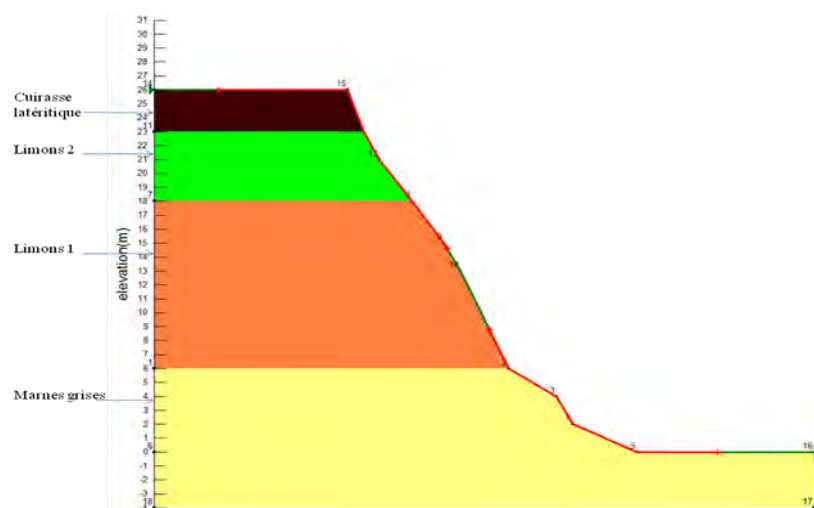


Fig. 37. – Pointe Diop : entrants et sortants

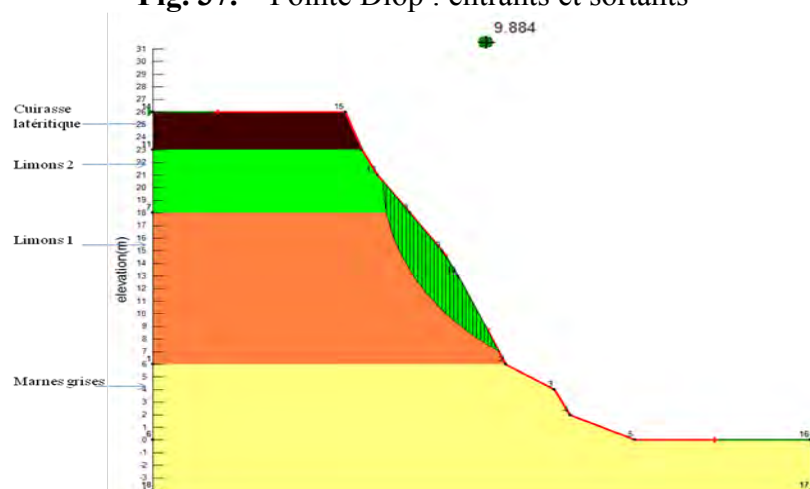


Fig. 38. – Pointe Diop : rupture de talus

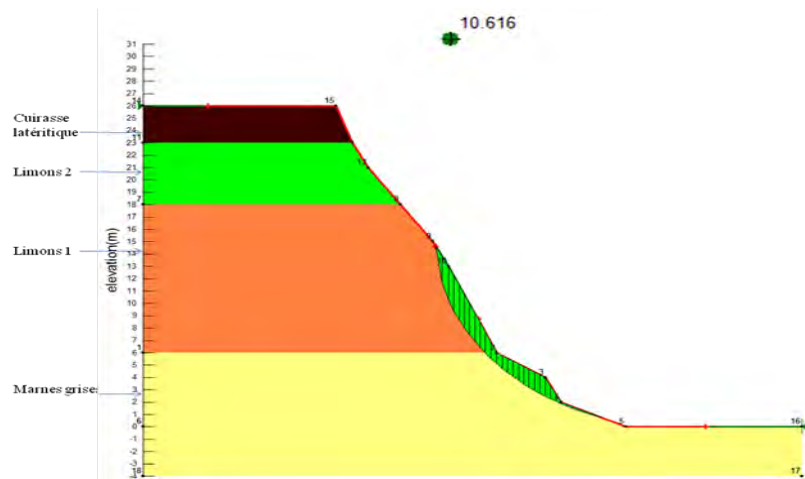


Fig. 39. – Pointe Diop : rupture de pied de pente

Les facteurs de sécurité fournis par geo- slope au niveau de la Pointe Diop sont relativement élevés.

Conclusion

Les valeurs des facteurs de sécurité sont différentes pour les trois coupes, comme nous le montre le tableau 4. Dans ce tableau les facteurs de sécurité obtenus grâce à geo- slope sont plus faibles au niveau de la plage de Rebeuss qu’au niveau de la falaise de la pointe des Madeleines et au niveau de la Pointe Diop.

Ces différences s’expliquent par les caractéristiques pétrographiques des terrains. En effet, au niveau de la plage de Rebeuss les attapulgitites étant des terrains friables ce qui explique les facteurs de sécurité plus faibles observés a ce niveau.

sites Facteurs de Sécurité	Plage de Rebeuss	Pointe des Madeleines	Pointe Diop
Rupture de talus	4,324	11,277	9,884
Rupture de pied de pente	4,220	-	10,616
Rupture profonde	4,354	15,482	-

Tableau 4. - Facteurs de sécurité calculés par Geo- slope

CONCLUSION GENERALE ET RECOMMANDATIONS

Dans les calculs de stabilité, des approximations et des hypothèses sont faites à plusieurs niveaux.

La modélisation à l'aide de GEO- SLOPE[®] nous montre que les différentes coupes (réalisées au niveau de la plage de Rebeuss, au niveau de la Pointe des Madeleines et niveau de la Pointe Diop), avec le modèle de comportement Mohr-Coulomb principalement, ont des facteurs de sécurités différents et très élevés donc ces talus sont relativement stables.

Les cercles de ruptures sont différents pour chaque coupes.

La question est pour combien de temps on aura ces cercles de ruptures ? Il faut savoir que les outputs de ce code de calcul fournissent des résultats à l'infini (t_{∞})

Le modèle Mohr-Coulomb est un modèle d'approximation permettant d'avoir une première appréciation du comportement du terrain d'une part, d'autre part par la nature de nos matériaux (essentiellement des argiles) dont le comportement est plus proche du modèle de Cam-Clay, il serait plus judicieux de modéliser les talus avec un code de calcul intégrant des modèle de comportement comme celui de Cam-Clay.

A la suite de ces études, il est nécessaire de formuler les recommandations suivantes :

- Maitrise les eaux de ruissellement et des eaux domestiques ;
- Fixation des sols des versants par la végétation ;
- Enrochement des versants ;
- Drainage des terrains ;
- Surveillance de l'évolution des facteurs de sécurités ;

Par ailleurs, dans l'optique de travaux futurs en vue d'affiner les résultats, nous préconisons une étude qui tiendra compte des surcharges éventuelles du massif (poids des ouvrages) ; mais aussi une étude hydrogéologique pour bien comprendre les écoulements de surfaces et souterrains qui existent dans notre secteur d'étude et les intégrer ainsi dans les entrants du code de calcul.

Il faudra aussi, dans tous les projets d'aménagement et d'urbanisation tenir compte de ces problèmes d'instabilité pour limiter les désordres comme ceux observés dans beaucoup d'édifices construites sur les corniches est et ouest de la ville.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BELLION, Y. (1989).** - Histoire géodynamique post-paléozoïque de l'Afrique de l'Ouest, d'après l'étude de quelques bassins sédimentaires (Sénégal, Taoudenni, Iullemmeden, Tchad). Thèse, Avignon, France, 302 p
- BONGRAND M. O. et Elouard P. (1968).** – Nature Pétrographique de la formation l'Hôpital de Dakar. Ann. Fac. Sc. n°22, 5-32.
- CASTELAIN, J. (1965).** - Aperçu stratigraphique et micropaléontologique du bassin du Sénégal occidental. Historique de la découverte paléontologique. Mémoire du BRGM n°32, p. 135-159.
- CASTELAIN, J. JARDINE, S. MONCIARDINI, C. (1965).** – Excursions géologiques dans le Sénégal occidental d'après des travaux et des documents de la Société Africaine des Pétroles (S. A. P).in : Colloque int. Micropal. (Dakar, 6-11 Mai 1963), Mém. B. R. G. M. n° 32.
- CHATELET, H. et K'VADEC J. P. (1975).** – Cartes géologiques de Dakar au 1/25000. Lab. Trav. Publ. Sénégal- Dakar, 22 p, 3 cartes, B. R. G. M.
- CREVOLA, G. et GAYE, C.B. (1979).** - Interprétation géologique des coupes de six sondages Département de Géologie, UCAD, 131 p
- DIA, A. (1980).** – Contribution à l'étude des matériaux volcaniques de la Presqu'île du Cap-Vert et du Plateau de Thiès. Mém. D.E.A., Univ. Dakar, 95 p.
- DIOP, I. N. (1995).** – L'érosion côtière sur la petite côte du Sénégal à partir de Rufisque : Passé- Présent- Futur. Thèse Doc. Géol., Univ. D'Angers, U. F. R. Envir., 475 p., 112 fig., 47 tab. 6ann.
- DIOP, S. (2000).** – Contexte géologique et risques naturels : Déterminants structuraux de l'instabilité des corniches de la partie Sud de Dakar. Mem. Ing. IST., n° 0091, UCAD, 91 p
- ELOUARD, P. (1966).** – Eléments pour une définition des principaux niveaux du Quaternaire sénégal-mauritanien : I – Plage à *Arca senilis*. Bull. ASEQUA, Dakar, n° 9, p.6-20.
- ELOUARD, P. (1980).** - Géomorphologie structurale, lithologique et climatique de la presqu'île du Cap-Vert (Sénégal). Notes afr. I.F.A.N., Dakar, n° 167, p. 57-68.
- ESSO Exploration Inc. East Atlantic Study Group (1969).** – Photogeology of Senegal concession. Geomap. BRGM, Dakar.
- FALL, M. (1993).** – Etude de la stabilité du versant naturel des Madeleines. Mem. Ing. IST., n°41, UCAD, 108p.
- FALL, M. Samb, S. S. Paye, F. (2007).** – Slope stability of the “Corniche Ouest” of the Dakar peninsula (Senegal, West Africa) using Cam- Clay Modeling.
- FALL, M. (2006).** – Stabilité des pentes. Cours IST 2^{ème} année, 8 p.
- GARRIGUES J. (2002).** – La méthode des éléments finis. Cours Ecole Supérieure de Mécanique de Marseille, 83 p.
- GAYE, C.B. (1980).** Etude hydrogéologique, hydrochimique et isotopique de la nappe aquifère infabasatique de la presqu'île du cap vert (Sénégal). Thèse de doctorat 3^{ème} cycle,

GLADIMA, S.A. (1988). - Etude de la stabilité de la Corniche Est de Dakar. Mém. Ing. IST., n°14 UCAD, 72 p.

HEBRARD, L. (1966). – Les formations tertiaires et quaternaires de l'isthme de la presqu'île du Cap-Vert (feuille TIAROYE, Sénégal). Rapp. Lab. Géol. Fac. Sc. Univ. Dakar, n 16, 68 p.

LAPPARTIENT, J.R. (1985). – Le «Continental Terminal» et le Pléistocène ancien du bassin Sénégal-mauritanien : stratigraphie, sédimentation, diagenèse, altération. Reconstitution des paléorivages au travers des cuirasses. Thèse d'état, Aix Marseille 2, 294 p.

LEROUX, M (1983). – Le climat de l'Afrique tropicale. Thèse

LOMPO, M (1987). – Méthodes et étude de la fracturation et des filons : Exemple de la région du Cap-Vert (Sénégal). Mém. DEA, Dakar, 59p

MARTIN, A. (1970). Les nappes de la presqu'île du Cap-Vert : leur utilisation pour l'alimentation en eau de Dakar. Rapport BRGM, 56 p.

MPASSI, D.R. (2004). – Contribution à l'étude tectonique de la partie occidentale du bassin sénégal-mauritanien. Thèse de doctorat 3^{ème} cycle, Département de Géologie, UCAD, 254 p

NAHON, D. et Demoulin, D. - (1971). Contribution à l'étude des formations cuirassées du Sénégal occidental (pétrographie, morphologie et stratigraphie relative. Revue de géogr. Phys. Et de géol. Dynamique, (2), vol. XIII, Fasc.1, p.35-54, Paris.

NARDARI, B. (1993). – Analyse de la houle sur les cotes du Sénégal occidental. Application à la pointe de Sangomar. Rapport de stage U. T. I. S., I. S. R. A. /O. R. S. T. O. M. Dakar, 31p, 26 fig., 5 ann.

OMS. (1972). - Approvisionnement en eau et Assainissement de Dakar et ses environs. Etude des nappes souterraines, Tome II : Nappes des Quaternaires. Projet SENEGAL 3201, 139 p.

SALL, M. (1982). – Dynamique et morphogenèse actuelle au Sénégal occidental. Thèse d'Etat Lettre, Univ. Strasbourg, 604 p., 138 fig., 21 pl.h.t, 5 ann.

SARR, R. (1995). - Etude biostratigraphique et paléoenvironnementale des séries d'âge Crétacé terminal à Eocène moyen du Sénégal occidental. Systématique et migration des ostracodes. Thèse Doctorat d'état, UCAD, 335 p.

TESSIER, F. (1950). - Première note sur les glissements de terrain du palais du Gouvernement Général à Dakar.

TESSIER, F. (1952). - Deuxième note sur les glissements de terrain du palais du Gouvernement Général à Dakar.

Tessier, F. (1953). - Troisième note sur les glissements de terrain du palais du Gouvernement Général à Dakar.

LIENS INTERNET

<http://www.ecologie.gouv.fr/>

<http://www.brgm.fr/>

<http://www.geoslope.com>

Etude de stabilité de la corniche-ouest : modélisation de talus naturels avec GEO- SLOPE

**Mémoire présenté par
Monsieur Boubacar Mbengue**

Pour l'obtention du Diplôme D'ETUDES APPROFONDIES (D.E.A)

En Géologie Appliquée : Mention Hydrogéologie

Soutenu le 19 Février 2010 devant le jury composé de :

M.	Abdoulaye	FAYE	Président	(U.C.A.D)
M.	Meissa	FALL	Rapporteur	(U.C.A.D)
M.	Mamadou	FALL	Examineur	(U.C.A.D)
M.	Moustapha	DIENE	Examineur	(UCAD)
Mme.	Sophie A. GLADIMA	SIBY	Examinatrice	(U.C.A.D)

RESUME

La zone d'étude correspond au sud est de la presqu'île de Dakar.

Sur le plan géologique, on distingue essentiellement dans la zone, des formations datant du Tertiaire et affleurant le long de la côte.

La tectonique est marquée par l'existence de nombreuses failles.

Du point de vue hydrogéologique les marnes de l'Eocène qui affleurent dans la zone sont décrits comme étant le mur de l'aquifère des sables infrabasaltiques.

L'étude de la stabilité de la zone est réalisée à partir de trois (3) coupes géologiques, dont une à la Plage de Rebeuss, une au niveau de la falaise de la Pointe des Madeleines et une au niveau de la Pointe Diop. Ces coupes sont modélisées grâce au code de calcul par éléments finis GEO- SLOPE[®].

La modélisation est faite à partir de l'hypothèse suivante nous avons considéré qu'il n'y a pas de nappe.

Le modèle de Mohr-Coulomb est utilisé pour simuler le comportement des sols et le modèle Rocher pour le comportement de la cuirasse latéritique au niveau de la Pointe Diop.

Les résultats obtenus montrent que, les talus naturels ont des facteurs de sécurité relativement élevé. Les déformations sont représentées par des cercles de rupture.

Tous ces résultats nous ont permis de conclure que la corniche-ouest est stable.

Mots clés : stabilité, corniche-ouest, Mohr-Coulomb.