6c

Etude de cas

ETUDE DE SUIVI DU TRAIT DE COTE
ET SCHÉMA DIRECTEUR LITTORAL
DE L'AFRIQUE DE L'OUEST

ETUDE DE CAS AU SENEGAL

DETERMINANTS DE L'EVOLUTION DU TRAIT DE COTE LE LONG DES FALAISES LITTORALES EN MILIEU FORTEMENT URBANISE : CAS DE LA PRESQU'ILE DE DAKAR.

6C

2010

DETERMINANTS DE L'EVOLUTION DU TRAIT DE COTE LE LONG DES FALAISES LITTORALES EN MILIEU FORTEMENT URBANISE : CAS DE LA PRESQU'ILE DE DAKAR.

Mamadou Gueye & al

TABLE DES MATIERES

I. CONTEXTE DE L'ETUDE....4
II. PRESENTATION DES FALAISES LITTORALES DE LA PRESQU'ILE DE DAKAR 6
2.1 LA VARIÉTÉ DES PAYSAGES....6
2.2 TOPOGRAPHIE – MORPHOLOGIE....7
2.3 HYDROLOGIE ET HYDROGÉOLOGIE....14
2.4 LES AGENTS D'ÉROSION OCÉANIQUE....16
2.5 VÉGÉTATION....18
2.6 CONTEXTE MORPHO-GÉOLOGIQUE....18
III. APPROCHE METHODOLOGIQUE....28
3.1 TECHNIQUES DE COLLECTE DES DONNÉES....28
IV. L'EVOLUTION DU TRAIT DE COTE....34
4.1 MÉTHODOLOGIE....34
4.2 LES INSTABILITÉS DE TERRAIN....41
V. PRÉSENTATION SYNTHÉTIQUE DES RÉSULTATS OBTENUS....53
VI. PERSPECTIVES....54
6.1 PERSPECTIVES D'ÉTUDES POUR UN AMÉNAGEMENT DURABLE....55
6.2 PROPOSITIONS D'ÉTUDES GÉOLOGIQUES ET GÉOTECTONIQUES SUR LES CÔTES ET FALAISES ROCHEUSES DE L'OUEST DU SÉNÉGAL....57
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES....62
LISTE DES ILLUSTRATIONS....63

I. CONTEXTE DE L'ETUDE

Le recul des falaises de la Presqu´ile de Dakar est somme toute logique puisqu'elles sont des formes d'érosion par définition. Toutefois, cette dynamique régressive rattrape les populations côtières et leurs activités imprudemment implantées trop près du rivage. Cette menace appelle une nouvelle politique de défense. Le problème des parties instables de la Corniche a été une préoccupation constante des aménagistes et des décideurs.

Le littoral dakarois est particulièrement intéressant pour l'analyse du risque naturel en milieu littoral, s'agissant notamment de l'érosion côtière. Cette situation résulte des caractéristiques géologiques de ce secteur qui définissent des abrupts de limons, tufs, formations argilo-marneuses, et favorables à la météorisation. Par ailleurs, de par sa diversité de faciès son orientation, le rivage (et notamment les côtes basses) est ouvert et exposé aux houles de direction nord-ouest. La faible résistance de certains matériaux en présence induit des vitesses de recul importantes qui menace les populations côtières et leurs activités. Même si cette dynamique est connue depuis longue date, en revanche, la quantification des taux de retrait et de la part respective de chacun des processus responsables du recul reste encore difficile et approximative.

La gestion de l'érosion côtière au niveau de la Presqu´ile de Dakar s'est jusqu'à présent résumée par la mise en place de quelques ouvrages rigides de défense et par la reprofilation de la côte, perturbant le cheminement, la répartition et le volume des cordons de galets pourtant protecteurs contre l'assaut des houles.

Cette protection a toujours ignoré l´effet des eaux de ruissellement de plus en plus important, en relation avec une urbanisation galopante qui limite fortement les infiltrations.
Etudier l'instabilité du secteur, c'est d'abord en déceler les signes ou les indicateurs, identifier les indices, évaluer les désordres causés, cerner les origines, et proposer des recommandations dans le sens d'un suivi, d'une atténuation ou d'un évitement.

Actuellement, les approches les plus pertinentes font appel à une conjonction de méthodes complémentaires et contradictoires, à la place des opérations spécifiques qui n'abordaient qu'un pan très limité de la manifestation d'une stabilité.

Pour le cas des falaises littorales de la Presqu´ile de Dakar, les signes ont pour noms : désordres dans les divers bâtiments, fissurations et dénivellement de la route de la Corniche, chutes de blocs de latérite et de limons, glissements de terrains, recul de la côte, etc.

Les indices, l'évaluation, les origines ont toujours été insuffisamment argumentées et les recommandations jusqu'à présent non suivies et appliquées.
Pour détecter les phénomènes dans leur diversité, nous avons fait intervenir plusieurs techniques opératoires de terrain pour collecter les données les plus pertinentes, aptes à nous renseigner sur la géologie fine et les indices d'instabilité et d'évolution des sites.

Les résultats de cette collecte ont été validés et analysés par des logiciels de traitement spécifiques et traduits en divers graphiques pour faciliter leur corrélation.

Nous avons par la suite opéré une corrélation entre les données provenant des diverses techniques opératoires, ce qui a permis, non seulement de faire valider les résultats par les analyses contradictoires, mais aussi d'établir une hiérarchie dans la détermination des indices et des causes d'instabilité dans les sites.
Leur interprétation a été suivie d'une discussion autour des causes profondes des instabilités de façon à proposer des recommandations pour un aménagement durable des sites.

Le présent document synthétise les principaux résultats obtenus à partir des études réalisées entre 2000 et 2010. Il vise à sensibiliser l´ensemble des acteurs de l´aménagement du littoral à la problématique de l´érosion et des aménagements côtiers.
Les 20 kilomètres de la côte rocheuse dakaroise sont naturellement riches en raison des écosystèmes qu´elle héberge et de sa diversité géologique. Cependant le littoral est soumis à une forte pression anthropique. L´érosion littorale et les importantes instabilités de terrain qu´elle génère cause d´énormes problèmes aux aménagements dans cette zone en forte expansion.

L´objectif de cette étude est d´apporter une aide à la gestion de la côte rocheuse dakaroise par une amélioration de la connaissance de l´aléa naturel que représente l´érosion côtière.
Nous proposons, dans ce rapport, de mettre l'accent sur les indices d'instabilités, d'évaluer leurs effets sur l'évolution du trait de côte, de cerner leur origine.
Nous présenterons dans cette étude les modalités du recul des falaises et quelques éléments de réponse quant à sa grande variabilité spatiale et aussi les méthodes et les techniques de mesure du recul.

Cette banque de données sera la base de recommandations qui seront des outils parmi tant d'autres pour concevoir et réaliser des ouvrages fiables et durables.

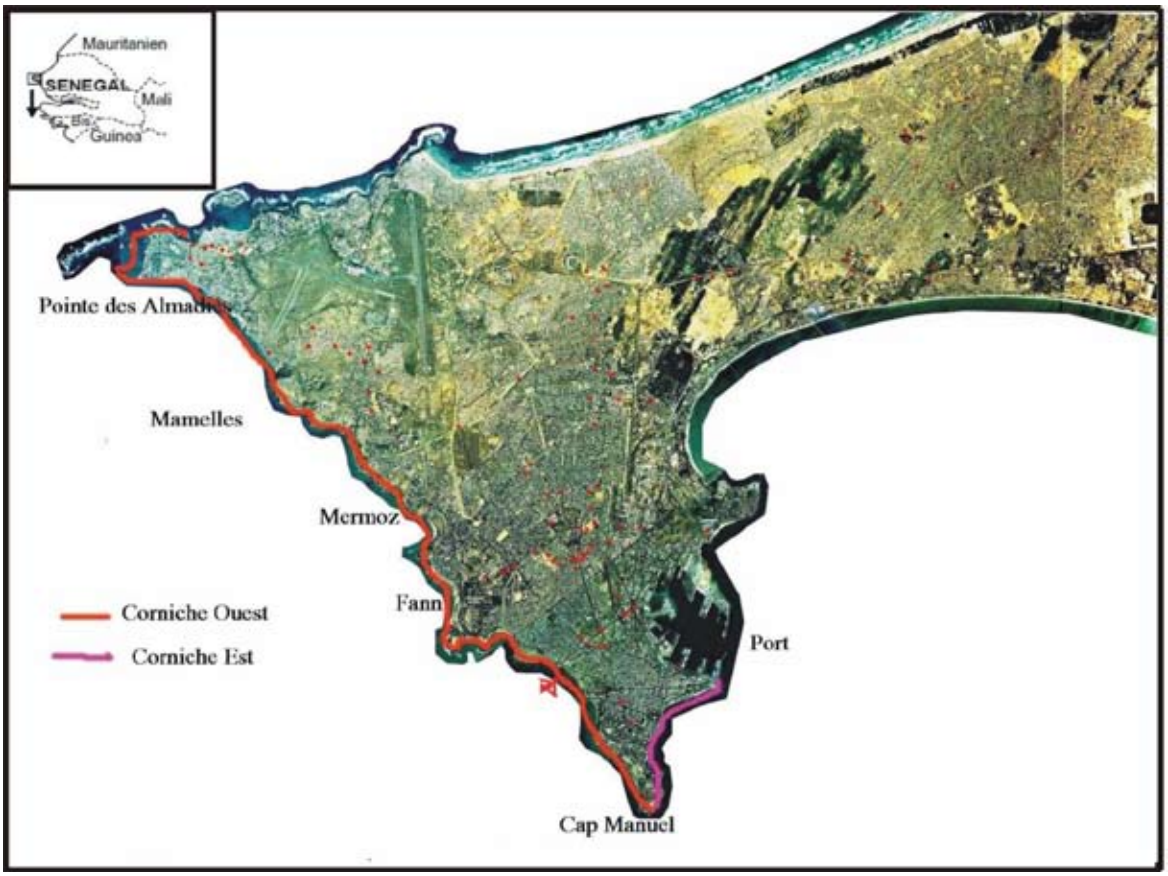
II. PRESENTATION DES FALAISES LITTORALES DE LA PRESQU'ILE DE DAKAR

2.1 LA VARIÉTÉ DES PAYSAGES

La côte dakaroise entre la Pointe des Almadies et le port constitue environ les 20 kilomètres de littoral rocheux sénégalais (passage obscur). Les sites étudiés situés le long de la Corniche Ouest sont d´ouest en est (Fig. 1) :
- Mamelle
- Mermoz
- Pointe des abattoirs à la Pointe des Madeleines
- Pointe Diop au Cap Manuel.

Globalement le paysage est constitué par des falaises, des plages et des baies.
La nature géologique de ces couches détermine une falaise littorale particulière entre la Pointe de Fann et la Pointe des Madeleines. Les formations argilo-marneuses de la prison forment des falaises verticales qui sont en retrait par rapport au trait de côte, constituant une falaise morte. Les formations limoneuses de la Pointe des Madeleines et de la Pointe Diop déterminent un versant en pente plus douce, parfois un replat. Divers éboulis ou dépôts de versants s'accumulent en pied des falaises de limon et masquent en partie les assises géologiques.

Figure 1 : localisation des différents sites étudiés dans une photo aérienne infrarouge de Dakar

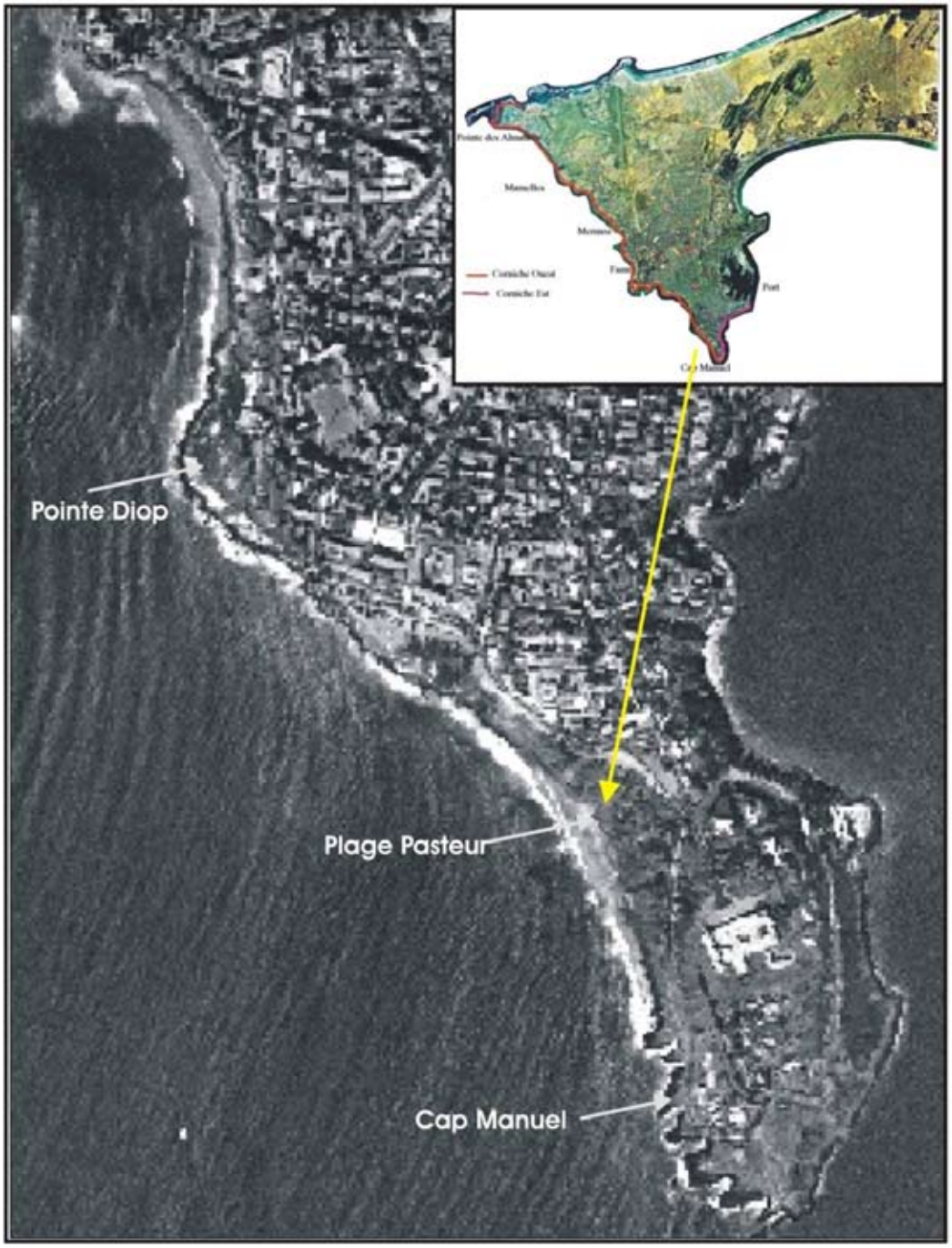


2.2 TOPOGRAPHIE – MORPHOLOGIE

1. Du Cap Manuel à la Pointe Diop

Le littoral est constitué d´une alternance de baies, de pointes et de Cap (Fig. 2). Entre la Pointe Diop et le Cap Manuel se trouve une baie constituée de tufs volcaniques (plage Pasteur), une falaise basaltique (Photo 1) et une falaise limoneuse (Photo 2).

Figure 2 : Photo aérienne montrant la localisation des sites Cap Manuel- Pointe Diop



Tout au long de la falaise, les phénomènes de coulée superficielle et de solifluxion sont quasi permanents et donnent à la paroi un profil souvent rectiligne. La paroi de la falaise cumule assurément des combinaisons topographiques (pente douce favorisant l'infiltration) et structurales (affleurement d'argiles) propices à l'instabilité.

Photo 1 : Falaise abrupte basaltique du Cap Manuel (Lo, Avril 2004)

Photo 2 : La falaise limoneuse de la Pointe Diop (Lo, Avril 2004)

2. De la Pointe des Madeleines à la pointe des abattoirs (porte du Millénaire)

La Pointe des Madeleines se situe dans la partie Sud – Ouest de la Presqu'île de Dakar (Fig. 3). Au point de vue géologique, c'est un cap formé essentiellement d'argiles silicifiées mieux connues sous le nom des limons de l'Hôpital (Photo 3) et qui sont des roches sédimentaires tertiaires, traversées par des formations volcaniques du Miocène et surmontées d'une cuirasse latéritique datée du pliocène.

Ces formations sont en discordance avec la zone nord où affleurent les argiles de la Prison et avec le secteur sud où affleurent essentiellement les marnes et argiles des Madeleines. Le ruissellement y est très intense en hivernage.
Les houles dominantes sont de direction NW et attaquent de front la partie centrale de la pointe avec une puissance moyenne de 18kw.m-1.

L'action des vagues est en effet contrariée par les dalles limoneuses laissées par le recul. Au moins deux canalisations d'évacuation des eaux usées débouchent à l'extrême – ouest de la Pointe.

Figure 3 : Localisation de la Pointe des Madeleines

Photo 3 : La falaise limoneuse de la Pointe des Madeleines (Lo, Mai 2001)

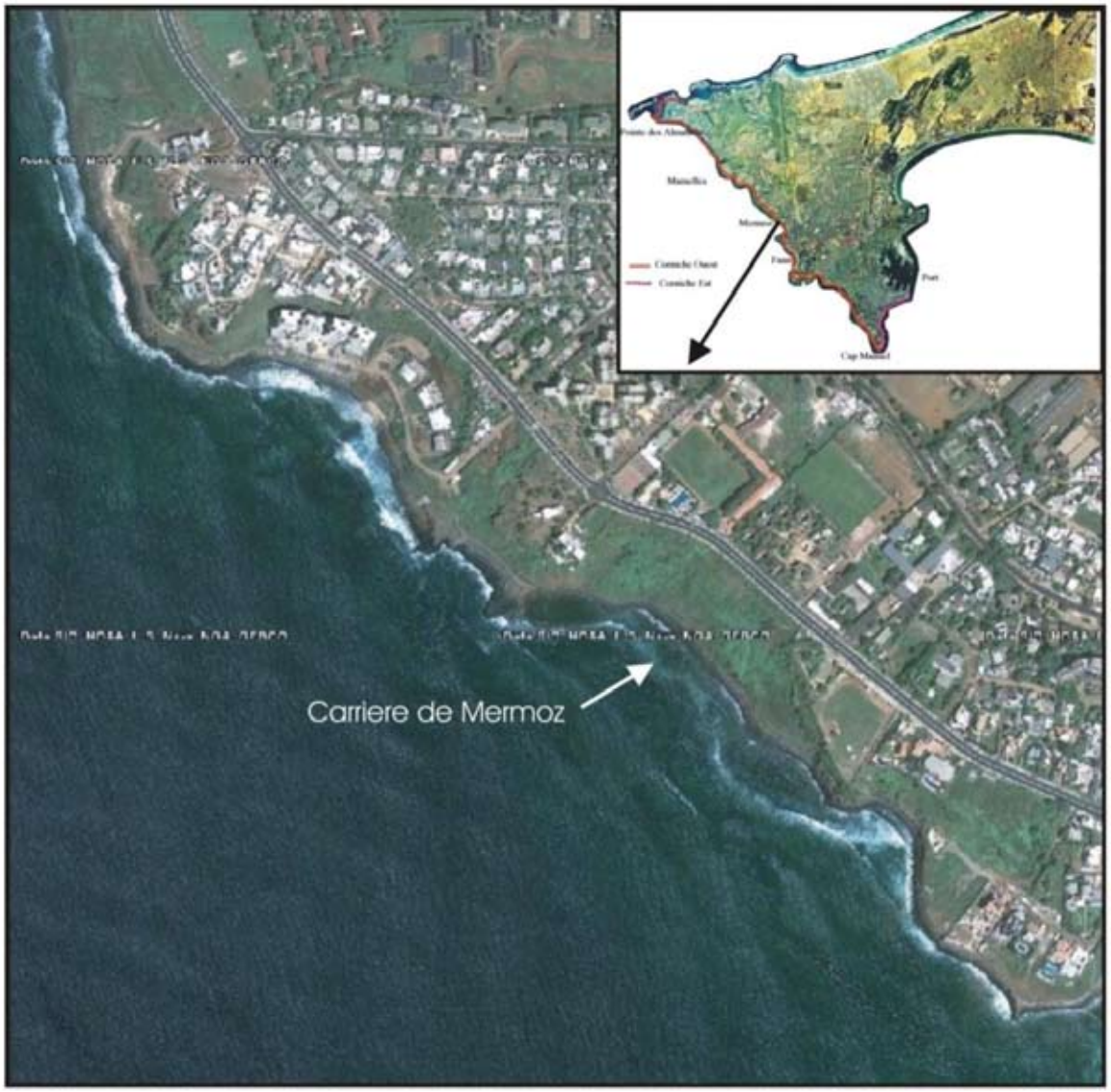
Photo 4 : La porte du Millénaire (Lo, Avril 2004)

3. Mermoz

Le site étudié occupe une position littorale au sud de la Pointe de Mermoz dans la zone des anciennes carrières ETPD n°1, juste à l'Ouest de l'Ecole Nationale d'Economie Appliquée et du Club Américain Atlantique.

C'est une bande de forme trapézoïdale orientée NW – SE sur 375 m de base et 100 m de large, qui permet une belle vue sur les Iles de la Madeleine et la Pointe de Fann (Fig. 4).

Figure 4 : Localisation de la carrière de Mermoz



Le modelé du site est marqué par l'existence de deux escarpements rocheux séparés par un plateau, hérités du mode d'exploitation de l'ancienne carrière (Photo 5).

Photo 5 : Le modelé topographique du site de Mermoz (Gueye, juillet 2002)

L'escarpement inférieur, subvertical, se situe à une côte moyenne de 1,5 m du niveau inférieur des marées. Il est constamment battu par les vagues, surtout en marée haute.

Le plateau qui représente l'essentiel du site, est une vaste zone de remblais reçoit des éboulis de toutes sortes et autres matériaux de comblement venus des niveaux supérieurs, L'escarpement supérieur a une côte de 8 m en moyenne au-dessus du plateau, avec une pente variable en fonction des points d'éboulement ou de l'altération superficielle. La zone nord, avec des éboulements plus importants, présente même un semi-gradin de 3,5 mètres par rapport à l'allure générale du plateau.

Le littoral marin est tapissé de galets pluri décimétriques arrondis par les vagues (Photo 6).

Photo 6 : les sables aquifères de la zone de Mermoz (Gueye, juillet 2002)

4. Les Mamelles

Figure 5 : Localisation des Mamelles

Les principaux faciès rencontrés sont de la base au sommet :

- les dolérites inférieures qui occupent le niveau littoral de la zone nord, altérées en boules grossières,
- les sables ocres, aquifères dites « infra basaltiques»,

Ces trois faciès forment le premier escarpement

- les basaltes en prismes du premier épisode des Mamelles, altérés à leur sommet,
- la dolérite du deuxième épisode des Mamelles : elle est disposée en plaquettes sur quatre mètres, se prisme ensuite sur deux mètres, et se termine par un sommet altéré en boules et en argile et latérite sur les deux mètres supérieurs.

Ces deux faciès forment le front de taille supérieur.

Photo 7 : Front ouest du phare des Mamelles

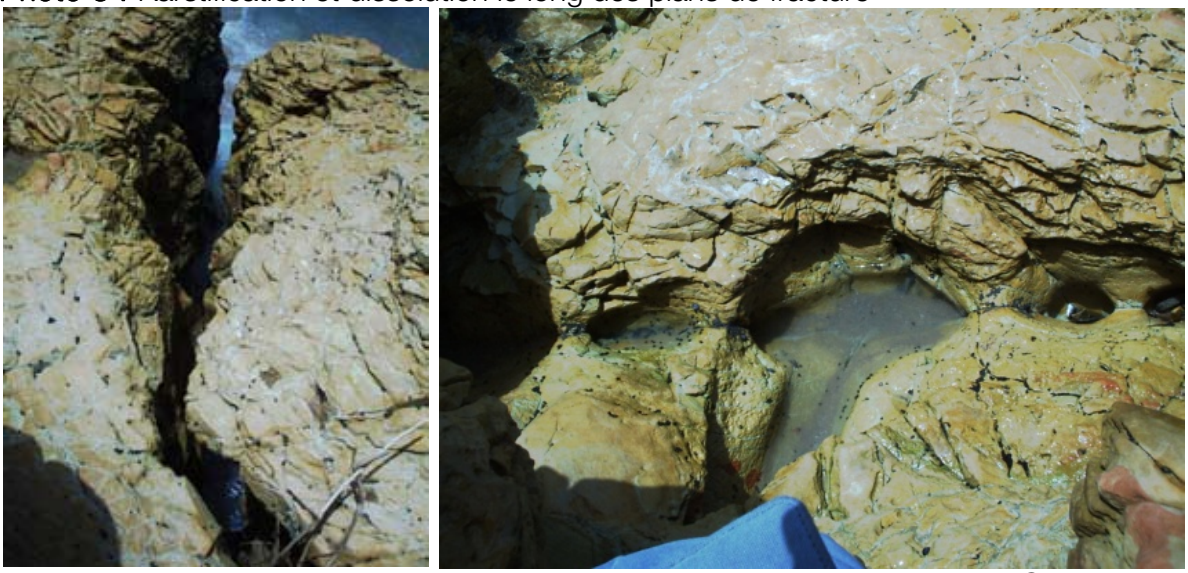
Lo, juin 2003

2.3 HYDROLOGIE ET HYDROGÉOLOGIE

La détermination du rôle de l´eau dans le déclenchement et l´évolution des mouvements de terrain sur le littoral dakarois est fondamentale. La connaissance de l´hydrogéologie et de l´hydrologie des secteurs présentant des instabilités est donc primordiale. Elle devrait permettre de diminuer l´impact de l´eau sur les mouvements de terrain. Cette connaissance hydrologique est notamment prise en compte pour la définition de l´aléa mouvements de terrain.

L ´eau est un facteur d'érosion essentiel sur le littoral dakarois de par ses actions chimiques et physiques qui provoquent la dégradation de la roche et modifie ses propriétés (Photo 8).

Photo 8 : Karstification et dissolution le long des plans de fracture



Gueye, 2005

Son action mécanique qui est par contre rapide, brutale et discontinue dans le temps (liée à la pluviométrie).

Durant la saison humide, les eaux de ruissellement venant des zones plus élevées se déversent vers la côte en suivant des zones bien identifiées au sein desquelles elles provoquent de vastes entailles et des ravinements.

Le long de la côte dakaroise plusieurs types de venues d´eau ont été identifiées :

- les venues d´eau naturelles correspondent aux suintements, aux sources ;
- les venues d´eau anthropiques correspondant aux rejets des eaux usées, aux canalisations débouchant sur le milieu naturel et aux fuites de réseaux.

Il faut noter la présence parfois d'une nappe souterraine à faible profondeur sous le plateau, comme en témoigne la fréquence des palmiers de type Elaieis guinéensis au niveau de la carrière de Mermoz (Photo 6). En effet, les sables ocres dits « infrabasaltiques » qui affleurent sur le littoral constituent un grand aquifère côtier autrefois très exploité. La nappe des sables ocres est alimentée en partie par les eaux pluviales qui s'infiltrent à travers les cassures et failles des roches volcaniques sus – jacentes.

La fluctuation du niveau de cette nappe est très importante entre la saison sèche et la saison des pluies. Du coté littoral, elle est contaminée par la remontée des eaux marines durant la période des hautes eaux. Il faut noter que la fluctuation du niveau piézométrique de cette nappe a été bien étudiée, en relation avec le niveau de la marée.

Les activités humaines avoisinantes déversent dans le site d'importantes masses d'eaux domestiques usées, en particulier au niveau de la porte du millénaire (Photo 9).

Photo 9 : Rejets d´eau usée domestique (Porte du Millénaire)

Gueye, 2005

2.4 LES AGENTS D´ÉROSION OCÉANIQUE

1. La marée, les houles et courants de houle

Le littoral dakarois reçoit des houles de forte amplitude. Ceci est du à sa situation géographique, à l´orientation de la côte par rapport aux houles dominantes NW et au fort gradient topographique de la forme de la plate-forme continentale interne (Fig. 6).

Le milieu étudié est marqué par un domaine marin très actif sur ses fronts est et ouest avec houles de direction nord-ouest et sud-ouest. Les houles de direction sud-ouest engendrent des énergies de l´ordre de 18 kW.m-1 de crête de houle. Cependant il faut noter que l´énergie se concentre au niveau des pointes et des caps alors que les plages et baies ne sont soumises qu´à de faibles énergies.

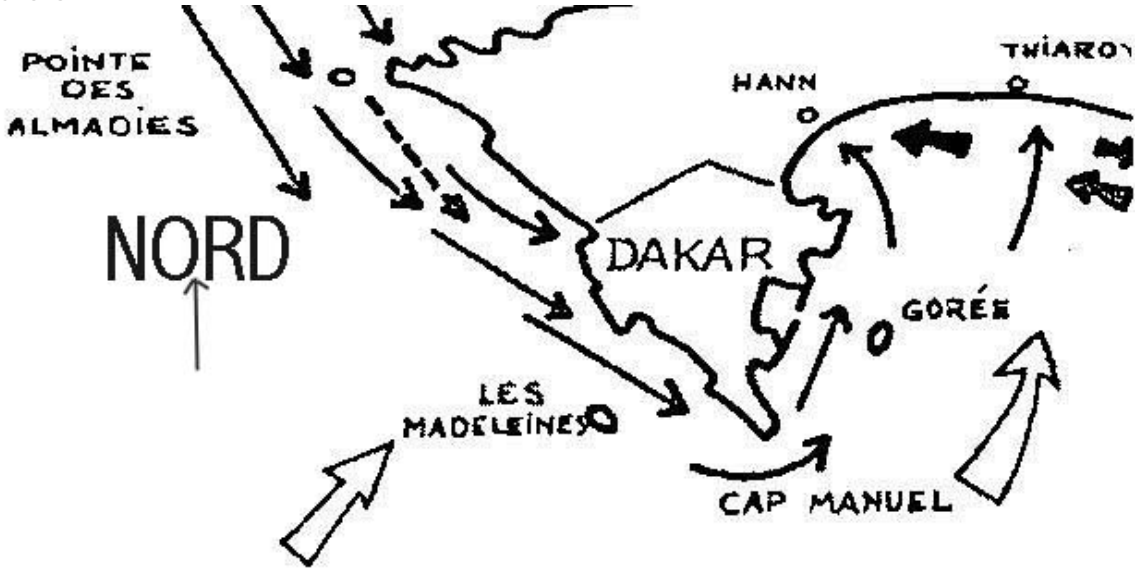
Les houles de Nord Ouest, issues de l'Atlantique nord, présentes toute l'année. Ces houles, fortes sur la côte nord, arrivent affaiblies sur la côte sud, suite à une série de diffractions autour de différents points de la presqu'île du Cap Vert (Almadies, pointe de Fann, Cap Manuel) (Riffault, 1980).

Les houles de Sud Ouest, issues de l'Atlantique sud, ne sont présentes que de juillet à octobre. Selon Nardari (1993), ces houles engendrent des énergies de l'ordre de 6 à 10 kW.m-1 de crête de houle.

Des houles d'ouest exceptionnelles ont été signalées par Nardari (1993). Elles se produisent en général entre octobre et novembre et seraient générées par des cyclones dans la mer des Caraïbes. Ces houles sont très énergétiques (puissance de l'ordre de 15 kW.m-1).

Le rôle de la marée est donc négligeable sur le transport de sédiments. En revanche le fort marnage de la Corniche ouest qui entraîne le battement des marées, joue un rôle important dans la fragilisation et la mise en mouvement des matériaux de la zone intertidale, notamment lorsque ces variations de hauteurs d´eau sont combinées avec d´autres facteurs tels que la houle et le vent.

Figure 6 : La direction des houles sur le littoral de Dakar



Nardari, 1993

Tableau 1 : Caractéristiques des houles

Direction	Période	Hauteur	Longueur d'onde	Puissance
NW(N320 à 20°E)	6.3 s	1.67m	62m	18 kW.m-1
SW(N180 à 230°E)	5.7 s	1.49m	51m	11 kW.m-1
W(N260 à 270°E)	6.8 s	1.80m	73m	22.7 kW.m-1

2. Les marées et le niveau de la mer

Au Sénégal, les marées sont de type semi-diurne avec des marnages moyens variant entre 1,2 et 1,6 m en marée de vive eau et entre 0,5 et 0,6 m (Domain, 1976 ; Rebert, 1983) en marée de morte eau. Les courants de marée sont faibles, de vitesse inférieure à 0,15 m.s-1 Enfin, il a été possible d'établir un taux d'élévation du niveau marin de 1,4 mm par an (Elouard et al., 1977 ; Emery et Aubrey, 1991). Ce taux est du même ordre de grandeur que celui considéré comme représentant le taux moyen d'élévation du niveau marin pour le dernier siècle, qui est compris entre 1 et 2 mm par an.

2.5 VÉGÉTATION

Les végétaux naturels sur les sites sont :

- des plantes herbacées sèches
- des palmiers qui puisent l'eau de la nappe superficielle (Photo 10).

Il se développe dans la partie sud une végétation anthropophile avec des vergers à la faveur des eaux usées et d'un sol fertile d'origine volcanique.

Photo 10 : Couvert végétal de la carrière de Mermoz

Gueye, juillet 2002

2.6 CONTEXTE MORPHO-GÉOLOGIQUE

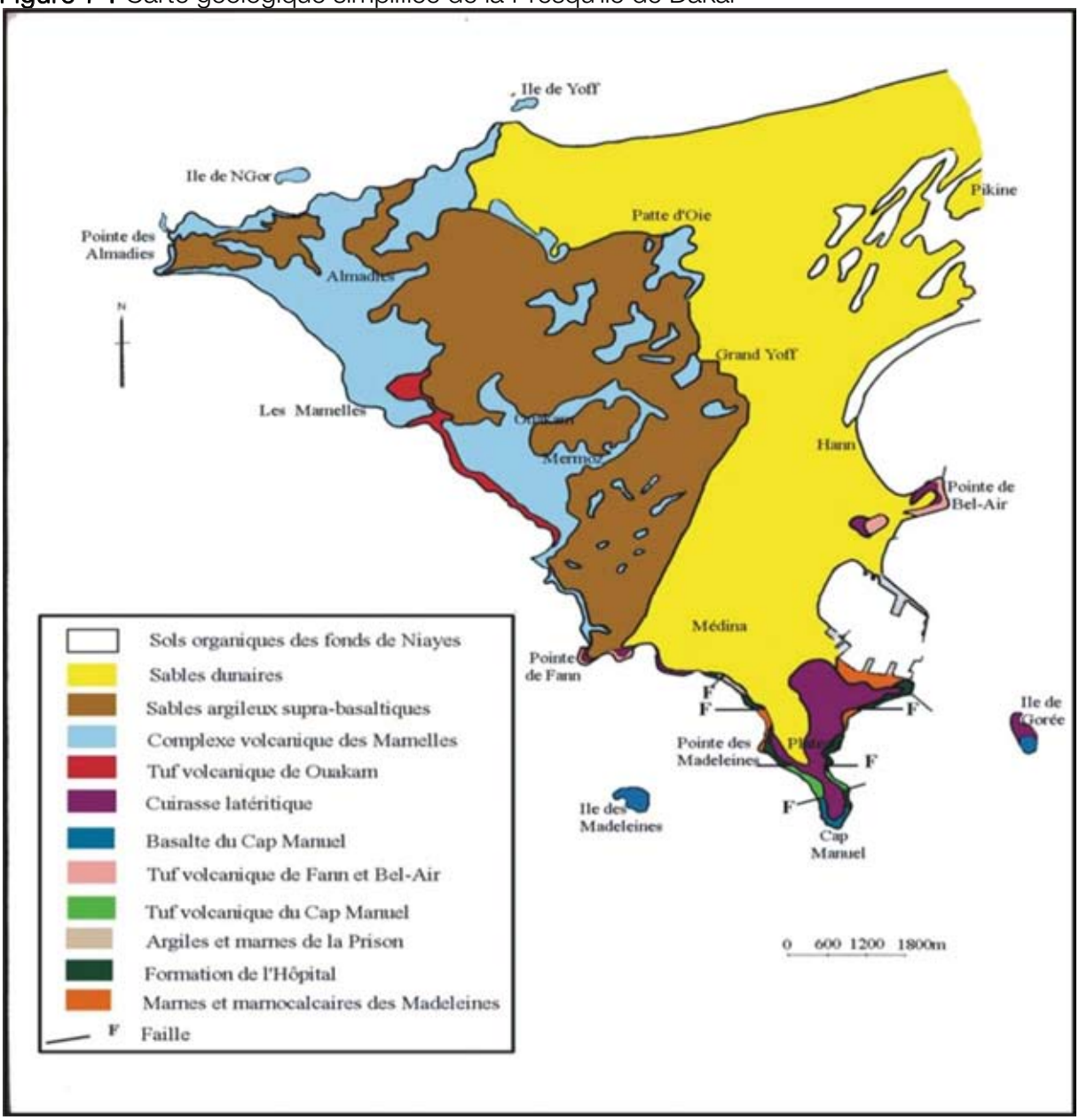
Cadre géologique

Le littoral dakarois présente une grande diversité et une grande richesse du patrimoine géologique qui ont été mis en valeur par une cartographie simplifiée (Fig. 7).
L´approche géologique met en valeur la présence de roches altérées qui jouent un rôle essentiel dans le recul du trait de côte.

1. Géologie du littoral

Le Bassin sédimentaire sénégalais constitue un segment du Bassin sénégalo-mauritano-guinéen, vaste bassin côtier de marge continentale passive. Appuyé sur le Craton Ouest-Africain, le bassin côtier accumule une puissante série sédimentaire, d'origine principalement marine, qui débute au Trias-Lias et se termine au Miocène. La puissance des dépôts augmente rapidement, pour atteindre, à Dakar, des puissances de plus de 6 à 7000 m. Malgré le caractère subhorizontal des couches, les données pétrolières indiquent une forte structuration et une importante compartimentation des dépôts, dont le Horst de NDiass donne un aperçu.

Figure 7 : Carte géologique simplifiée de la Presqu´ile de Dakar



Les séries cénozoïques sont plus largement représentées à l'affleurement, exposées dans les falaises côtières de la tête de la presqu'île du Cap-Vert (Dakar) et aussi dans la cuesta localisée à l'ouest et au sud de Thiès. On définit plusieurs types de formations :

- Formation de la Madeleine

Dans la falaise de la Pointe Diop, les faciès deviennent argilo-marneux et affleurent sur une dizaine de mètres de puissance, montrant le passage de marnes et argiles bariolées à grises (6,5 m), à des marnes et calcaires argileux noirs (1 m), puis des argiles noires et calcaires gris (1,70 m).

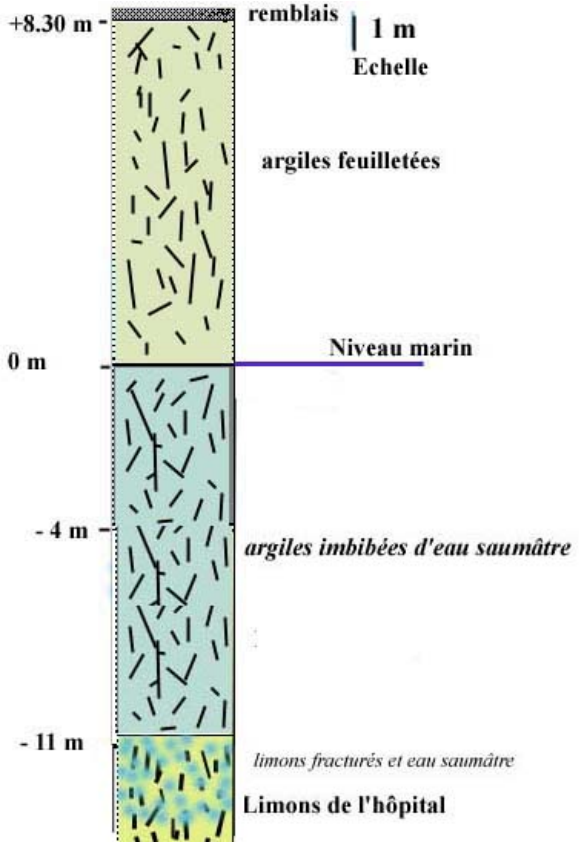
Figure 8 : Géologie de la Pointe des Madeleines

A l'affleurement, dans la petite falaise de la Plage de Reubeuss, une autre unité vient progressivement relayer les argiles de la Formation de l'Hôpital sans discontinuité apparente. Les dépôts, puissants au maximum d'une dizaine de mètres seulement, se composent d'argile feuilletée à attapulgite, un peu sableuse (Fig. 8, Fig. 9 et photo 11).

Photo 11 : Affleurement à attapulgite de la prison (formation de Rebeuss)

Lo, Avril 2004

Figure 9 : Log stratigraphique des formations de Rebeuss



- Les formations volcaniques

Elles sont représentées par des coulées de basanite et de néphélinite au Cap Manuel et à la Pointe de Fann. Elles se présentent en sill à l'Anse des Madeleines et en tufs à Bel Air et au Cap Manuel. A la pointe de Fann, ces roches sont surmontées par une cuirasse latéritique sur laquelle reposent les roches volcaniques pléistocènes des Mamelles. Cette superposition est à l'origine de la distinction entre les dépôts volcaniques « tertiaires » et « quaternaires » de Dakar.

Ensemble volcanique de Cap Manuel et de l'île de Gorée
L'ensemble volcanique du Cap Manuel est constitué de tufs et de lave. Le contact entre ces deux unités n'a pas été vu sur le terrain. Les laves reposent sur la Formation de l'Hôpital et les tufs englobent de nombreux fragments de calcaires à lépidocyclines.

- Tufs volcaniques

  - Les tufs volcaniques du Cap Manuel

Les tufs séparent les limons de l´Hôpital au Nord des basaltes du Cap Manuel au sud. Les tufs de couleur jaune-vert à brun verdâtre et constitués de grain fins et hétérogènes. On remarque un passage latéral de faciès à grain fins vers les faciès à grain grossier. Les tufs volcaniques du Cap Manuel affleurent au nord de la coulée de néphélinite à mélilite du côté de l'Anse Bernard et de l'Anse Madeleine. Ils forment le col qui relie le cap Manuel à la ville de Dakar et ils y sont recouverts par une cuirasse latéritique épaisse de 2 à 4 m. Les tufs sont composés d'une masse argileuse jaune-verdâtre, friable et peu cohérente, nettement stratifiée et granoclassée, mais avec des pendages variables et quelquefois redressés à la verticale. Ils renferment des fragments anguleux de marno-calcaires, des silex ainsi que de

rares (<5%) éléments de basalte aphyriques de taille inférieure au décimètre et généralement anguleux.

- Coulée de basanite

Cette coulée occupe toute la partie méridionale du Cap Manuel. Elle forme un plateau large de 450 m d'est, en ouest et long de 600 m dans le sens nord-sud et qui culmine à 35 m d'altitude. L'ensemble est limité par des falaises découpées en petits fjords avec des orgues basaltiques. Il est recouvert par une croûte latéritique. La coulée est limitée au nord par les sédiments oligo-miocènes et les tufs volcaniques.

- Basaltes du Cap Manuel

Ces basaltes apparaissent sus forme de prisme (25 à 35 mètres de hauteur). Les prismes sont souvent polygonaux et ne laissent pas d´ espaces entre eux. Cette organisation géologique sur ce littoral provoque plusieurs conséquences en termes de risques.

- Le volcanisme des Mamelles

Les coulées du volcan des Mamelles surmontent les sables aquifères «infrabasaltiques», réputés pléistocènes. L'ensemble volcanique supérieur, au sommet des sables, correspond au volcan des Mamelles et aux coulées qui en sont issues. Il affleure largement, mais peut être localement recouvert par des sables dunaires récents.
Le volcan des Mamelles, seul centre volcanique important de Dakar, est un appareil polygénique édifié au cours de plusieurs phases d'activité de dynamisme différent. Les falaises en bord de mer l'entaillent largement.

- Coulées de hawaiite à texture microlitique

Ces coulées couvrent l'essentiel de la partie occidentale de la carte de Dakar, de la pointe de Fann aux Almadies et y forment une grande part des falaises en bord de mer. Elles ont été alimentées pour l'essentiel à partir du point d'émission des Mamelles.

- Coulée de hawaiite à texture scoriacée

Une lave scoriacée noire affleure en bordure du versant nord de la Mamelle occidentale, près du bord du cratère où elle se trouve recouverte partiellement par des scories rouges vacuolaires.

- Tuf volcaniques lités

Cette formation qui surmonte les sables infrabasaltiques (anciennes dunes littorales) le long de la côte, représente le premier terme de l'activité éruptive du volcan des Mamelles sur lequel se sont répandues ensuite les coulées de lave. Les tufs se présentent en couches stratifiées, faiblement inclinées avec des bancs d'épaisseur, de granulométrie et de composition variable (Photo 12).

- Projections scoriacées rouges

Ces scories constituent l'essentiel de la Mamelle occidentale et sont recouvertes à l'est par une coulée hawaiitique. Les scories sont très friables et renferment de nombreuses bombes et filons laviques ainsi que des fragments de roches sédimentaires. Des niveaux à scories rouges de faible épaisseur apparaissent aussi le long de la côte entre les différentes coulées des Mamelles.

Photo 12 : Tufs lités recoupés par des fractures (façade occidentale du phare des Mamelles)

Gueye, Juin 2003

2. Classification géologique de la côte dakaroise et mode de dégradation

La géologie de la côte est un paramètre essentiel pour la compréhension des instabilités côtières. Une typologie du littoral a été effectuée afin de comprendre ces processus d´érosion. Aux quatre types géologiques ainsi définis, ont été associés des types d´instabilités.

Le littoral peut être subdivisé en différentes zones, selon le comportement mécanique des roches et leur mode de dégradation. Différents types ont été ainsi différenciés à partir d´une approche géologique et ont notamment servi de base à la cartographie de l´aléa mouvement de terrain :

- Type 1 : stratification horizontale ou subhorizontale avec couverture de sédiments récents et altérites de faible épaisseur (Pointe des Madeleines) (Photo 13);
- Type 2 : stratification déformée et meubles avec couverture récente et altérites (Plage Pasteur) ;
- Type 3 : roches dures avec couverture récente et altérites (Cap Manuel, Mermoz) ;
- Type 4 : roches dures basculées (Mamelles, Mermoz) (Photo 14) ;

Photo 13 : Falaise limoneuse de la porte du Millénaire
Gueye, 2005

Photo 14 : Ouverture des fractures et basculement des blocs dans la carrière de Mermoz

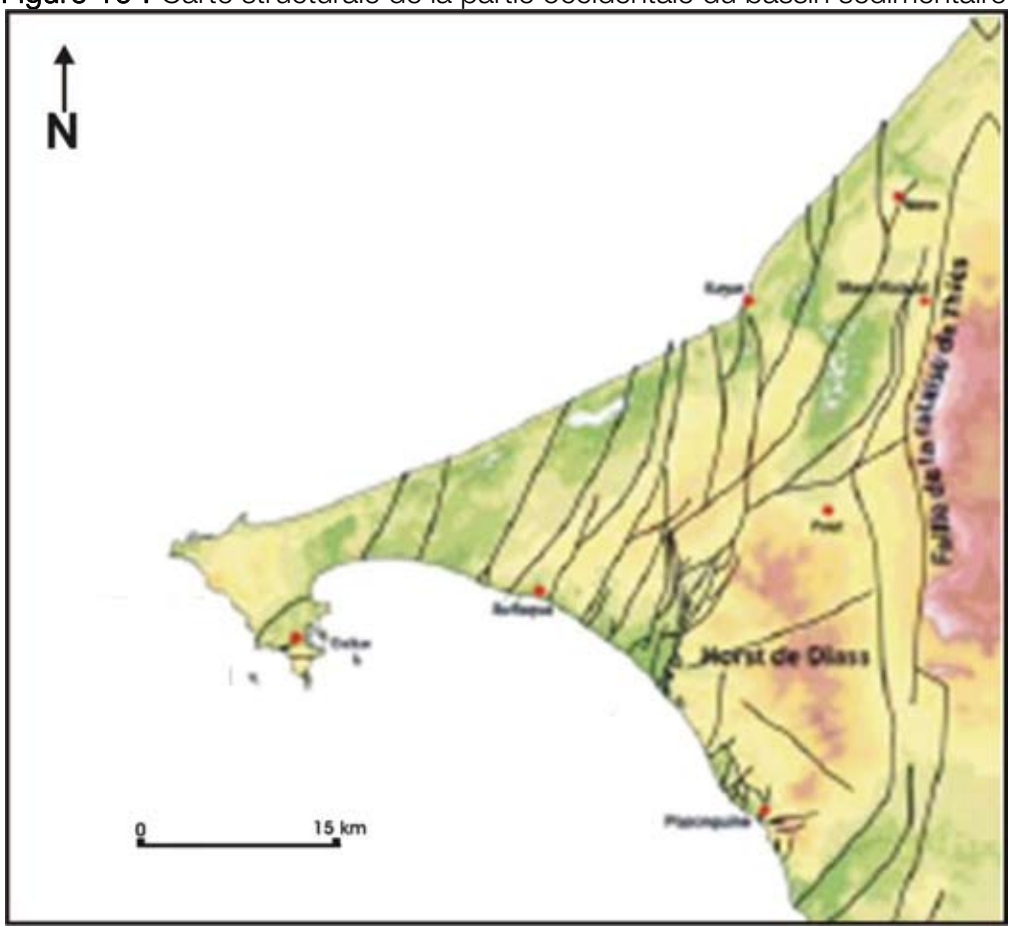
Gueye, juillet 2002

A partir de cette typologie géologique générale de la côte, des variantes ont été ajoutées en tenant compte de l´épaisseur des formations géologiques, du pendage de la stratification, de la fracturation et de la présence ou absence de plage.
Différents types d´instabilités de la côte ont également été associées à cette typologie.

3. Cadre structural

Le schéma structural (Fig. 10) de la partie occidentale du bassin sédimentaire sénégalais permet d'illustrer plusieurs domaines. Il fait apparaître un dense réseau de failles subméridiennes à l'est de la presqu'île du Cap-Vert (Failles du Graben de Rufisque). A l'est de ce réseau d'accidents s'individualise le Horst de Diass, limité sur sa bordure orientale par la Faille de la falaise de Thiès. Il faut noter que la structuration du Horst de Diass est très sous-estimée, en raison du recouvrement latéritique qui masque les accidents.

Figure 10 : Carte structurale de la partie occidentale du bassin sédimentaire sénégalais



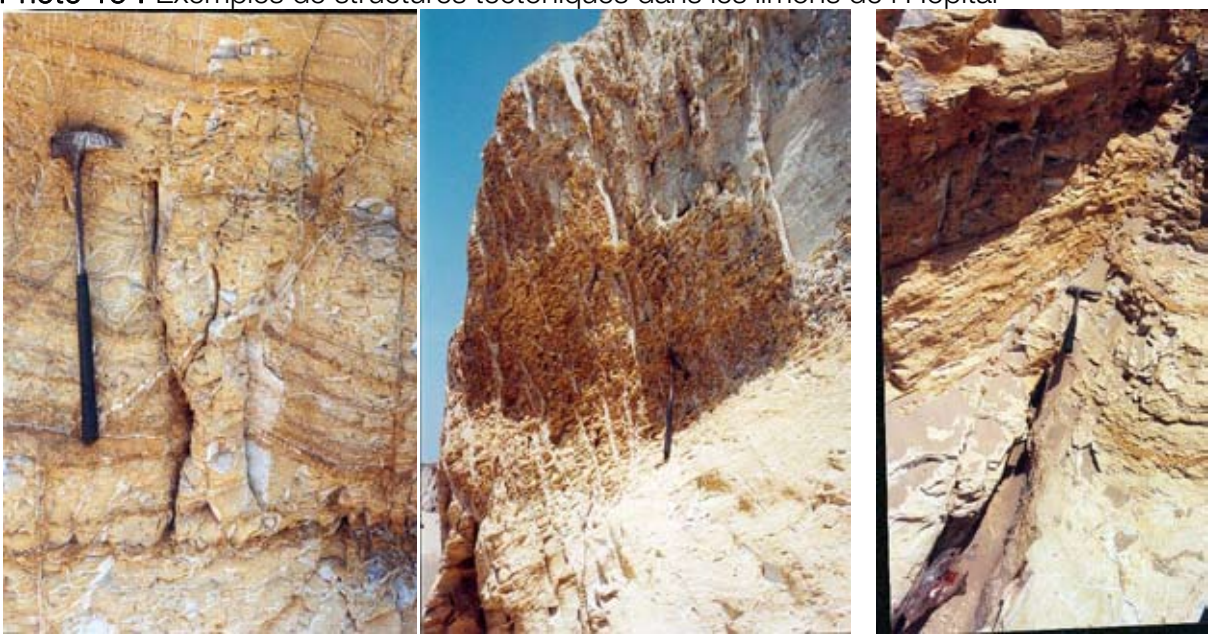
Au niveau de la presqu'île de Dakar et du Graben de Rufisque de nombreux compartiments faillés jouent de manière complexe au cours du temps et contrôlent le volume de sédiments accumulés sur la marge. Au niveau de ce système complexe, il semble que l'on enregistre au cours du temps un déplacement de l'est vers l'ouest de l'activité synsédimentaire des failles.

- Le cadre structural et tectonique : exemple de la Pointe des Madeleines

Une analyse de la photographie aérienne de la zone étudiée révèle la présence de fractures orientées E – W et sécantes à la côte.
Sur le terrain ces fractures sont bien visibles (Photo 15, Photo 16 et Fig. 11), par exemple au niveau de la limite nord du site, avec un contact anormal entre des brèches volcaniques et les sables ocres.

De plus, de nombreuses failles aussi bien sur l'escarpement inférieur que sur le front de taille supérieur sont en continuité les uns avec les autres par l'intermédiaire de fissures et de zones effondrées : ces zones sont bien marquées par les lignes préférentielles de passages des ruissellements, facilement identifiables par les ravinements et la végétation abondante.

Photo 15 : Exemples de structures tectoniques dans les limons de l'Hôpital



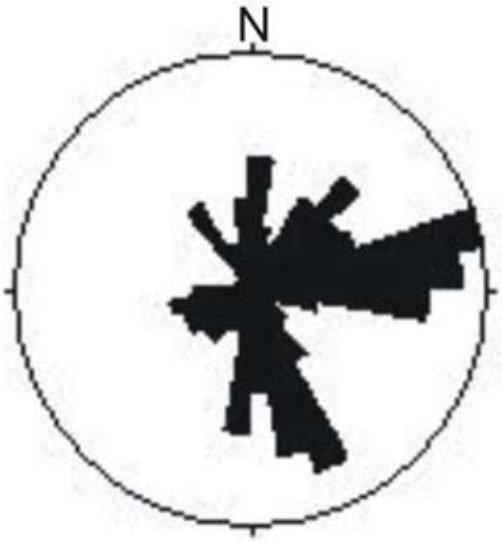
Microfailles	Joints colmatés par la calcite	Joints ouverts

Gueye, Mai 2001

Photo 16 : Zone supérieure bréchifiée des limons

Gueye, Mai 2001

Figure 11 : La rosace de direction des fractures mesurées dans la Pointe des Madeleines montre la présence de fractures dominantes ENE-WSW et NNW-SSW



- La zone volcanique

Le cadre structural et les failles notées ci – dessus sont la conséquence des mouvements successifs du secteur lors de la mise en place des épisodes volcaniques des Mamelles et de Mermoz, dont le plus récent a eu lieu précisément au nord de la limite du site, sur la Pointe de Mermoz.

III. APPROCHE METHODOLOGIQUE

L´étude repose sur plusieurs disciplines complémentaires :

- Détermination de la nature lithologique et morphologique des falaises:
  - Reconnaissance des instabilités
  - érosion
  - caractérisation des mécanismes
  - proposition d´une typologie

L´approche géologique consiste à définir la morphologie côtière, (typologie), l´évolution géomorphologique du littoral et la dynamique de recul du trait de côte (érosion différentielle).

Le rôle de l´eau dans les instabilités côtières étant essentiel, on a essayé de mettre en évidence les processus hydrologiques et hydrogéologiques dans l'érosion côtière et notamment l´influence des venues d´eau naturelles et artificielles sur le littoral.
L´étude géotechnique a permis de définir et de cartographier l´aléa « mouvement de terrain » sur le littoral. Il est également prévu de proposer des recommandations concernant les parades susceptibles de réduire cet aléa.
Les changements climatiques pourraient jouer un rôle avec l'élévation du niveau marin ; avec l'augmentation de la fréquence et de la violence des tempêtes, une hausse moyenne de 50 cm est prévue, pour l'ensemble des littoraux, au XXIe siècle.

- Qualification de l´aléa et hiérarchisation des risques à partir d´un inventaire des enjeux ;
- Proposition d´aménagements et caractérisation de l´érosion

3.1 TECHNIQUES DE COLLECTE DES DONNÉES

- Analyses de photo aériennes et de photo satellites,
- levés pétrologiques et stratigraphiques,
- sondages et traînées géophysiques,
- analyses structurales,
- analyse géodynamique,
- analyse environnementale.

1. La géophysique : Les sondages et le traîné électriques

a. Principes de base

Dans le cadre des études géophysiques nous avons utilisé exclusivement la méthode de prospection électrique en courant continu avec le dispositif Schlumberger. La longueur de ligne de courant maximum tirée est de 300 m, ce qui permet d'atteindre une profondeur d'investigation de 25 m à 75 m suivant les valeurs de résistivité moyenne de la zone.

- Le sondage électrique

Un sondage électrique consiste à établir la courbe de variation de la résistivité apparente du sous-sol en fonction de la longueur de ligne de courant injecté, grâce à un dispositif quadripôle AMNB en surface.
La profondeur d'investigation est proportionnelle à la distance entre les électrodes d'injection A et B

Le dispositif de mesure choisi est du type Schlumberger c'est-à-dire de rapport AB/MN maintenu élevé (4<AB/MN<20).
Dans ce cas, la résistivité apparente Ro s'exprime par la formule :

$$Ro = K.V/I \quad ohm.m$$

V: différence de potentiel entre M et N
I : intensité de courant injecté
K : coefficient géométrique, dépend des dimensions du dispositif de mesure
($K = \pi.AM.AN/MN$).

La profondeur d'investigation est comprise entre AB/4 et AB/12.
L'interprétation des sondages électriques permet d'obtenir la résistivité vraie des formations et leurs épaisseurs, dans le cas idéal de couches homogènes de faible pendage. Nous avons initialement utilisé un programme d'inversion pour sortir un modèle de départ que nous améliorons avec le programme d'interprétation des sondages électriques PISE4 élaboré par l'ORSTOM et le CNRS, France.
La résistivité électrique des roches saturées à conductibilité électrolytique est fonction décroissante :

- de la porosité totale communicante ;
- de la conductibilité de l'eau d'imbibition.

Les aquifères de résistivité inférieure à 5 ohm.m sont non potables. Entre 5 et 10 ohm.m l'eau est dite saumâtre et potable au-delà de 10 ohm.m.

- Le traîné de résistivité électrique

Un traîné de résistivité électrique est un profil qui donne pour des stations alignées et régulièrement espacées, la résistivité apparente mesurée à l'aide d'un quadripôle AMNB de longueur constante. Il met donc en évidence les variations latérales de la résistivité pour une certaine profondeur d'investigation.
Un traîné de résistivité est souvent rectiligne et symétrique, réalisé en déplaçant les lignes AB et MN d'une mesure à l'autre.

b. Matériel utilisé

- **Matériel électrique**

Les équipements sont constitués des éléments suivants :
01 résistivimètre TERRAMETER SAS 300C Abem (Photo 17)
01 survolteur BOOSTER SAS 2000 Abem
04 accumulateurs de 12V au Ni-Cd
01 panneau solaire
02 rouleaux de câbles d'injection AB de 700 m
02 rouleaux de câble de réception MN de 300 m
04 chargeurs de batteries Abem
01 multimètre
20 électrodes en acier inoxydable
04 masses de 3 kg
02 téléphones de chantier
En vue de diminuer les résistances de prise, une solution d'eau salée est utilisée systématiquement pour arroser les contacts sol-électrodes.

- **Matériel d'appui logistique**

01 véhicule 4X4 Mitsubishi double cabine
01 ordinateur portable

Photo 17 : Mesures géophysiques : résistivimètre

Lo, Mai 2001

2. Les mesures tectoniques et structurales

a. Généralités

L´analyse tectonique que nous avons mené a porté sur l´étude de la fracturation au niveau des différents sites. L'objectif principal de l'étude structurale est de caractériser la fracturation et de définir l´agencement structural.
Les objectifs spécifiques sont de :

- discriminer les différentes familles de joints et d'évaluer leur variabilité spatiale sur l'ensemble du littoral;
- déterminer les caractéristiques géométriques de chaque famille (espacement, longueur);
- établir un lien entre la fracturation et les instabilités notées.

L´étude que nous proposons a pour objectif d´estimer quantitativement le réseau de fractures à partir de l´analyse directe des données de surface.

b. Méthodologie et levés de terrain

Utilisation de méthodes d´analyse de la fracturation basée sur un aspect statistique. La méthode utilisée comporte deux étapes :

- une étude linéamentaire basée sur l´analyse des photos aériennes ;
- une analyse quantitative des différents systèmes de fractures saisies à partir des données de terrain. Les paramètres tectoniques qui interviennent dans cette étude sont les suivants:
- la nature des fractures (diaclases, joints….)
- la taille des fractures (majeures, moyennes, mineures)
- la fréquence des fractures: chaque système de fracture a sa propre fréquence.

c. Etude linéamentaire

Cette étude est basée essentiellement sur une interprétation des images photogéologiques des sites identifiés. L'examen des photos aériennes aux échelles 1/5000 et 1/10000 a mis en évidence les directions majeures des linéaments.

d. Levés de terrain

Les observations de terrain se divisent en deux types : l'examen visuel et les levés structuraux. Afin de discriminer les différentes familles de joints et de déterminer leurs caractéristiques, deux méthodes de collectes de données, dans les levés structuraux, ont été préconisées en fonction des conditions de terrain : la méthode linéaire systématique et la méthode aléatoire.
La méthode linéaire systématique consiste en une collecte de données sur un plan d'observation gradué, le long duquel l'orientation de tous les joints est mesurée (direction/pendage). Pour chacun de ces joints, la longueur ainsi que les caractéristiques des extrémités ont aussi été notées. La méthode linéaire systématique a été préconisée tout au long de l'étude du fait qu'elle permet d'obtenir des données quantitatives qui seront évaluées statistiquement.

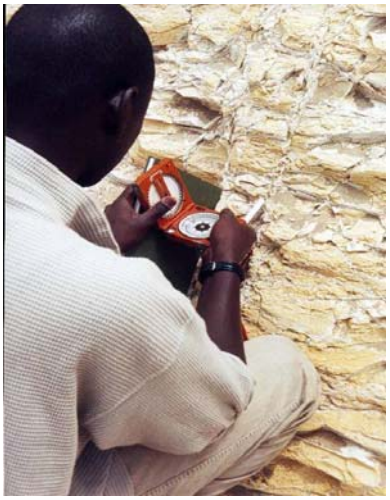
Par contre, lorsque les conditions de terrain ne le permettaient pas (qualité de la surface variable), la méthode aléatoire s'est imposée. Cette dernière consiste en la prise aléatoire de fractures sans en noter les caractéristiques. Bien que cette méthode ne soit pas aussi rigoureuse et ne fournit pas beaucoup d'informations sur l'espacement et la densité des fractures, elle fournit tout de même un contrôle structural régional. De plus cette méthode a seulement été utilisée sur des affleurements en très mauvaises conditions.

Levés systématiques

Un nombre d'environ 380 joints ont été caractérisés dans chaque station (Photo 18). Lors des levés systématiques les caractéristiques suivantes ont été notées :

- Direction et pendage des joints
- Direction et pendage de la stratification
- Longueur : longueur du joint
- Surface : rugueuse ou lisse (n'a pas été noté systématiquement)
- Remplissage.

Photo 18 : Mesures des structures avec une boussole
Lo, Mai 2001



e. Techniques de collecte des données

Dans le cadre de cette étude, outre une observation méthodique des structures (qui sont généralement des lignes et des plans), il s'agit également de les situer les uns par rapport aux autres, mais aussi globalement par rapport à un repère fixe. Autrement dit, il s'agit de les situer spatialement (orienter) et de les estimer qualitativement (type) et quantitativement (nombre). Dans cette optique l'emploi d'un certain nombre de techniques et d'outils s'avère nécessaires.
C'est ainsi que pour plus de rapidité et de précision, le logiciel StereoNett a été utilisé.

La technique de la méthode circulaire

Cette technique très pratique permet de calculer le taux (ou densité) de fracturation dans une station donnée. Le principe consiste à tracer un cercle de diamètre connu (généralement inférieur à 3m) sur la surface d'un affleurement dont la trace des fractures apparaît. Le cercle peut être tracé à l'aide d'un morceau de craie attaché au bout d'un fil. Puis l'orientation et la longueur de chaque trace de fracture à l'intérieur du cercle sont mesurées et reportées. Pour une bonne étude, il faut veiller à ce qu'un joint ne soit pas mesuré plus d'une fois.
La densité de fracture notée ρf sera donnée par la relation :

$$\rho f = L / \pi \times r 2$$

avec L = longueur cumulée de toutes les fractures; r = rayon du cercle.
La densité de fracture s'exprime en unité de longueur sur une aire (c'est à dire cm/cm2, m/m2, km/km2, etc.)

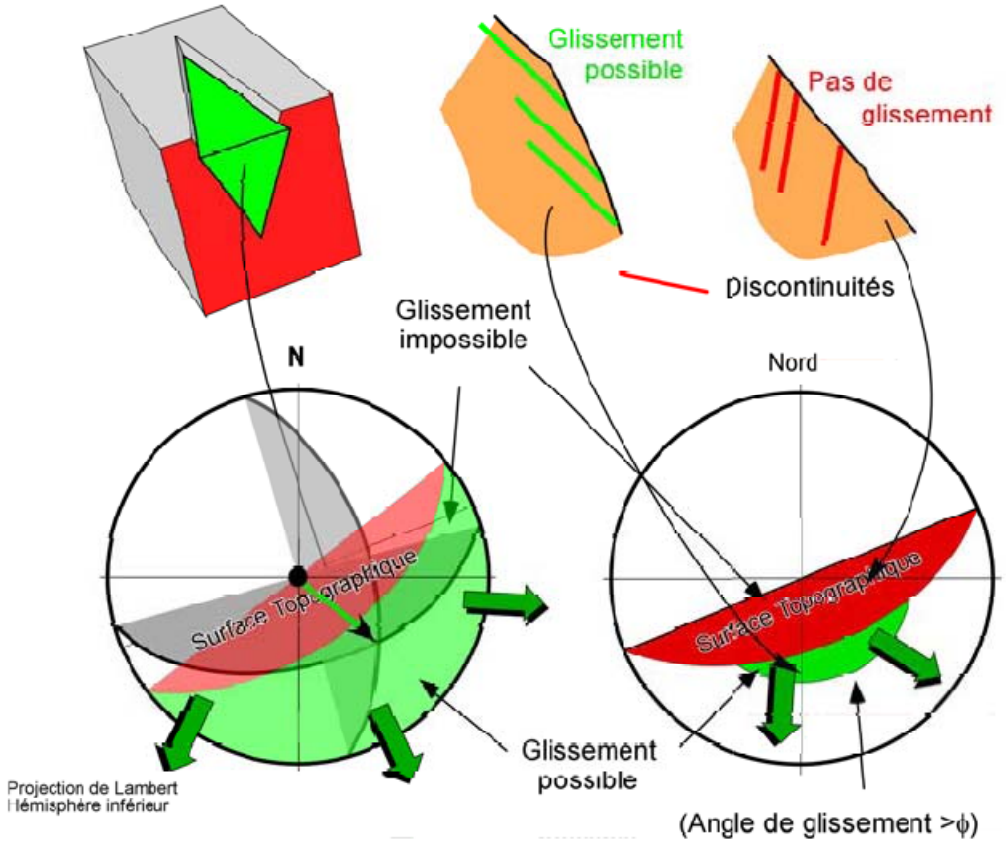
f. Traitement statistique des données et résultats

Evaluation statistique des données sur les joints

Les discontinuités peuvent être regroupées en familles aux caractéristiques structurales et géomécaniques semblables, qui définissent ainsi l'agencement structural de la falaise (Fig. 12).

Les fractures (joints, diaclases) seront, dans cette étude, représentées sur des rosaces de direction, puisque les pendages sont la plupart du temps verticaux et que cette représentation permet une appréciation visuelle de qualité supérieure des données directionnelles.

Figure 12 : Agencement structural : illustration des conditions de glissement



IV. L´EVOLUTION DU TRAIT DE COTE

4.1 MÉTHODOLOGIE

La cartographie de l'évolution du trait de côte sur la presqu'île de Dakar a été réalisée à travers une étude diachronique. La position de ce trait de côte a ainsi été repérée à différentes dates, afin de définir une tendance à l'érosion ou à la progradation du littoral. Il a été retenu dans le cadre de ce travail, de comparer les trait de côte entre deux dates présentant un intervalle de temps assez important, ce, du fait de la nature rocheuse du littoral de la presqu'île de Dakar. La technique utilisée est exposée dans cette partie de notre étude.

1. Choix des supports

Trois supports images ont été utilisés pour cette étude :

- Une photo aérienne de Dakar datant de 1942 ;
- Une photo aérienne de Dakar datant de 1966 ;
- Une ortho-photo d'une partie du littoral de la presqu'île de Dakar, datant de 2003.

Les caractéristiques techniques de ces différents supports sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau 2 : caractéristiques techniques des supports

Support	Résolution	Date de prise	Echelle
Photo aérienne de 1942	1,7 m	Avril 1942/janvier 1943	-
Photo aérienne de 1966	1,7 m	Février 1966	1/20 000
Orthophoto de 2003	07 cm	Décembre 2003	1/5000

Ces photos présentent donc un intervalle de temps assez significatif pour nous permettre de quantifier de manière efficiente, l'évolution du trait de côte sur la presqu'île de Dakar.

2. Préparation des supports

Nous avons dans un premier temps procédé au géoréférencement des photographies aériennes de 1942 et de 1966, par rapport à celle de 2003, prise comme référence. Mais compte tenu de la multitude de déformations sur les photos aériennes anciennes d'une part, et de l'écart important entre les résolutions des photos, il a été retenu de géoréférencer séparément trois zones le long du littoral. Il s'agit du Sud au Nord de :

- La zone allant du Cap Manuel à la pointe des abattoirs ;
- La zone allant de la Pointe de Fann à la Pointe Mermoz ;
- La zone des Mamelles.

Le calage de ces secteurs du littoral a été effectué avec une erreur maximale sur le géoréférencement égale à 06 mètres.
Toutes les photos aériennes ont ainsi été projetées dans le système de projection UTM zone 28 Nord et dans l'ellipsoïde WGS 84.

3. Détermination et numérisation du trait de côte

La presqu'île de Dakar présente une côte principalement rocheuse, entrecoupée par endroits de baies. Ce type de côte offre généralement la possibilité de déceler trois traits de côte que sont :

- La limite supérieure des falaises ou crête, qui lorsqu'elle est apparente, demeure le meilleur indicateur de l'évolution du trait de côte ;
- La limite inférieure des falaises ou bas de falaise, qui est certes moins précise que celle suscitée, mais qui rend bien compte de l'évolution du littoral ;
- Enfin la limite entre la crête et le bas des falaises, et qui est idéale dans le cas de la présence d'un niveau lithologique remarquable et continu.

Dans le cadre de notre travail de cartographie, il nous a semblé plus judicieux de retenir la limite inférieure des falaises, dans la mesure où c'est celle qui s'individualise le mieux à l'échelle de nos différents secteurs. S'y ajoute également le fait que la zone de Dakar étant fortement urbanisée, il va sans dire que la densification du bâti a fortement travesti le contour de la limite supérieur des falaises. La rigueur scientifique nous obligeait dès lors de porter notre choix sur la limite inférieure des falaises.

Après détermination de la limite du trait de côte, nous avons procédé à la numérisation du trait de côte sur nos photos à l'échelle 1/1000.
Rappelons que les travaux de calage des photos et de numérisation du trait de côte ont été effectués avec le logiciel de SIG ArcGIS.

4. Traitement des données

Les données obtenues après numérisation ont ensuite été traitées avec l'utilitaire DSAS (Digital Shorelines Analysis System), conformément aux prescriptions issues de l'atelier de cartographie tenu au CSE. Un intervalle de 10m a été retenu pour l'élaboration des transects.

Les valeurs d'évolution du trait de côte obtenues ont servi à construire les courbes d'évolution du trait de côte sur le tableur Excel.
Il convient toutefois de préciser que deux intervalles de temps ont été retenus pour cette étude :

- La période 1942 – 2003 a concerné les zones « Cap Manuel - Pointe des abattoirs » et « Pointe de Fann – Pointe de Mermoz » ;
- La période 1966 – 2003 a concerné la zone des Mamelles.

Enfin, la dernière étape a été la mise en forme des différentes cartes d'évolution du trait de côte, selon le modèle cartographique qui nous a été proposé au cours de l'atelier de cartographie.

5. Résultats obtenus

Les résultats obtenus sont présentés à travers les cartes d'évolution de chaque secteur étudié (Fig. 13 ; Fig. 14 et Fig. 15).

Figure 13 : Evolution sectorielle de la limite inférieure des falaises dans la zone Cap Manuel – Pointe des Abattoirs.

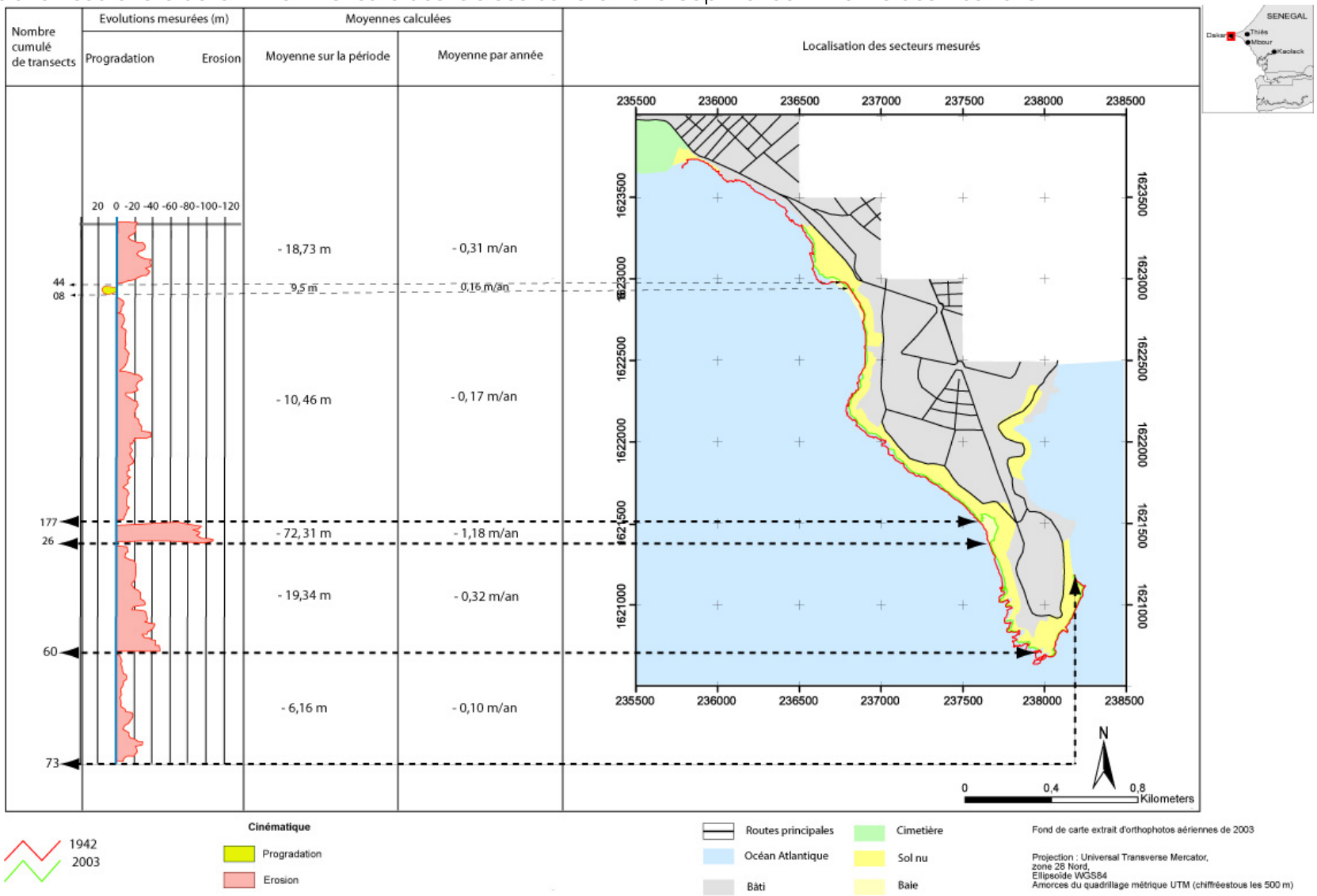


Figure 14 : Evolution sectorielle de la limite inférieure des falaises dans la zone Cap-Manuel – Pointe des Abattoirs.

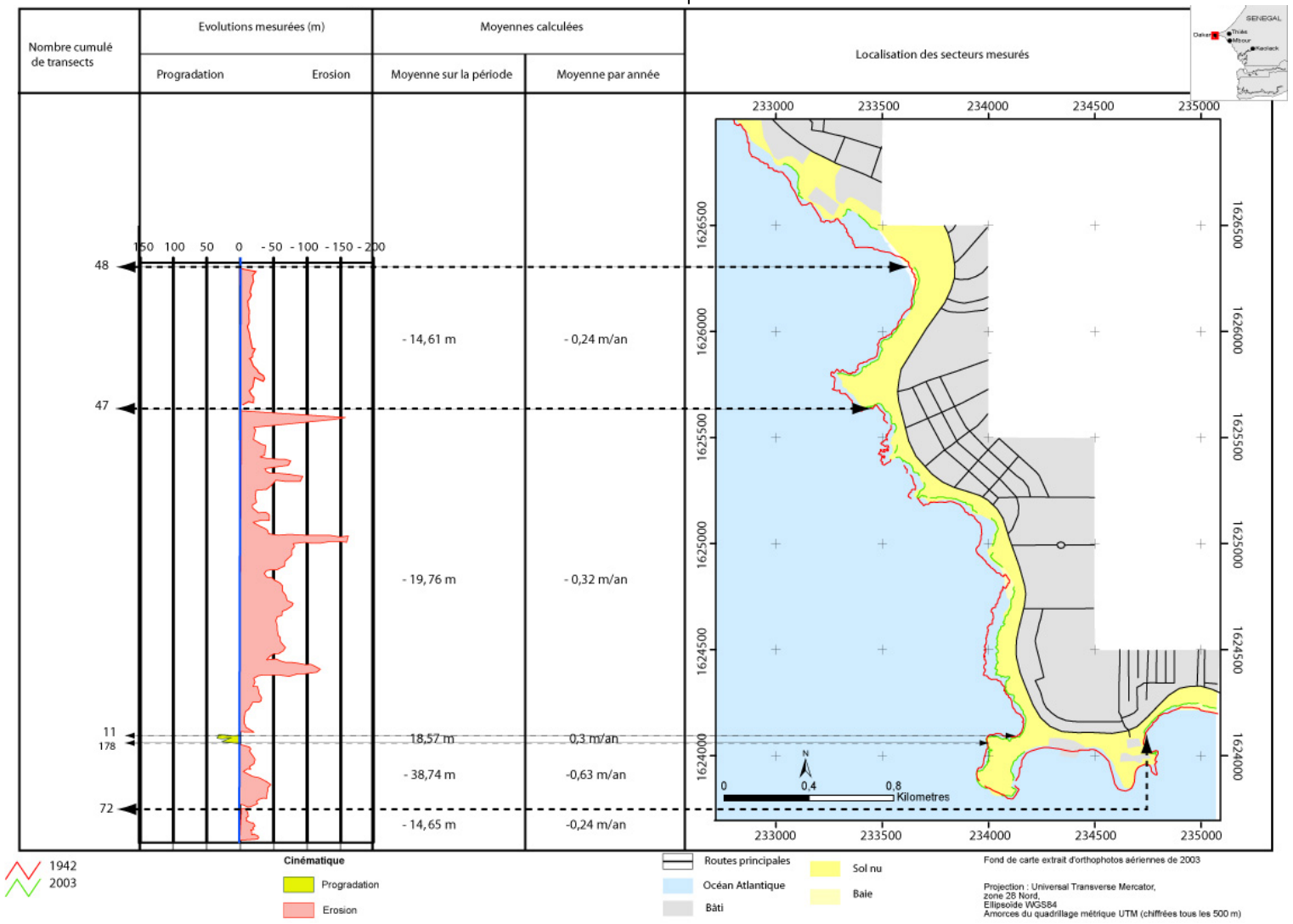
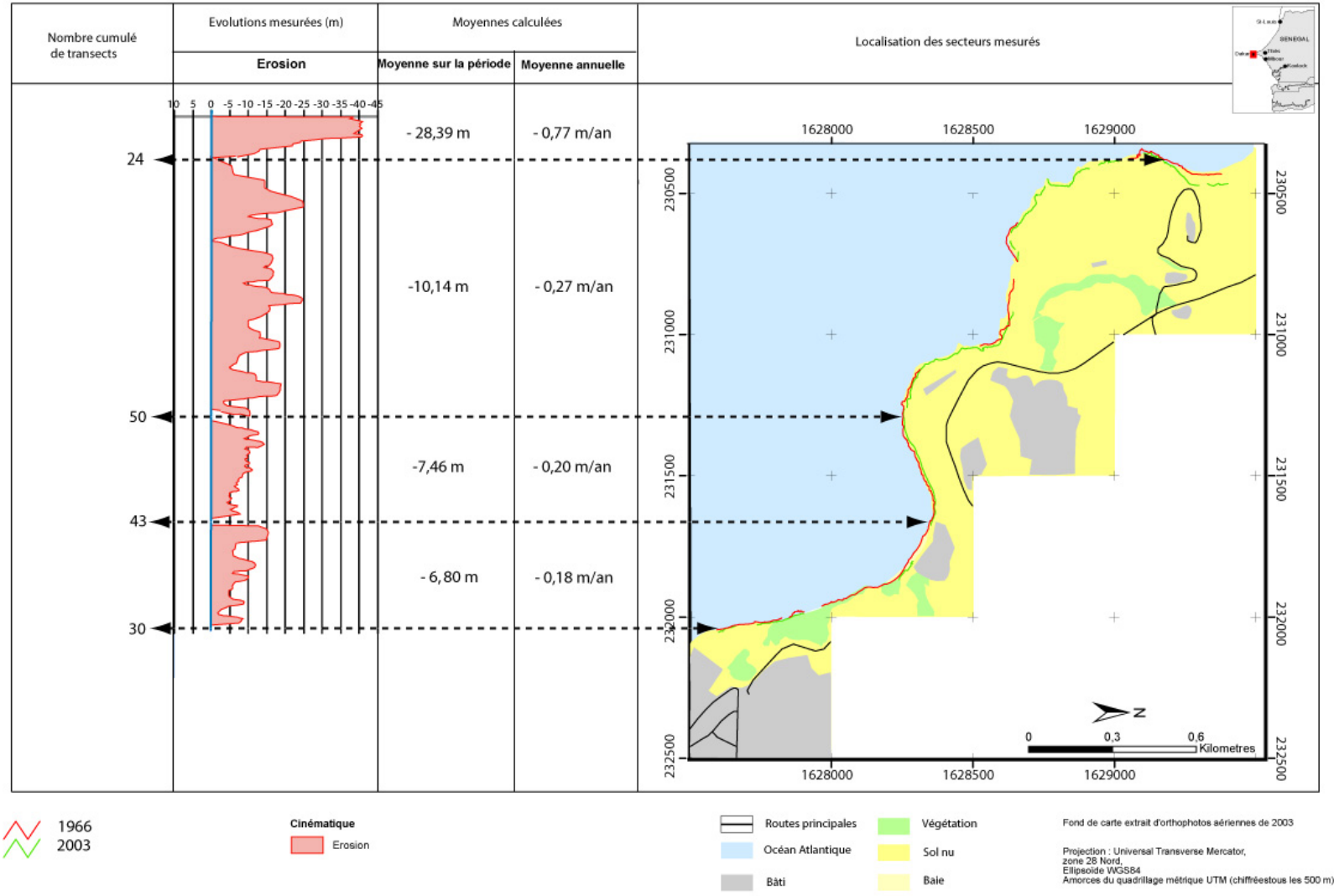


Figure 15 : Evolution sectorielle de la limite inférieure des falaises dans la zone des Mamelles



L´érosion côtière est fortement influencée par la répartition des altérites qui détermine l´évolution du futur trait de côte. Le déblaiement par l´océan des matériaux de la côte ne s´effectue pas partout de la même manière ni à la même vitesse :

- les basaltes et roches dures ont tendances à développer des falaises subverticales ;
- les altérites et les tufs produisent un profil plus plat, inférieur à 45°.

Le recul de la falaise est beaucoup plus rapide dans les altérites et les tufs que dans les roches dures. Ce mécanisme semble être à l´origine de la formation de la plage Pasteur et des diverses plages de la côte rocheuse.

Le premier site s'étend du Cap Manuel à la Pointe des Abattoirs. Le taux de recul le plus élevé est situé au niveau de la plage Pasteur (1,18 m/an). La nature lithologique, le degré d´altération des formations rocheuses ainsi que la présence de fractures expliquent ce taux de recul. Au niveau de la pointe Diop, le taux de recul de la falaise enregistré au cours de la période de 1942-2003 était de 0,17 m/an ce qui est faible pour une zone à falaise. La côte à falaise de la pointe Diop est principalement formée par des roches limoneuses, très fracturées, qui contribuent de manière significative à l'alimentation des plages par des galets et des blocs. Les galets, quand ils sont présents, sont repris par l'action des houles et forment des cordons qui protègent le pied de la falaise.

Le deuxième site s'étend de la baie de Mermoz à la Pointe de Fann pratiquement jusqu'à la baie de Soumbedioune. Le taux de recul le plus élevé est situé au niveau de la Pointe de Fann. Au nord de la Pointe de Fann on observe un engraissement, la pointe de Fann jouant le rôle de brise lame naturelle.

Le troisième site s'étend de la plage des Mamelles au nord ouest jusqu´à la plage de Ouakam au sud-est. Dans ce secteur, le taux d'érosion linéaire diminue du nord ouest vers le sud est. Le recul maximum est enregistré à l´ouest du phare des Mamelles, où le taux moyen d'érosion est de 0,77 m/an. Au sud est des Mamelles, le taux d'érosion diminue progressivement pour atteindre 0,18 m/an.

La nature lithologique de cette partie des Mamelles, la présence d´une brise lame naturelle au niveau de la plage de Ouakam expliquent le faible taux d´érosion observé.
À partir des résultats obtenus, on constate que la précision de l'information sur le déplacement du trait de côte, extraite par la méthode diachronique, dépend étroitement du choix de la limite inférieure de la falaise.

L'évolution des falaises de la presqu´île de Dakar dépend des caractéristiques du substratum rocheux (lithologie, structure de la roche et état de fracturation), d'une part, et des processus marins et continentaux en jeu, d'autre part. Ces derniers dépendent des caractéristiques des houles et des conditions météorologiques. Le rapport de force entre ces processus varie dans l'espace et dans le temps.
L'action des vagues sur le pied des falaises argilo-marneuses, notamment en période de tempête, conjuguée avec l'action de l'eau météorique, provoque une érosion en masse qui déstabilise de manière continue les falaises.

4.2 LES INSTABILITÉS DE TERRAIN

1. Diagnostic

L'érosion actuelle de la côte dakaroise est contrôlée par deux types de facteurs :

- intrinsèques : géologie, géomorphologie, fracturation, pente, altération…. ;
- dynamiques externes : le climat, l'hydrologie et les agents océaniques (marée et houle).

Les facteurs érosion continentaux et marins sont intimement liés.

Photo 19 : Constructions dangereuses sur la Pointe Diop

Lo, Avril 2004

Les falaises de la Pointe des Madeleines ont connu de nombreux effondrements, éboulements ou glissements pendant plusieurs périodes.

Les écoulements d'eau qui ruissellent apparemment fortement lors de fortes pluies, en provenance des plateaux environnants ont un caractère érosif et contribuent à fragiliser les falaises (Photo 20).

Photo 20 : Instabilités dans les attapulgites de la prison (plage Rebeusss)

Lo, Avril 2004

2. Typologie des instabilités

De façon générale, les falaises littorales dakaroises montrent une grande variété de phénomènes (Fig. 16). Les éboulements (chutes de blocs, de pierre…) sont très répandus, sur la côte des Mamelles. La fracturation est souvent intense. Ces facteurs caractéristiques engendrent alors d'autres types d'instabilités comme les glissements bancs sur bancs par exemple. L'action de la houle marine au pied des falaises entraîne à long terme des sous-cavages dans les niveaux inférieurs, souvent moins compétents et plus facilement altérables. Enfin, les terrains de la Plage Pasteur formés de roches peu consolidées sont aussi touchés par des ravinements.

Sous l´expression mouvements de terrain sont regroupés plusieurs types de phénomènes d´instabilité, variables en fonction du mécanisme mis en jeu. Les principaux types de mouvements de terrain rencontrés sont : le glissement, le basculement, l'éboulement et le ravinement.

- les glissements

un glissement correspond à un déplacement lent d´une masse de terrain meuble et/ou instable à partir d´une surface de rupture. On distingue les glissements circulaires, des glissements banc sur banc.

- les éboulements

Ce sont des phénomènes rapides mobilisant des masses rocheuses plus ou moins homogènes à partir d´une paroi verticale ou d´une forte pente (Photo 21).

Figure 16 : Typologie des instabilités et figures d'érosion observées

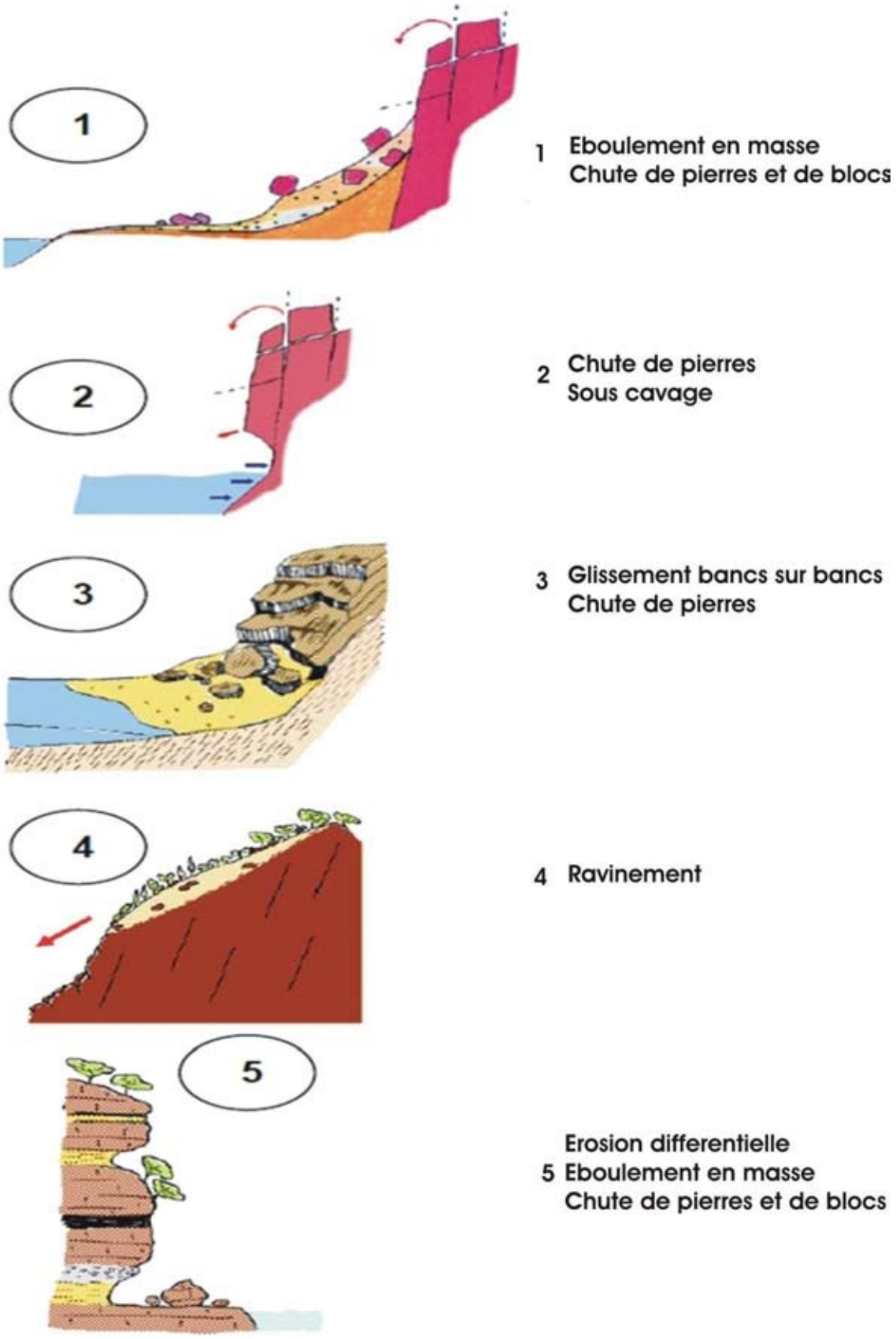


Photo 21 : Eboulement en masse, chute de pierre (Mermoz)
Gueye, juillet 2002

- le ravinement

Les phénomènes de ravinement se produisent sur les versants les plus pentus. Ils s´accomplissent uniquement pendant la saison des pluies. Les falaises sont donc le siège localement et ponctuellement de ravinement intense qui peuvent aboutir au déclenchement d´un glissement de terrain. Ce phénomène est très fréquent au niveau des attapulgites de la prison entre la Pointe des Madeleines et la porte du millénaire (Photo 22).

Photo 22 : Intense ravinement sous la promenade des lions
Gueye, 2005

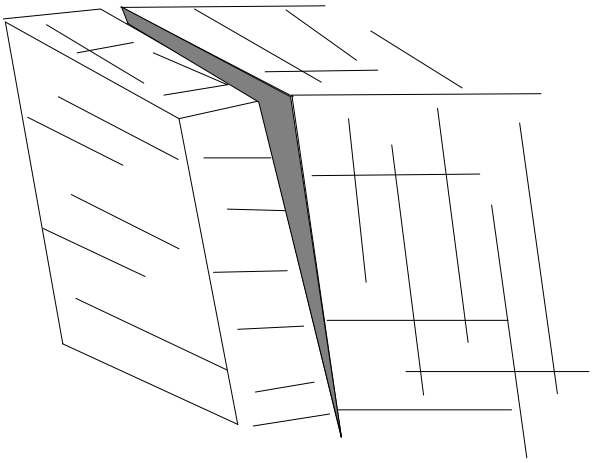
3. Etude des instabilités

La détermination des instabilités de terrain à l´échelle du littoral est un résultat essentiel qui découle des études préalables qui ont été menées, en particulier géologiques et structurales, et qui se traduisent par une caractérisation de l´aléa mouvement de terrain. Cependant la connaissance des processus à l´origine des instabilités nécessite une approche quantitative plus approfondie si l´on souhaite mettre en œuvre des modèles prédictifs et opérationnels. C´est pourquoi des études structurales et géologiques détaillées sont menées sur plusieurs sites (Mermoz, Pointe des Madeleines et Plage Pasteur-Cap Manuel). A terme ces études de détail ont pour but de quantifier le processus d'érosion suivant des échelles géographiques et temporelles plus restreintes, d´identifier en particulier le rôle de l´eau dans les instabilités ainsi que les altérites du point de vue géomécanique. Les résultats de ces études de détail permettront de comprendre les processus déclenchant les instabilités et de prévoir des parades adaptées.

Un examen visuel, depuis le haut de la falaise de la Pointe des Madeleines vers le bas, montre, différents signaux du maintien d'instabilités en pied de falaise (glissements des assises géologiques inférieures et basculement (Photo 23).

Photo 23 : Les joints d'extension nord – sud et leur effet sur le basculement de la Pointe des Madeleines

Gueye, Mai 2001

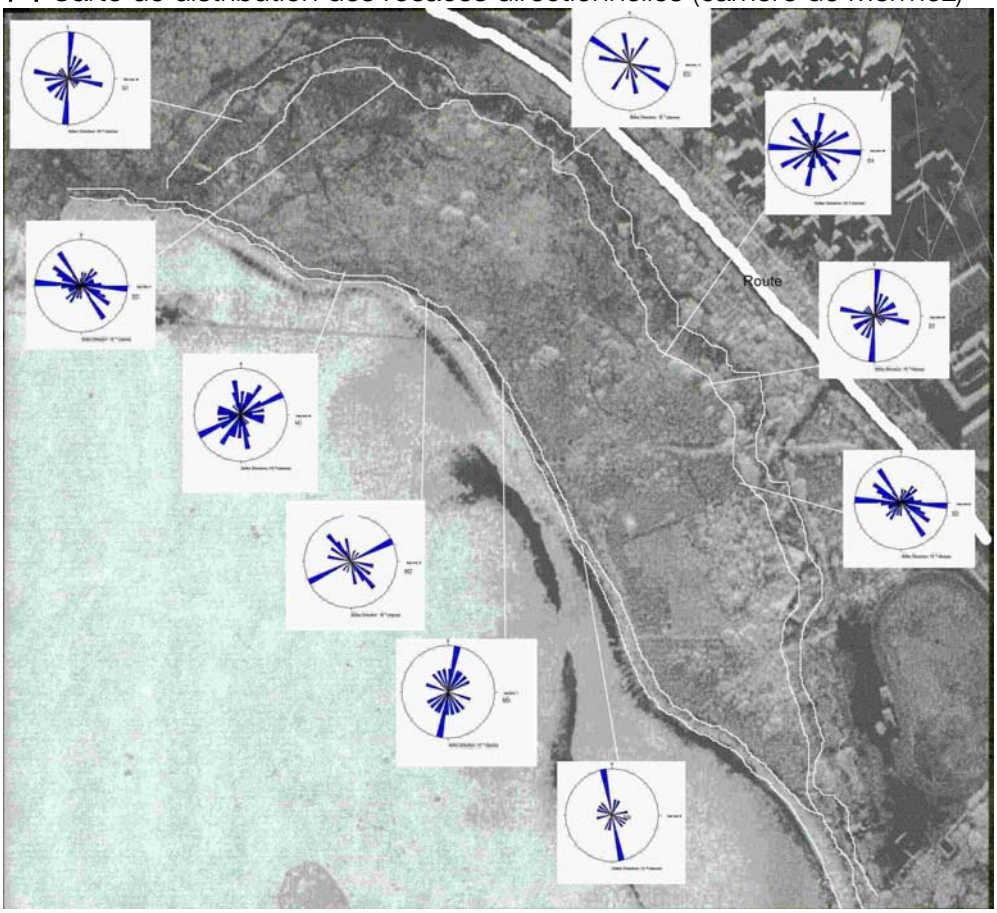


L'origine structurale de ces directions ne fait guère de doute puisqu'elles s'orientent elles aussi suivant les deux directions, classiques dans la région du Cap Vert : NW-SE et NE-SW.

4. Traitement statistique des données et résultats

Cette étude révèle que les fractures sont généralement verticales. Les fractures peuvent se regrouper en familles et ont des orientations plus ou moins consistantes aux différents endroits visités.

Figure 17 : Carte de distribution des rosaces directionnelles (carrière de Mermoz)



a. Facteurs d´instabilité de la carrière de Mermoz

Les différentes données collectées par les méthodes différentes sont bien corrélées et aboutissent toutes à la conclusion que la zone étudiée à Mermoz présente de nombreux indices d'instabilité, liés à plusieurs facteurs.

L´instabilité potentielle de cette carrière de Mermoz est à mettre en relation avec un ensemble de discontinuités géologiques propres à la nature lithologique des formations volcaniques (basaltes, cendres volcaniques….) comme à leur géométrie (pendage, rapport angulaire des couches par rapport au versant, position altimétrique) (Fig. 17). Ainsi, la connaissance de la géologie est primordiale pour les études à l'échelle d'un versant ou d'une vallée. Les lithologies massives sont plus propices aux aléas que les lithologies tendres.

Photo 24 : Plissement des cendres volcanique montrant leur comportement plastique

Gueye, juillet 2002

Les cendres volcaniques sont plus favorables à la formation de glissement et de basculement avec un comportement plastique dominant (Photo 24). Ces couches sont d´autant plus sensibles qu´elles se situent à la base du versant et qu´elles supportent en cette position la surcharge de toutes les autres formations.

A cette surcharge s´ajoute celle de l´eau infiltrée dans le versant qui diminue encore les caractéristiques mécaniques des matériaux.

- Facteurs lithologiques

Les cendres volcaniques sont plus favorables à la formation de glissement et de basculement avec un comportement plastique dominant (Photo 24). Ces couches sont d´autant plus sensibles qu´elles se situent à la base du versant et qu´elles supportent en cette position la surcharge de toutes les autres formations.

A cette surcharge s´ajoute celle de l´eau infiltrée dans le versant qui diminue encore les caractéristiques mécaniques des matériaux.

- Facteurs structuraux

Au niveau des cendres volcaniques, ce sont les fractures WNW-ESE avec la famille NW-SE qui présentent les ouvertures les plus importantes centimétriques voire décimétriques vers le haut du premier versant (Fig. 17).

Le talus supérieur est riche en discontinuités structurales. Les basaltes prismatiques montrent plusieurs dièdres de fracturation conditionnant la géométrie du talus supérieur suivant quatre directions principales qui sont dans l´ordre d´intensité décroissante : E-W ; NW-SE ; NE-SW et N-S, ces quatre familles de discontinuité ayant un fort pendage vers la mer.

Structuralement, précisons que la famille de discontinuité NE-SW correspond à la fracturation liée à la distension donnant lieu à des failles normales.
L´ensemble des discontinuités structurales et plus particulièrement les joints nous montrent en projection stéréographique sur canevas de Wullf qu' ils recoupent le ou les plans de fracture subverticaux suivant des lignes plongeant d´environ 75-65° vers le SE et le SW et sortent dans le talus (fig. 18 et Fig. 19).
Toutes ces raisons tant lithologiques que géométriques font que les cendres volcaniques constituent les formations les plus susceptibles au glissement du versant.

Figure 18 : Carte des risques de glissement (la flèche indiquant la direction de glissement)

Figure 19 : Carte des aléas de la carrière de Mermoz : les triangles indiquent les directions de recul de la côte et les flèches, les directions de glissement au niveau du talus supérieur.

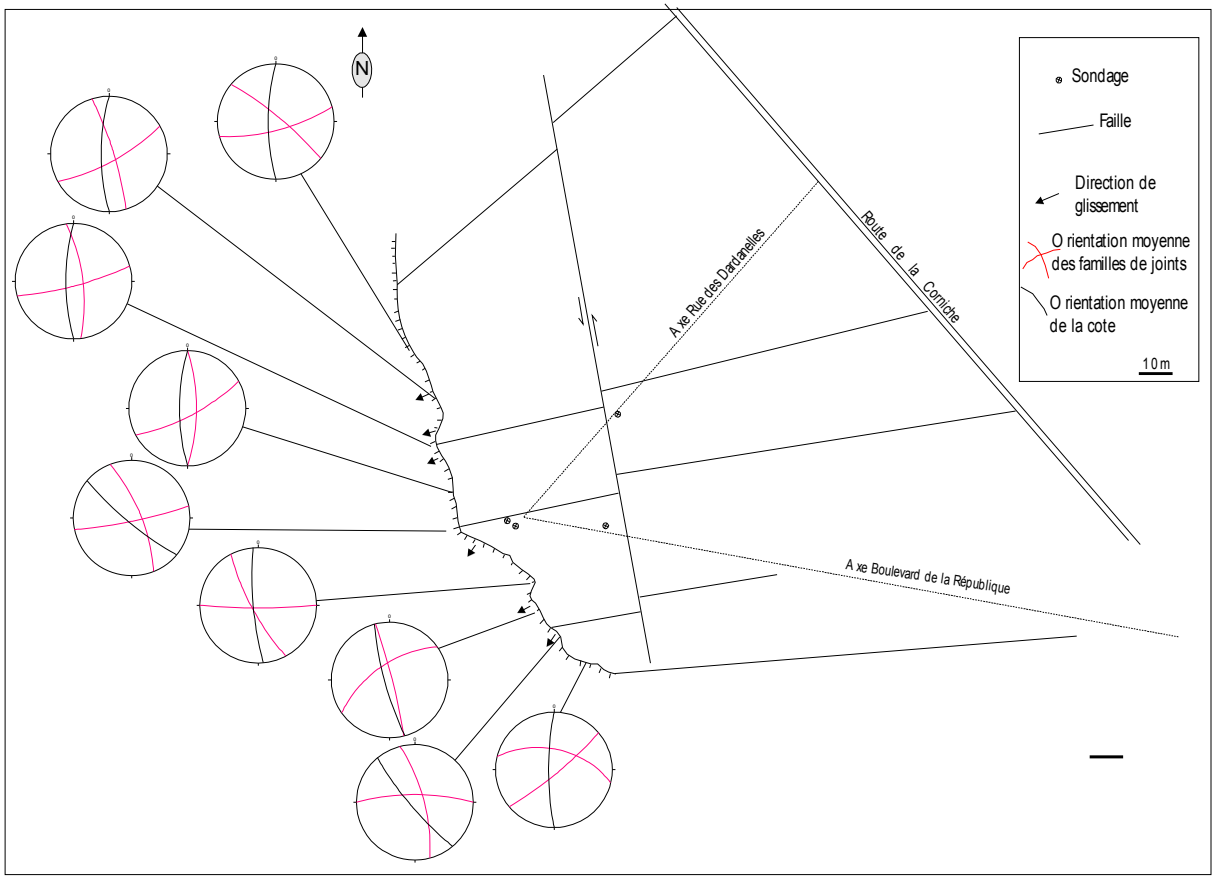
b. Facteurs d´instabilité de la pointe des Madeleines

L´instabilité potentielle de la Pointe des Madeleines est à mettre en relation avec un ensemble de discontinuités géologiques propres à la nature lithologique des couches sédimentaires (limons, marnes…) comme à leur géométrie (pendage, rapport angulaire des couches par rapport au versant, position altimétrique…). Dans cette partie nous analyserons les causes structurales des principaux mouvements qui affectent la Pointe avec les discontinuités mécaniques naturelles des roches. Il s'agit donc dans un premier temps d'établir l'agencement structural de la falaise puis de le confronter avec la topographie. Ces données permettront de confirmer le rôle déstabilisant de certaines familles de fractures avec d´autres discontinuités par rapport au plan moyen du versant. A cela s´ajoute la présence de nombreux niveaux d'eau qui entretiennent les mécanismes de rupture.

L´évaluation de la stabilité d'une falaise rocheuse de grande hauteur (plusieurs mètres) reste un problème complexe, principalement en raison de la multiplicité des mécanismes de déclenchement possibles et du manque de connaissances sur l'état réel du massif. Actuellement, elle est principalement basée sur l´observation de la morphologie du versant et sur la mesure en surface des discontinuités (diaclases, plans de stratifications, failles) qui l´affectent. Les causes principales d´instabilité de la Pointe des Madeleines sont liées d'une part à la nature lithologique, d'autre part à la présence de discontinuités. La Pointe des Madeleines est sans aucun doute l'une des localités les plus affectées par les désordres au niveau de la Presqu'île du Cap-Vert. Ceci est d'ailleurs confirmé par la photo-interprétation qui indique des vitesses de recul du talus très élevées. Ce taux de désordre important est le résultat de la combinaison de plusieurs phénomènes. Cependant dans le calcul du retrait du trait de cote si on porte choix sur la limite inférieure des falaises, les blocs basculés (cf. photo 23) forment des cordons qui protègent le pied de la falaise et justifient les faibles taux de recul calculés (0,17 m par an).

La position des systèmes de joints joue un rôle important dans l´évaluation des risques (Fig. 20). Leur effet peut être mis en évidence grâce à l´utilisation de la projection stéréographique qui fournit un moyen performant de visualisation des talus en relation avec les familles de discontinuités présentes. En effet, la disposition (orientation) d'une famille parallèle ou oblique par rapport à la surface du talus peuvent provoquer des surfaces de glissement potentielles ou de basculement.

Figure 20 : Carte de la direction de mouvement du talus autour de la Pointe des Madeleines



5. L´aléa mouvement de terrain

En se basant sur les critères de prédisposition d´un site (géologie, pente, hauteur de versant, fracturation…), sur les caractéristiques des instabilités survenues et sur des observations de terrain, une cartographie de l´aléa (probabilité qu´un phénomène de nature et d´intensité données se produise) a été réalisée à l´échelle 1/20000 (Fig. 21 et Fig. 22).

Figure 21 : Carte des aléas d´une partie de la Presqu´ile de Dakar

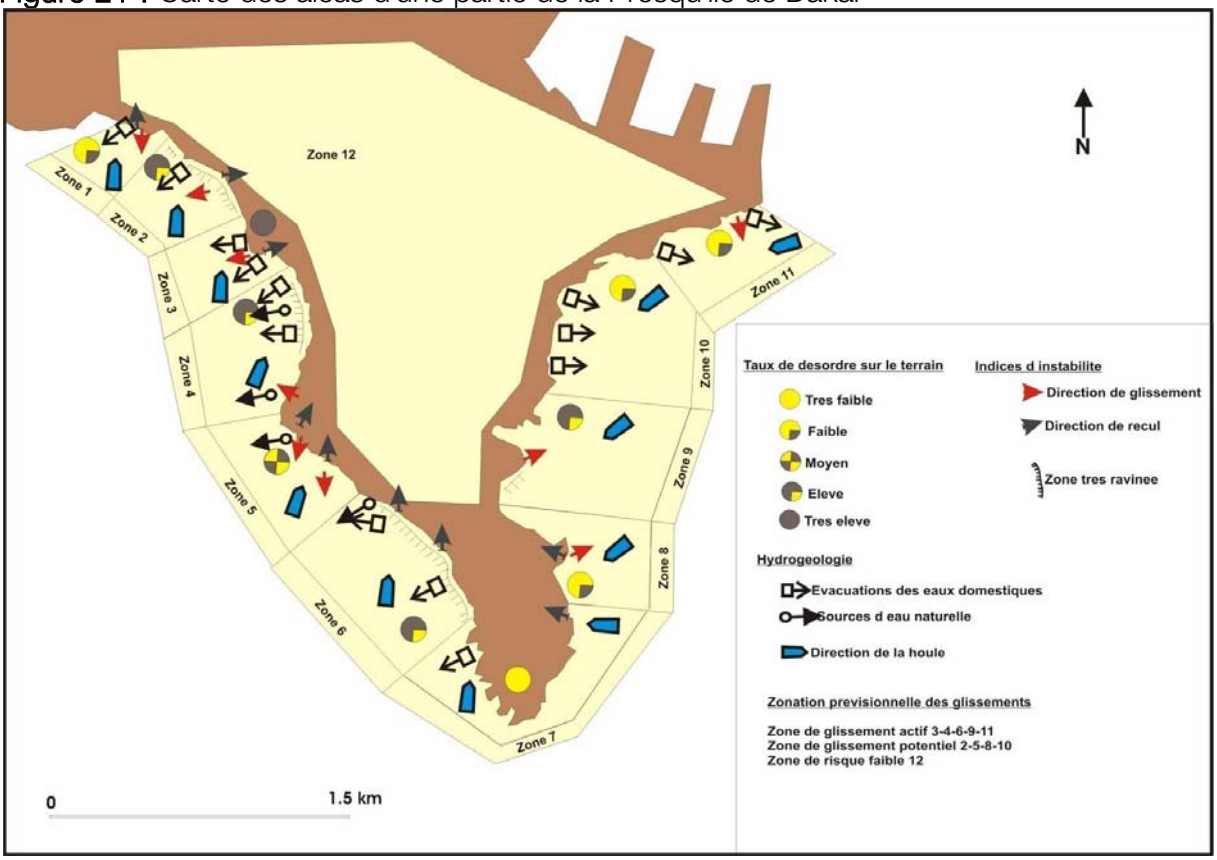
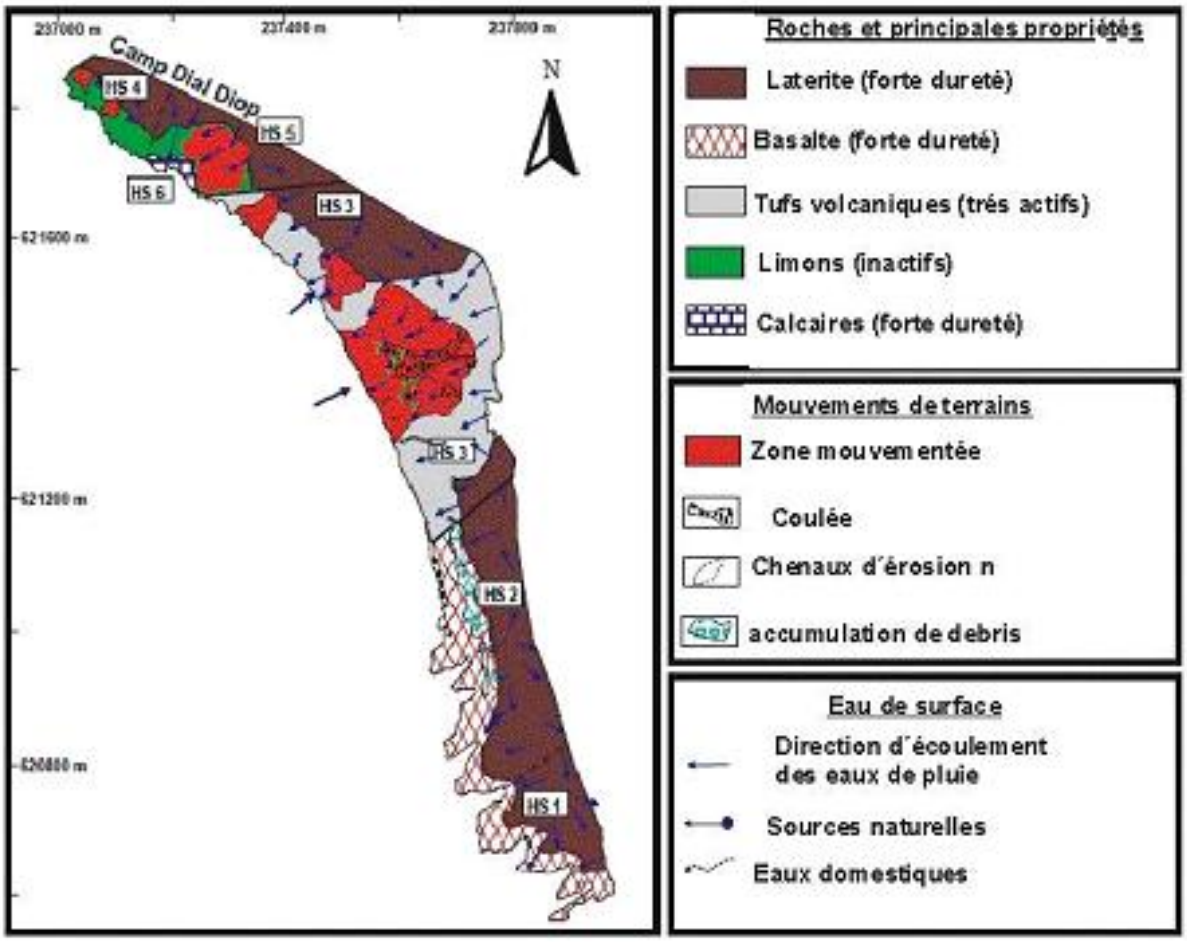


Figure 22 : Visualisation des relations entre glissement de terrain et conditions hydrogéologiques



Fall, 2000, modifiée

V. PRÉSENTATION SYNTHÉTIQUE DES RÉSULTATS OBTENUS

Tableau 3 : synthèse des résultats obtenus au niveau des sites étudiés

Secteurs étudiés	Du Cap manuel à la pointe des abattoirs	De la pointe de Fann à la baie de Mermoz	Les Mamelles
Phénomène observé	Erosion : certaines zones reculent par petits éboulements constants, d'autres reculent par grands pans de temps à autre. Le taux de recul varie entre 10 à 118 cm/an. La valeur moyenne de recul annuel est 41,6 cm/an	Erosion : recul par petits éboulements constants. Le taux de recul varie entre 24 à 64 cm/an. La valeur moyenne de recul annuel est 35,75 cm/an. Progradation à a pointe de Fann	Erosion : certaines zones reculent par petits éboulements constants. La valeur moyenne de recul annuel est de 35,5 cm Le taux de recul varie entre 18 à 77 cm/an
Causes probables	Nature lithologique, d'autre part à la présence de discontinuités et effet de la houle (sous-cavage)	C'est la présence/absence du cordon de galets protecteur, rôle déterminé par l'évolution marine, par l'exploitation humaine, et par les aménagements balnéaires de la côte.	Diversités lithologiques, d'autre part à la présence de discontinuités et effet de la houle.
Conséquences socio - économiques	Enjeux touristiques et urbains se situent aux points qui peuvent devenir critiques pour l'érosion. Dommages aux ouvrages de protection Ex : pointe des abattoirs.	Mise à risque de la forte concentration d'enjeux urbains et touristiques du littoral dakarois.	Enjeux économiques liés aux risques de détérioration des habitations, des routes, des sentiers littoraux.

VI. PERSPECTIVES

Cette étude montre que la dynamique régressive des falaises est très variable spatialement. Par ailleurs, il a été montré que la répartition spatiale de ces vitesses de recul est étroitement liée aux caractéristiques morpho-structurales des falaises.

L'analyse des résultats montre que la stabilité des versants est influencée par les propriétés géotechniques des sols, l'érosion, les conditions hydrogéologiques et l'érosion par les vagues. L'analyse de la stabilité de versants naturels, basée sur cette approche méthodique, a permis une considération appropriée et adéquate des multiples facteurs affectant la stabilité. Elle a également servi à l'optimisation de la planification et de l'investissement pour l'aménagement des terrains de la ville et à l'élaboration de mesures de stabilisation des versants en tenant compte des facteurs d'instabilité.

Ces travaux mettent en évidence l´évolution inexorable du littoral dakarois à l´échelle géologique. Les facteurs naturels de l´évolution identifiés sont à la fois continentaux et marins.

La mise en évidence cartographique et la description des formations altérées permettent d´envisager une approche nouvelle dans la connaissance géologique du littoral et d´améliorer la compréhension des processus de recul du trait de côte.

La typologie géologique du littoral a également servi de base pour dresser une cartographie de l´aléa mouvements de terrain suivant plusieurs tronçons, définis selon des critères physiques homogènes.

Les différentes vitesses érosion établies par tronçons peuvent maintenant être comparées à la typologie géologique et à la dynamique océanique. Ce couplage permettra de faciliter la compréhension des processus naturels et de les analyser à des échelles plus appropriées. Il est alors possible de différencier les mouvements naturels (glissement, effondrement) des instabilités en rapport avec des origines anthropiques.

Au vu des faits constatés, il est recommandé, concernant le site dans son ensemble, d'envisager que les zones non construites situées à moins de 30 m du bord de falaise ne soient pas constructibles, cette frange de terrain en sommet de falaise pouvant être consommée en quelques décennies par l´érosion littorale.

Les études géotechniques recensées et réalisées révèlent que le drainage est l´intervention essentielle pour la majorité des sites afin de limiter les instabilités du littoral. Dans l´exemple de la porte du millénaire, les eaux de pluie mal drainée déstabilisent les ouvrages de protection (Photo 25).

Photo 25 : Ouvrage de protection de la porte du millénaire

Gueye, 2005

L´ensemble des ces études constitue un préalable indispensable à la mise en place de politiques publiques de gestion du littoral. En effet les connaissances acquises à l´échelle régionale de la côte ont amené à définir des zonations géologiques et géotechniques qui doivent aujourd´hui être détaillée à l'échelle des instabilités identifiées, au travers des trois facteurs principaux : marins continentaux, anthropiques. De ce fait, nous recommandons la poursuite des études le long du littoral rocheux de la petite côte (Yène, Toubab Dialaw Popenguine).

6.1 PERSPECTIVES D'ÉTUDES POUR UN AMÉNAGEMENT DURABLE

Techniques

- Dresser un diagnostic des instabilités et des risques sur toute la côte ;
- Proposer un traitement urgent des problèmes d'aménagement ;
- Intégrer l'évaluation environnementale stratégique dans la mise en place des aménagements et de la protection côtiers ;
- Mettre au point un guide sectoriel pour l'étude d'impact environnemental des aménagements de la côte ;

Il est urgent de placer cette gestion dans un cadre juridique cohérent, soucieux de renforcer l'intérêt de la communauté, des ressources naturelles, et en adéquation avec les plans de développement des collectivités côtières.
Ce cadre juridique doit baliser l'application d'une vision globale et durable d'un aménagement et d'une protection intégrée et concertée.

Il faut mettre en place une structure chargée de piloter le programme d'aménagement et de protection intégré qui serait chargé de :

- Valider les projets sectoriels
- les mettre en cohérence
- Contextualiser les études sectorielles
- coordonner leur réalisation

- assurer le suivi et l'évaluation
- opérer des réajustements nécessaires
- de veiller au respect et à une interprétation « environnementale » des textes de lois réglementant les interventions (constructions, plans de développement, d'urbanisme, etc.) dans les milieux sensibles comme le littoral (loi sur le domaine public maritime, Code de l'environnement) ;
- d'élaborer un plan de lutte contre l'érosion côtière sur l'étendue des côtes du pays (l'érosion côtière ne s'observe pas qu'à Dakar) ;
- de mettre en place une banque de données thématiques sur les zones littorales qui servira de base de décision à toute intervention ultérieure.

Une telle banque de données ne pourra être alimentée que par des travaux de recherche et d'observation systématiques sur le littoral sénégalais et donc devrait s'appuyer sur une forte participation des structures universitaires et autres instituts de recherche ;

- d'impliquer les institutions spécialisées dans l'étude des milieux côtiers dans le choix des méthodes et des moyens de lutte contre l'érosion côtière. En effet, les ouvrages de protection de côte peuvent tout aussi bien régler des problèmes d'érosion côtière mais aussi en créer d'autres ;
- de développer une politique de gestion intégrée des zones côtières seule à même de concevoir l'évolution et l'aménagement du littoral dans sa globalité.

Au plan technique, les objectifs d'aménagement du littoral nous permettent de prévoir des activités opérationnelles qui sont :

- Mettre en place un brise – lame pour briser les houles L'ouvrage sera réalisé à partir de bloc de basalte de masse variant entre 1 et 1,5 T, disposé suivant un angle qui sera fonction de la partie à protéger et de la direction et la puissance de la houle ;
- Réaliser, dans les secteurs riverains de la côte, un système de canalisation pour gérer les eaux pluviales destinées à la mer ;
- Conforter le front supérieur de la zone des hautes marées par un ouvrage adéquat pour arrêter les effets de la houle et retenir les pertes de sédiments sous l'effet du ruissellement superficiel ;
- Rétablir le stock sédimentaire de la plage dans les zones vulnérables.

La plage de (Rebeuss) Koussoum, attenante au projet de la porte du Millénaire, servira d'illustration à nos propos. Cette zone d'étude, est marquée par :

- des contraintes tectoniques,
- un ruissellement intense,
- un éboulement régulier des parties supérieures,
- l'action de l'homme qui exploite de façon anarchique ou aménage mal le milieu

Les études réalisées en 2006 prévoient pour la stabiliser (Fig. 23)

- la mise en place d'une haie d'enrochements, comme brise – lame,
- la mise en œuvre d'une butée en enrochement,
- le reprofilage et renforcement du talus,
- la réalisation d'un drainage efficace des eaux superficielles.

Figure 23 : Les résultats attendus de l'aménagement de la plage de Koussoum

Pour réaliser ces ouvrages, il faut réunir les données géologiques, géotechniques, géodynamiques et environnementales sur la zone d'étude et environ, afin de proposer des solutions techniques et des alternatives pour la stabilisation et le confortement durable du site. Il s'agit de réaliser une étude de faisabilité de la protection côtière pour un aménagement durable.

6.2 PROPOSITIONS D'ÉTUDES GÉOLOGIQUES ET GÉOTECTONIQUES SUR LES CÔTES ET FALAISES ROCHEUSES DE L'OUEST DU SÉNÉGAL

Justifications

Sur les sites vulnérables et les plus instables de la Presqu'île de Dakar, il est indispensable de maîtriser toutes les données naturelles du milieu à aménager : il faut en connaître les structures géologiques, cerner la dynamique historique, l'évolution future et l'impact des aménagements.

Objectif Général : Etudes géologiques et géodynamiques

Objectifs spécifiques

1. Cartographie géologique détaillée

Tableau 4 : objectifs et démarches pour des études cartographiques

Objectifs opérationnels	Démarches opératoires
- Faire une représentation détaillée et systématique de tous les éléments géologiques de la zone concernée - Fournir des commentaires pertinents sur la géologie et la géodynamique de la zone à étudier. Orienter les opérations sur les études géotechniques et géophysiques, notamment le choix des sites – cibles.	- Analyse, interprétation et traitement de la photographie aérienne historique du site, - Levers de terrain, analyses, synthèses et traitement de données de terrain, - Représentation, à une échelle convenable, des données géologiques sur une carte, - Rédaction d'une fiche de commentaires illustrés de la carte géologique.

2. Stratigraphie du site et analyse pétrographique des faciès

Tableau 5 : objectifs et démarches pour des études pétrographiques

Objectifs opérationnels	Démarches opératoires
- réaliser des coupes en différents points du site concerné par l'étude, - identifier les couches déposées, - analyser les relations verticales et latérales entres les différentes couches identifiées, - identifier et caractériser les faciès pétrographiques dans les couches, faire une représentation en trois dimensions des couches de la pointe, avec leurs relations spatiales.	levers de terrain études macroscopiques et analyses microscopiques traitement informatique des données analyse et interprétation des résultats commentaires – rédaction de fiches illustrées

3. Etudes tectoniques et microtectoniques

Tableau 6 : objectifs et démarches pour des études tectoniques et microtectoniques

Objectifs opérationnels	Démarches opératoires
Identification des structures et des microstructures tectoniques, caractérisation des différentes structures identifiées, évaluation des rapports entre les talus et les structures tectoniques, identification de l'influence des rapports tectonique – talus dans l'évolution du site	- levers de terrain sur fronts de taille, sur carottes, sur échantillons sur lames minces traitement statistique des données analyse et interprétation des résultats représentation spatiale des résultats commentaires - rédaction de fiches

4. Analyse géodynamique

Tableau 7 : objectifs et démarches pour une analyse géodynamique

Objectifs opérationnels	Démarches opératoires
Identification de l'influence des rapports tectonique – talus dans l'évolution géodynamique du site, caractérisation de l'évolution structurale et géomorphologique du site et de ses environs représentations graphiques de l'évolution du site, en rapport avec la tectonique et d'autres facteurs naturels ou anthropiques	Analyse géodynamique et synthèse des données aéroportées, de terrain et celles issues du traitement statistiques, traitement graphique des résultats commentaires – rédaction de fiches

5. Etude environnementale

Tableau 8 : objectifs et démarches pour des études environnementales

Objectifs opérationnels	Démarches opératoires
Analyse de l'environnement actuel et futur du site, prévoir les répercussions potentielles sur le site et sur l'ouvrage lui - même de la modification du milieu.	Inventaire des facteurs naturels et anthropiques influant sur le site Analyse des indicateurs de tendances et projection dans le futur, Commentaires – rédaction.

Tableau 9 : synthèse des études à mener et coûts.

Cartographie détaillée	Etudes tectoniques et microtectoniques	Levées géophysiques	Analyse géodynamique	Etude d'impact
Besoins:	Pour réaliser un aménagement durable de la corniche, il est indispensable de maîtriser toutes les données naturelles du milieu, ce qui devrait nécessiter des mesures de l'état actuel, mais aussi de cerner l'évolution de ce milieu dans les conditions naturelles, mais: il faut des études d'impact.			
Il faut une représentation détaillée mais synthétique et systématique de toutes les données répertoriées et fournir tous les commentaires sur la géologie et la dynamique de la zone à étudier.	Où sont les structures tectoniques ? Quelle est leur nature ? Quelle est leur importance dans l'évolution du milieu (sens, ampleur du mouvement ? *Etude sur fronts de taille, sur carottes, sur échantillon et sur lames minces*.	Radiographie en profondeur de la zone étudiée pour confirmation des données tectoniques et stratigraphiques	Etude de l'évolution générale du milieu au vu des données connues dans l'histoire de la région et des mesures actuelles.	Analyse sommaire de l'environnement actuel de la corniche et de son évolution naturel de façon à prévoir et prévenir les répercussions potentielles sur le milieu et sur l'ouvrage lui - même de la modification du milieu.

Echéancier	Cinq mois à partir de la commande

Exécutants Coûts études	Un groupe de chercheurs experts possédant une grande expérience du terrain et maîtrisant les données du milieu étudié150 millions de FCFA pour 50 km de côte rocheuse

Résultats attendus	Mise en place d'une banque de données complète et fiable sur la nature, l'évolution et le potentiel d'aménagement des secteurs étudiés, avec en sus, une étude d'impact sur le milieu de cet aménagement.

Remerciements

Nous remercions le Centre de suivi écologique qui a gracieusement mis à notre disposition les supports images. Nous remercions aussi Dr Ibrahima Faye pour son assistance au traitement des photos aériennes

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

DOMAIN, F. (1976). Les fonds de pêche du plateau continental ouest africain entre 17°N et 12°N. Doc. CRODT/ISRA, Dakar, 61, 20 pp., 3 fig., 1 ann., 2 pl. h.t.

EMERY, K.O., AUBREY, D.G. (1991). Sea levels, land levels and tide gauges. Springer Verlag, New York, 237 pp., 113 fig., 9 tab., 2 app.

ELOUARD, P., FAURE, H., HEBRARD, L. (1977). Variations du niveau de la mer au cours des 15 000 dernières années autour de la presqu'île du Cap Vert. Dakar – Sénégal. Bull. liaison Ass. Sénégal. Et. Quatern. Afr., Dakar, 50, 29-49, 2 fig.

FALL, M 2000. Standsicherheitsanalyse der Küstenhänge in Cap Manuel (Dakar, Senegal) mit Hilfe ingenieurgeologischgeotechnischer Untersuchungen und GIS-technologischer Methoden. Journal Wiss. Mitt. des Institutes Für Geotechnik., Heft n° 2000-2, 187 pp.

NARDARI, B. (1993). Analyse de la houle sur les côtes du Sénégal. Applications à la pointe de Sangomar. Rapport Stage U.T.I.S., ISRA/ORSTOM, Dakar, 31 pp., 26 fig., 5 ann.
REBERT, J.P.(1983). Hydrologie et dynamique des eaux du plateau continental sénégalais. Doc. Scientif., CRODT/ISRA, Dakar, 89, 99 pp., 47 fig.

RIFFAULT, A. (1980). Les environnements sédimentaires actuels et quaternaires du plateau continental sénégalais (sud de la presqu'île du Cap Vert). Thèse 3ème cycle, Université Bordeaux I, n°1561, 145 pp., 57 fig., 7 tab., 2 ph., 1 pl., 4 ann.

LISTE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1 : localisation des différents sites étudiés dans une photo aérienne infrarouge de Dakar 6

Figure 2 : Photo aérienne montrant la localisation des sites Cap Manuel- Pointe Diop 7

Photo 1 : Falaise abrupte basaltique du Cap Manuel (Lo, Avril 2004) 8

Photo 2 : La falaise limoneuse de la Pointe Diop (Lo, Avril 2004) 8

Figure 3 : Localisation de la Pointe des Madeleines 9

Photo 3 : La falaise limoneuse de la Pointe des Madeleines (Lo, Mai 2001) 10

Photo 4 : La porte du Millénaire (Lo, Avril 2004) 10

Figure 4 : Localisation de la carrière de Mermoz 11

Photo 5 : Le modelé topographique du site de Mermoz (Gueye, juillet 2002) 12

Photo 6 : les sables aquifères de la zone de Mermoz (Gueye, juillet 2002) 12

Figure 5 : Localisation des Mamelles 13

Photo 7 : Front ouest du phare des Mamelles 14

Photo 8 : Karstification et dissolution le long des plans de fracture 15

Photo 9 : Rejets d´eau usée domestique (Porte du Millénaire) 16

Figure 6 : La direction des houles sur le littoral de Dakar 17

Tableau 1 : Caractéristiques des houles 17

Photo 10 : Couvert végétal de la carrière de Mermoz 18

Figure 7 : Carte géologique simplifiée de la Presqu´ile de Dakar 19

Photo 11 : Affleurement à attapulgite de la prison (formation de Rebeuss) 20

Figure 8 : Géologie de la Pointe des Madeleines 20

Figure 9 : Log stratigraphique des formations de Rebeuss 21

Photo 12 : Tufs lités recoupés par des fractures (façade occidentale du phare des Mamelles) 23

Photo 14 : Ouverture des fractures et basculement des blocs dans la carrière de Mermoz24

Photo 13 : Falaise limoneuse de la porte du Millénaire 24

Figure 10 : Carte structurale de la partie occidentale du bassin sédimentaire sénégalais .. 25

Photo 15 : Exemples de structures tectoniques dans les limons de l'Hôpital..... 26

Photo 16 : Zone supérieure bréchifiée des limons 26

Figure 11 : La rosace de direction des fractures mesurées dans la Pointe des Madeleines montre la présence de fractures dominantes ENE-WSW et NNW-SSW 27

Photo 17 : Mesures géophysiques : résistivimètre..... 30

Photo 18 : Mesures des structures avec une boussole 32

Figure 12 : Agencement structural : illustration des conditions de glissement..... 33

Tableau 2 : caractéristiques techniques des supports..... 34

Figure 13 : Evolution sectorielle de la limite inférieure des falaises dans la zone Cap Manuel – Pointe des Abattoirs. 37

Figure 14 : Evolution sectorielle de la limite inférieure des falaises dans la zone Cap-Manuel – Pointe des Abattoirs. 38

Figure 15 : Evolution sectorielle de la limite inférieure des falaises dans la zone des Mamelles 39

Photo 19 : Constructions dangereuses sur la Pointe Diop..... 41

Photo 20 : Instabilités dans les attapulgites de la prison (plage Rebeusss) 42

Figure 16 : Typologie des instabilités et figures d´érosion observées 43

Photo 21 : Eboulement en masse, chute de pierre (Mermoz) 44

Photo 22 : Intense ravinement sous la promenade des lions..... 44

Photo 23 : Les joints d'extension nord – sud et leur effet sur le basculement de la Pointe des Madeleines..... 45

Figure 17 : Carte de distribution des rosaces directionnelles (carrière de Mermoz)..... 46

Photo 24 : Plissement des cendres volcanique montrant leur comportement plastique 47

Figure 18 : Carte des risques de glissement (la flèche indiquant la direction de glissement) 48

Figure 19 : Carte des aléas de la carrière de Mermoz : les triangles indiquent les directions de recul de la côte et les flèches, les directions de glissement au niveau du talus supérieur. 49

Figure 20 : Carte de la direction de mouvement du talus autour de la Pointe des Madeleines 50

Figure 21 : Carte des aléas d´une partie de la Presqu´île de Dakar..... 51

Figure 22 : Visualisation des relations entre glissement de terrain et conditions hydrogéologiques 52

Tableau 3 : synthèse des résultats obtenus au niveau des sites étudiés..... 53

Photo 25 : Ouvrage de protection de la porte du millénaire..... 55

Figure 23 : Les résultats attendus de l'aménagement de la plage de Koussoum..... 57

Tableau 4 : objectifs et démarches pour des études cartographiques..... 58

Tableau 5 : objectifs et démarches pour des études pétrographiques..... 58

Tableau 6 : objectifs et démarches pour des études tectoniques et microtectoniques 59

Tableau 7 : objectifs et démarches pour une analyse géodynamique..... 59

Tableau 8 : objectifs et démarches pour des études environnementales..... 59

Tableau 9 : synthèse des études à mener et coûts. 60