

المدرسة الوطنية العليا لعلوم البحر و تهيئة الساحل

Ecole Nationale Supérieure des Sciences de la Mer et de l'Aménagement du Littoral



MEMOIR DE FIN D'ETUDES EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME D'INGENIEUR EN
SCIENCES DE LA MER

OPTION : AMENAGEMENT DU LITTORAL

Thème :

**Evolution et dynamique de la falaise Est
de Boumerdes et proposition des
solutions**

Présenté par:

- BOURTI Hayat
- HENDA Sania

Soutenu le 25/06/2014 devant le jury suivant :

Mr. GUERFI. M	Maître de conférences A (ENSSMAL)	Président
Mr. MEZOUAR. K	Maître de conférences B (ENSSMAL)	Promoteur
Mr. BELKASSA. R	Professeur (ENSSMAL)	Examineur
Mr. LARID. M	Maître de conférences A (ENSSMAL)	Examineur
M^{me} BOUDOUMA. Z	(LEM)	Co-promotrice

Promotion: 2013-2014

Remerciements

Au terme de ce travail, nous remercions Dieu le tout puissant pour nous avoir donné la santé, le courage et la volonté, pour réaliser ce modeste travail.

Nos plus vifs remerciements à :

Mr Guerfi. M, maître de conférences (ENSSMAL), qui nous a fait l'honneur d'accepter la présidence de ce jury.

Nous remercions Mr MEZOUAR. K, maître de conférences d'avoir accepté d'encadrer ce travail, pour sa confiance, sa disponibilité, ses encouragements et ses précieux conseils au cours de la réalisation de ce mémoire.

M^{elle} Mouhoubi. N et M^{me} Boudouma. Z (laboratoire d'étude maritime LEM) de nous avoir accepté et de nous recevoir au sein du laboratoire (LEM), et de co-encadrer ce travail et d'avoir accepté, de diriger et de suivre constamment la progression de ce travail, par ses suggestions et ses critiques constructives. ses précieux conseils au cours de la réalisation de ce mémoire.

Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements à monsieur LARID. M, Maître de conférences (ENSSMAL), Mr BELKASSA, Maître de conférences (ENSSMAL), pour leurs aides et leurs soutiens et pour avoir accepté d'examiner ce manuscrit et de participer à ce jury.

Nos profondes reconnaissances au personnel de la bibliothèque de l'ENSSMAL, du service de la documentation du LEM, ainsi qu'à toutes les personnes qui nous ont aidés du près ou de loin à la réalisation de ce mémoire de fin d'étude.

Nous somme reconnaissant à tous nos enseignants qui ont contribué à notre formation et à toute personne qui nous a appris une lettre ou une phrase, qu'ils trouvent ici notre reconnaissance et un petit fruit de leurs sueurs.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

A ma mère et mon père

A mon fiancé (Yazid)

A toutes mes sœurs et mes frères

*Et à tous mes amis (es) en particulier Hayat, Ferroudja, Yasmina,
Lynda, Nour El Imane, Ouahid, Abdou....etc.*

Sania

Je dédie ce modeste travail :

A mes chers parents, qui se sont toujours souciés de mes intérêts

A tous mes frères et sœurs

A toute ma famille (BOURTI)

*A tous mes amis (es) en particulier Sania, Radia, Nour El Imane,
Josef, Hinane, Nora, Abdouetc.*

Hayat

Et à tous ceux qui nous ont aidés de près et du loin

Sommaire

SOMMAIRE

Introduction générale1

Chapitre I : Généralité

I. Hydrodynamique côtier2

I.1.Introduction2

I.2. Concepts généraux de morpho-dynamique2

I.2.1.Echelle spatiotemporelle de l'évolution morphologique des systèmes côtiers2

I.2.2.Processus morpho-dynamiques côtiers3

II.Processus d'érosion de falaise5

II.1. Les falaises littorales5

II.1.1.Les différents types de falaise6

II.2. Evolution des falaises sous l'effet des facteurs meteorologique (les pluies)8

II.2.1.la battance8

II.2.2.le ruissellement8

II.3. Les différents types d'érosion de falaise par la houle9

II.3.1. L'érosion mécanique9

II.4. Influence du forçage des vagues sur le recul de falaise9

Chapitre II: Cadre général sur le site d'étude

Introduction11

II.1.Situation géographique11

II.1.1.Wilaya de Boumerdès11

II.1.2.Site d'étude.....12

II.2.Le cadre géologique et géomorphologique12

II.2.1.Cadre géologique.....13

II.2.1.1. Géologie locale.....13

II.2.2- La géomorphologie14

II.2.3 Lithologie	14
II.4. Contexte climatiques et hydrologiques	15
II.4.1. Données climatologiques	15
II.4.2. Données Hydrologiques	18
II.5. Contexte hydrodynamique	19
II.5.1. Les données météorologiques	19
II.5.2. Les données océanographiques	21
II. 6. Evolution du trait de côte	25
II.6.1. Méthodes et techniques utilisées	25
II.7. Occupation du sol et type d'activités	26
II.8. Les agents de l'érosion observés	27
Conclusion	27

Chapitre III: Etudes, Méthodes, Résultats et Discussion

Introduction	32
III.1. Etudes topo- Bathymétriques	32
Introduction	32
III.1.1. Etude topographiques	32
III.1.2. Etude bathymétriques	33
III.1.2.1. Travaux sur terrain	34
III.1.2.2. Traitement des observations	36
III.1.2.3. Description du logiciel	36
III.1.2.4. Résultats d'analyses bathymétriques	37
III.1.2.5 Les profils transversaux	40

Conclusion	41
III.2. Etude sédimentaire	42
Introduction :	42
III.2.1. Points de prélèvements :	42
III.2.2. Méthode d'analyse au laboratoire.....	43
Conclusion.....	47
III.3. La réfraction de la houle.....	47
Introduction	47
III.3.1. Principe de calcul de la réfraction de la houle	48
III.3.2.Données de bases	48
III.3. 3. Choix du secteur angulaire	49
III.3.4. Les étapes de calcul de la réfraction	50
III.3.5. Résultats de la réfraction	50
III.3.6.Interprétation des résultats	55
Conclusion.....	55
III.4. Le transit littoral	55
III.4.1. Mouvement d'entraînement des sédiments sur le fond	56
III.4.2.Dynamique sédimentaire.....	57
Conclusion	61

Chapitre IV : Les ouvrages de protection

Introduction	62
IV.1. Nécessité d'une étude d'aménagement	62
IV.2.Les ouvrages de protection envisageables	62
IV.2.1.Géotube	62
IV.2.2. Reprofilage de la falaise	67
IV.2.2.2.Reprofilage en banquettes.....	68
IV.2.2.3. Reprofilage en une seule pente.....	69

Sommaire

IV.2.3. Les enrochements naturel	70
Conclusion.....	72
Conclusion générale.....	73

. Choix du secteur angulaire :

III.3.4. Les étapes de calcul de la réfraction :

III.3.5. Résultats de la réfraction :

III.3.6. Interprétation des résultats :

III.3.7. Conclusion

III.4. Le transit littoral :

III.4.1. Mouvement d'entraînement des sédiments sur le fond :

III.4.2. Dynamique sédimentaire :

III.4.2.1. Estimation du transit sédimentaire :

III.4.3. Conclusion

Introduction Générale

La zone côtière est le lieu de rencontre entre la terre, la mer et l'atmosphère, elle peut se trouver sous forme d'une cote sableuse (plage) ou rocheuse tel que les falaises qui sont toujours en voie d'évolution, c'est à ce niveau que se déroulent les différents échanges de ces trois lieux, cet aspect de confrontation la rend plus importante pour les activités anthropiques, du coup elle est devenue plus fragile et sensible durant ces dernières années (avec l'évolution industrielle).

L'hyper exploitation de cet espace provoque des problèmes qui sont difficiles à gérer tel que le recul du trait de côte qui est causé principalement par l'attaque de la mer sur le rivage et aussi l'érosion des falaises qui donne une intense perte de la partie terrestre.

L'érosion côtière est un problème que l'on retrouve dans le monde entier, notre littoral n'est malheureusement pas épargné par ce phénomène de plus en plus fréquent sur nos côtes. Le danger de voir nos côtes se défigurer et perdre de leur biodiversité est aujourd'hui encore plus réel, atteignant un niveau suffisamment alarmant pour que les autorités se décident à mettre en œuvre une stratégie qui permettra leur reconstitution et leur protection. C'est aussi l'objectif principal de notre étude qui va porter sur la protection de la falaise des 800 logements de Boumerdès, après avoir identifié les causes et les conséquences de l'érosion sur ce site.

Le recul du trait de côte de cette zone s'est remarqué uniquement après la construction de la cité des palmiers au sommet de cette falaise, mais des solutions n'étaient pas proposées car l'état ne lui a pas accordé tellement d'importance. Aujourd'hui un aménagement s'avère nécessaire si on veut préserver ce patrimoine côtier, dans ce mémoire de fin d'étude qui porte le titre de « Evolution et Dynamique de la Falaise de Boumerdès et Méthode de Protection » on a exposé cette problématique et on a essayé de lui accorder des solutions qui ont pour but la protection et la stabilité de la falaise tout en préservant l'harmonie et l'esthétique de notre zone, pour cela on a suivi les étapes suivantes :

-Premier chapitre: généralités sur l'hydrodynamique côtière et évolution des falaises.

-Deuxième chapitre: étude générale sur le site d'étude.

-Le troisième chapitre: observation et étude des facteurs externes (marins et terrestres, naturels et anthropiques) et leurs conséquences sur la zone.

-Le quatrième chapitre: solutions d'aménagement et de protection avec leurs inventeurs sur l'environnement.

A la fin on termine par une conclusion qui résume notre travail, ainsi les différentes suggestions pour protéger la falaise de notre site d'étude

Chapitre I : Généralités

I. Hydrodynamique côtier

I.1.Introduction

La connaissance fine des conditions d'environnement est un préalable indispensable pour la conception des ouvrages côtiers et la prédiction de la dynamique sédimentaire. Or, les conditions hydrodynamiques liées à la houle se trouvent fortement modifiées en faible profondeur sous l'action combinée de multiples processus (réfraction, levée, diffraction, déferlement bathymétrique). La compréhension de ces processus physiques a été améliorée depuis plusieurs années et de nombreuses études ont été menées afin de développer des modèles numériques de houle. Par ailleurs, l'effet moteur des vagues joue un rôle important sur l'écoulement littoral qui peut être modélisé en suivant les lois de la mécanique des milieux continus.

I.2. Concepts généraux de morpho-dynamique

I.2.1.Echelle spatiotemporelle de l'évolution morphologique des systèmes côtiers

Les littoraux sont des environnements particulièrement dynamique soumis à de nombreuse forçages d'origine tectonique, eustatique ou encore hydrodynamique agissant à des échelles de temps différentes. Ainsi à l'échelle des temps géologiques, l'évolution du littoral est principalement contrôlée par des facteurs tectoniques. A l'échelle des temps historiques, l'environnement côtier subissent l'influence de la climatologie locale (fréquence des tempêtes, vents dominants) et ses processus côtiers de haute fréquence (marée, courant, vagues et turbulence).

L'étude l'évolution morpho-dynamique des littoraux consiste à relier leur développement morphologique et les forçages aux différentes échelles de temps (**Wright&Thom, 1977 in Soazig. p ,2010**).

En fonction de l'échelle de temps, le comportement morpho-dynamique d'un système côtier peut être très variable. A chaque échelle de temps est associée une échelle spatiale en fonction de l'amplitude volumique des changements morphologiques mis en jeu. Dans le cas d'un système côtier, l'existence d'une relation linéaire entre l'amplitude des évolutions spatiales du système et l'échelle temporelle associée peut être supposée. Il découle de cette relation une hiérarchisation spatio-temporelle des processus dynamiques qui contrôlent l'évolution de la zone côtière (FigureI.1).

Selon la nomenclature de De Vriend (in Brière, C. ; 2003.), on peut en particulier distinguer les échelles suivantes :

- la **micro-échelle** ou **échelle des processus** qui concerne les processus physiques, constitutifs de la houle, des courants ou du transport sédimentaire, et agissant à une échelle plus courte que celle du comportement morpho dynamique correspondant.

- la **méso-échelle** ou **échelle dynamique** qui concerne le comportement morpho-dynamique dû à l'interaction entre les processus physiques et la topographie.

- la **macro-échelle** ou **échelle de tendance** qui concerne les tendances ayant lieu à une échelle de temps plus longue que celle des comportements morpho dynamiques primaires. Ces tendances peuvent être dues aux variations saisonnières de comportement ou à l'évolution progressive des forçages extérieurs (évolution du marnage, élévation du niveau moyen de la mer).

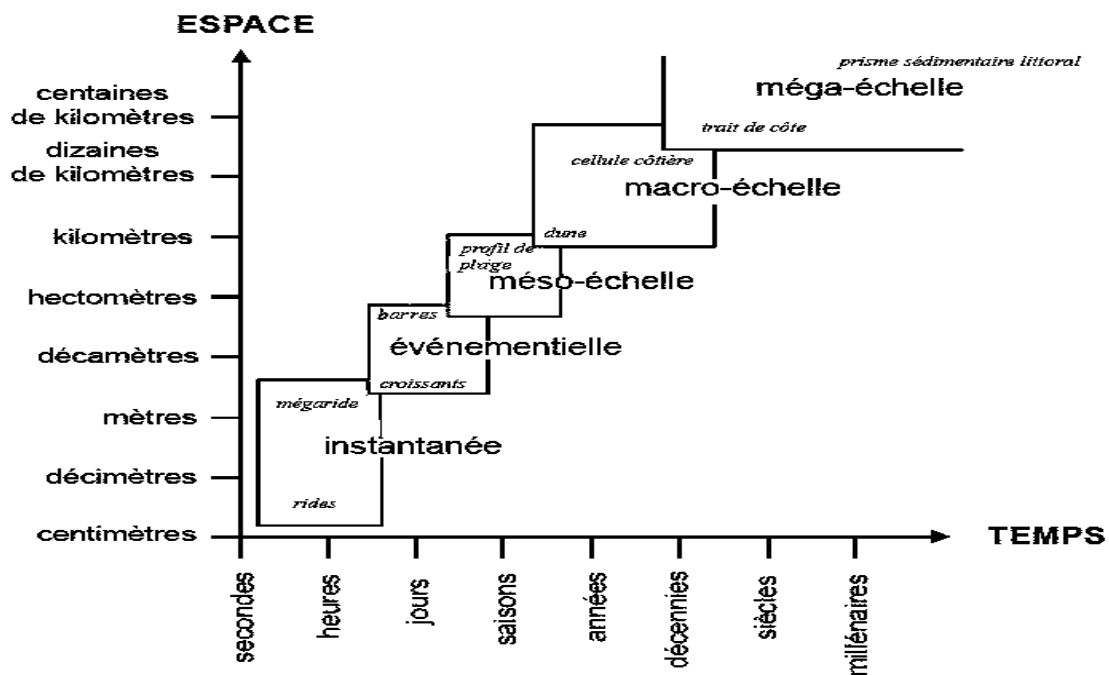


Figure I.1 : Relation spatio-temporelle des systèmes morpho-dynamique côtier (Stepanian, 2002, in Brière, C. ; 2003).

I.2.2. Processus morpho-dynamiques côtiers

A l'échelle des processus, le comportement d'un système côtier résulte des mouvements à l'interface eau/sédiments. Les conditions hydrodynamiques (vagues, courant, marée) induisent un transport sédimentaire responsable de l'évolution morphologique de la plage (Figure I.2).

Cependant, les conditions hydrodynamiques locales sont fonction des forçages au large mais sont également influencées par la topographie locale. Ces interactions non linéaires rétroactives constituent une des propriétés principales des évolutions morpho dynamiques des systèmes côtiers.

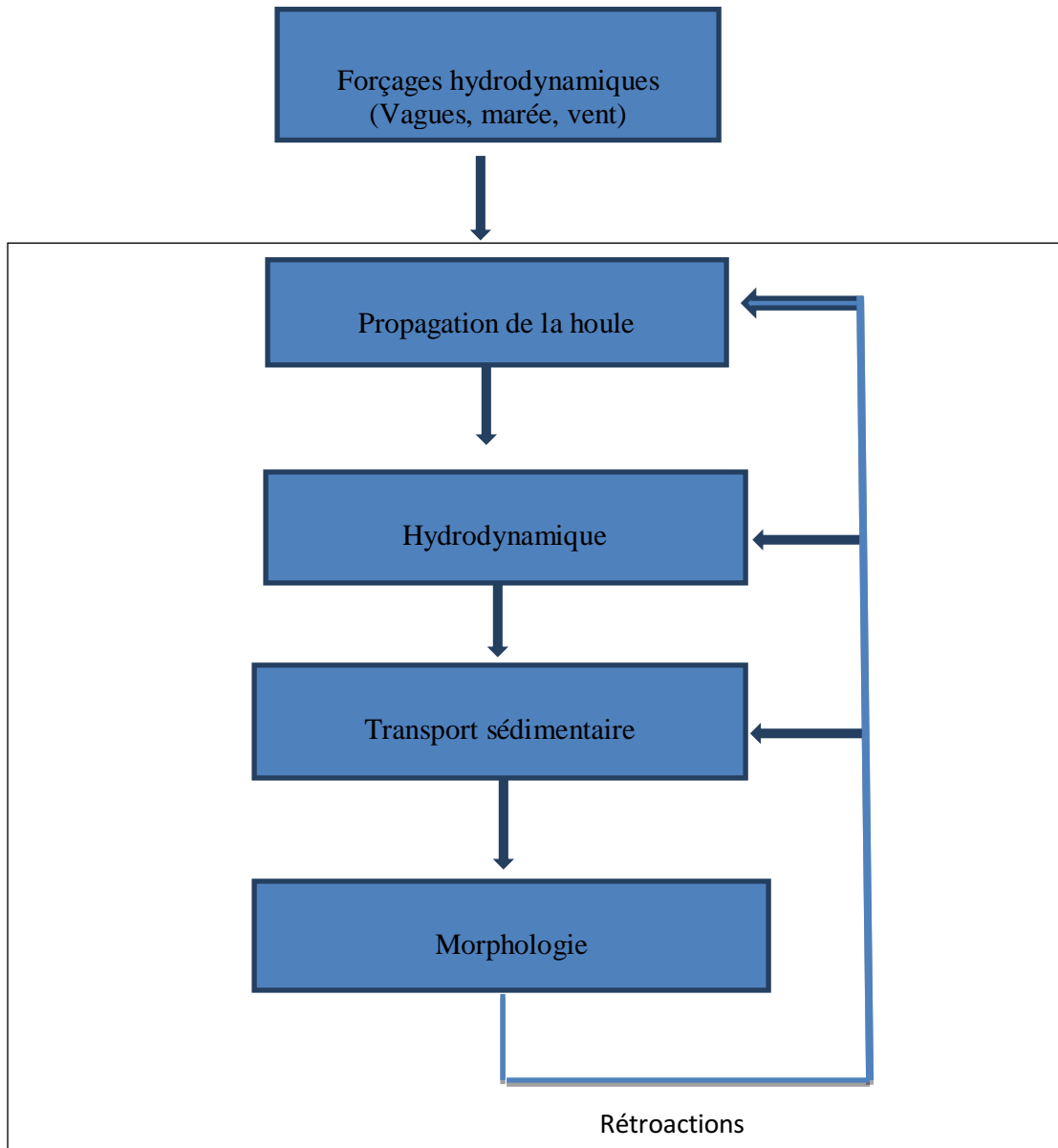


Figure I.2 : composant d'un système morpho-dynamique côtier.

Cette schématisation constitue le fondement des modèles de processus où la description des processus hydrodynamiques et sédimentaires doit permettre de simuler le comportement observé. Les modèles de processus sont constitués de plusieurs modules décrivant la houle, les courants et le transport sédimentaire.

II. Processus d'érosion de falaise

Différents mécanismes du processus d'érosion de falaise dépendent de la géométrie du système. Nous exposons dans cette partie la typologie des falaises maritimes et les différents facteurs qui affectent l'érosion des falaises, en développant les différentes manières dont les vagues peuvent impacter le front de falaise. Puis, nous présentons les différents mécanismes d'érosion de la falaise soumis à l'action des vagues.

II.1. Les falaises littorales

Les falaises littorales étant comme un volume de roches et de terre formant un escarpement au bord de la mer sans véritable plage, les matériaux qui les composent peuvent être durs ou meubles et d'origines diverses : granite, basalte, argile, calcaire. Souvent, à la base de la falaise se trouve un banc rocheux plat et érodé qui peut être nu (littoral érosif : les débris sont pulvérisés et entraînés au large) ou posséder une couche épaisse de matériaux grossiers (littoral d'accumulation).

Les falaises présentent 75 à 85 % des littoraux, la variété de ces derniers est liée à leur structure géologique.

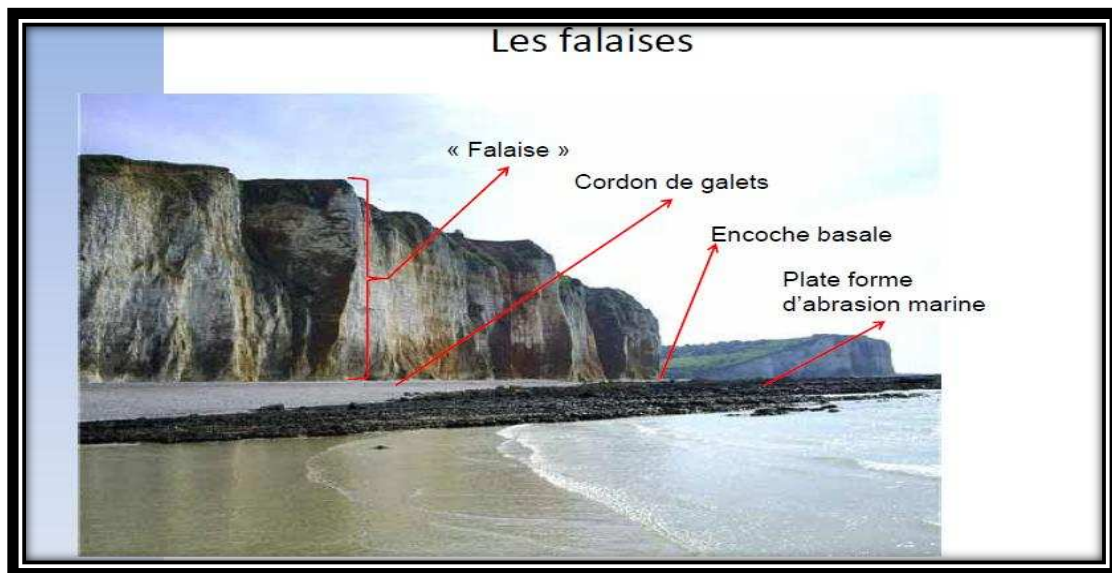


Figure II.3: Présentation d'une falaise littorale.

Elles peuvent être classées comme des falaises consolidées ou non consolidées.

-Les falaises consolidées (pente raide) présentent un profil plus vertical, reculent moins vite et ont tendance à être formées de roches cohérentes qui se déforment difficilement comme la

craie, le granite, le grès et le calcaire. Les couches de roches sont toujours disposées soit horizontalement soit verticalement. Ces falaises sont toujours taillées dans des roches cohérentes, elles atteignent souvent des tailles honorables. Elles sont souvent de grande taille les plus hautes falaises, qu'on appelle méga-falaises, dépassent les 600 mètres et certaines atteignent 1 kilomètre (Figure. II.13).



Figure II.4: Méga-falaises de 1005 mètres à “Umilehi Point” à Hawaï.

-Les falaises non-consolidées ont une pente moins raide et sont formées de roches meubles, moins résistantes ou de matériaux non consolidés tels que l’argile ou le sable (**Collins & Sitar, 2008 in Brière, C. ; 2003.**) (Fig. II.13), elles se déforment plus facilement et sont donc sujettes à de fréquents affaissements et éboulements. Dans les argiles, la pente atteint aisément sa valeur d’équilibre (45°), et dans le sable sec, la pente ne dépassent pas 30° . Lorsqu’elles sont soumises à des mouvements de masse, ces falaises peuvent prendre un aspect chaotique.

Ce type de falaise occupe une proportion importante des falaises dans le monde.

II.1.1. Les différents types de falaise

On peut distinguer deux types de falaises littorales :

Une falaise vive est soumise directement à l’action de la mer. Portion de littoral abrupt, elle domine les eaux d’au moins quelques mètres. Elle est précédée d’un replat, de largeur variable, recouvert par une faible profondeur d’eau : la plate-forme d’abrasion. Le plus souvent, la falaise vive est séparée

de la plate-forme d'abrasion par une encoche d'érosion creusée par le sapement des vagues et dont la profondeur et la hauteur peut atteindre quelques mètres. Le talus qui la surmonte évolue sous l'influence des processus gravitaires (éboulement, glissement) et du ruissellement.

Une falaise morte, peu à peu séparée du rivage par des sédiments ou à la suite d'une baisse locale du niveau de la mer, cesse d'être une forme littorale vivante pour devenir un simple versant continental. Elle est séparée du trait de côte par une ceinture d'accumulation. Certaines falaises mortes peuvent être situées à plusieurs kilomètres du rivage.



Figure. II.5: Falaise peu consolidée formée de sable et d'argile qui représente notre zone d'étude.



Figure I.6 : différents types de falaises.

II.2. Evolution des falaises sous l'effet des facteurs meteorologique (les pluies)

A l'exception de périodes géologiques aux conditions extrêmes, qui ont donné naissance à des paysages bien caractéristiques, l'érosion naturelle s'équilibre avec la régénération du sol sous végétation dense et altération du substrat. Il peut cependant se produire l'érosion pluviale qui caractérisé par deux mécanismes : le détachement du sol sous l'effet de l'impact des gouttes ou **battance** et le transport par **ruissellement**.

II.2.1.la battance

L'eau de pluie dispose d'une énergie cinétique, lorsque'elle n'est pas interceptée et ralentie par les feuilles d'arbres, elle frappe le sol avec suffisamment de force pour écraser la partie superficielle d'un sol ou d'une roche meuble. Ces gouttes de pluies (ces gouttes libère l'énergie cinétique qui en moyenne 256fois (**Hudson, 1981 in Caplain, C. ; 2011**), plus grande que celle du ruissellement, appelée battance ou Splach, est conditionnée par l'intensité de la pluie et par la nature des affleurements: une roche dure, cohérente comme les calcaires ou le granite, n'est pas sujete aux actions de la battance.

L'impact de ces gouttes désagère et disperse les éléments superficiels meubles, et les éléments grossiers sont déplacés par les chocs et par rebondissements: les déplacements peuvent atteindre plus d'un mètre.

Les éléments fins sont mis en suspension dans l'eau et vont napper les éléments solides et aussi se produira un compactage du sol au dessus de la pellicule remaniée. Mise sous pression d'eau des falaises par le biais du réseau de fracturation, altération et/ou dissolution des roches.

II.3.2.le ruissellement

Il dépend de l'intensité de la pluie et de la vitesse d'infiltration. Si l'intensité de la pluie dépasse la vitesse d'infiltration, le sol refuse l'excès d'eau, qui alors ruisselle. L'écoulement de l'eau exerce un effort de cisaillement sur les particules à la surface du sol. L'énergie du ruissellement dépend de la vitesse et de la masse d'eau en mouvement. Après une forte pluie, les eaux empruntent les fissures du sol, les élargissent progressivement en chenaux parallèles qui fusionnent par écroulement des crêtes qui les séparent. En même temps, les têtes des chenaux reculent vers l'amont (érosion régressive). Le refus d'infiltration peut aussi provenir de l'affleurement d'une nappe d'eau ou encore de la formation d'une croûte imperméable par l'impact des gouttes de pluie.

Ces deux phénomènes sont influencés par des facteurs liés :

- Au climat.
- Aux caractéristiques intrinsèques du sol.
- A la topographie.
- Au taux de couverture végétale (appelé pourcentage de recouvrement par les agronomes).

II.3. Les différents types d'érosion de falaise par la houle

II.3.1. L'érosion mécanique

Les vagues agissent par leur propre choc, mais aussi par la mitraille de graviers, sables ou silex provenant des démolitions antérieures et qu'elles reprennent sur la plage. Ce mitraillage est le responsable du polissage des roches, caractéristiques de l'érosion marine. Ce faisant elles creusent une encoche de sapement (destruction de la falaise par la base) qui court dans le bas de la falaise. Cette action de choc est d'autant plus forte que l'obstacle est raide et doté d'une telle encoche. Celle-ci favorise les coups de piston.

Il s'agit d'un effet pneumatique qui joue chaque fois de la vague comprime l'air et l'eau dans ces poches rocheuses. Les coups de piston exercent des pressions considérables (jusqu'à 30 t/m²) qui se transmettent à l'intérieure de la roche provoquant des dégâts. Puis avec le retrait de la vague il se produit une véritable succion qui peut arracher des particules à la roche. Les faiblesses de la roche sont : fractures, zones de broyage, plans de stratification, différences de résistances.

II.4. Influence du forçage des vagues sur le recul de falaise

Pendant la première phase, comme les premières vagues sont des ondes longues, elles ne déferlent pas et elles se réfléchissent en majorité sur la falaise. Les vagues ne déferlent pas, la falaise est érodée par perte de la cohésion du matériau au niveau de la partie supérieure de l'encoche.

Lorsque le forçage de houle est bien établi, les vagues ont tendance à déferler au niveau du pied de la falaise. Les vagues arrachent du sédiment de l'encoche par-dessous souvent de manière très puissante car l'énergie des vagues n'est pas dissipée, il y a érosion directe par enroulement de bas en haut. La hauteur de l'encoche est plus importante que sa profondeur (hauteur de 5 cm et

profondeur de 4 cm). Les vagues réfléchies interagissent avec les vagues incidentes et vont éventuellement accentuer leur tendance à déferler. Les vagues vont continuer à s'enrouler dans l'encoche jusqu'à ce qu'un évènement d'effondrement se produise.

La partie surplombante de la falaise se déforme et des fissures apparaissent au sommet de la falaise jusqu'à ce que le bloc bascule en avant, ce qui est caractéristique d'un effondrement en tension.

Les trois ou quatre vagues suivantes érodent entièrement les débris de falaise qui sont redistribués sur la plateforme solide. L'apport sédimentaire généré par l'effondrement provoque le déferlement des vagues un peu plus au large de la falaise. Les vagues déferlantes génèrent des jets secondaires qui peuvent impacter la falaise ou engendrer des fronts turbulents qui érodent le pied de la falaise, une encoche est ainsi créée de hauteur (3 cm) plus faible que sa profondeur (4cm). (**Alixé, S. ; 2002.**).

Les évènements d'effondrement qui suivent libèrent du sédiment supplémentaire qui nourrit le fond sableux. Les vagues déferlent alors plus au large et leur énergie est de plus en plus dissipée. La morphologie du fond est alors sculptée par les vagues et le pied de la falaise est impacté par le jet de rive.

Chapitre II

Cadre général du site

Introduction

L'étude de l'évolution d'une région donnée se base sur la connaissance de plusieurs paramètres (la définir d'abord ensuite étudier les paramètres : **géologiques, hydro graphiques, climatiques, marins, anthropiques.....etc.**) qui peuvent nous donner les différentes étapes sur les quelles notre zone d'étude est passée et quel sont les différentes actions anthropiques qu'elle a subit et quelles sont les conséquences qu'on a abouti. Pour bien étudier l'évolution et la dynamique de la falaise de Boumerdès on a suivi la même stratégie.

II.1.Situation géographique

II.1.1.Wilaya de Boumerdes

La Wilaya de Boumerdes est une wilaya côtière située au centre du pays, elle s'étend sur une superficie de 1 456,16 Km² avec 100 Km de profil littoral allant du cap de Boudouaou El Bahri à l'Ouest (**Figure II.1**), à la limite Est de la commune Afir., sa population est de 802 083 habitant(**Source : Monographie de la wilaya de Boumerdes**).

Elle est délimitée :

- au nord, par la Méditerranée ;
- à l'ouest, par les wilayas d'Alger et Blida ;
- à l'est, par la wilaya de Tizi Ouzou ;
- au sud, par la wilaya de Bouira:

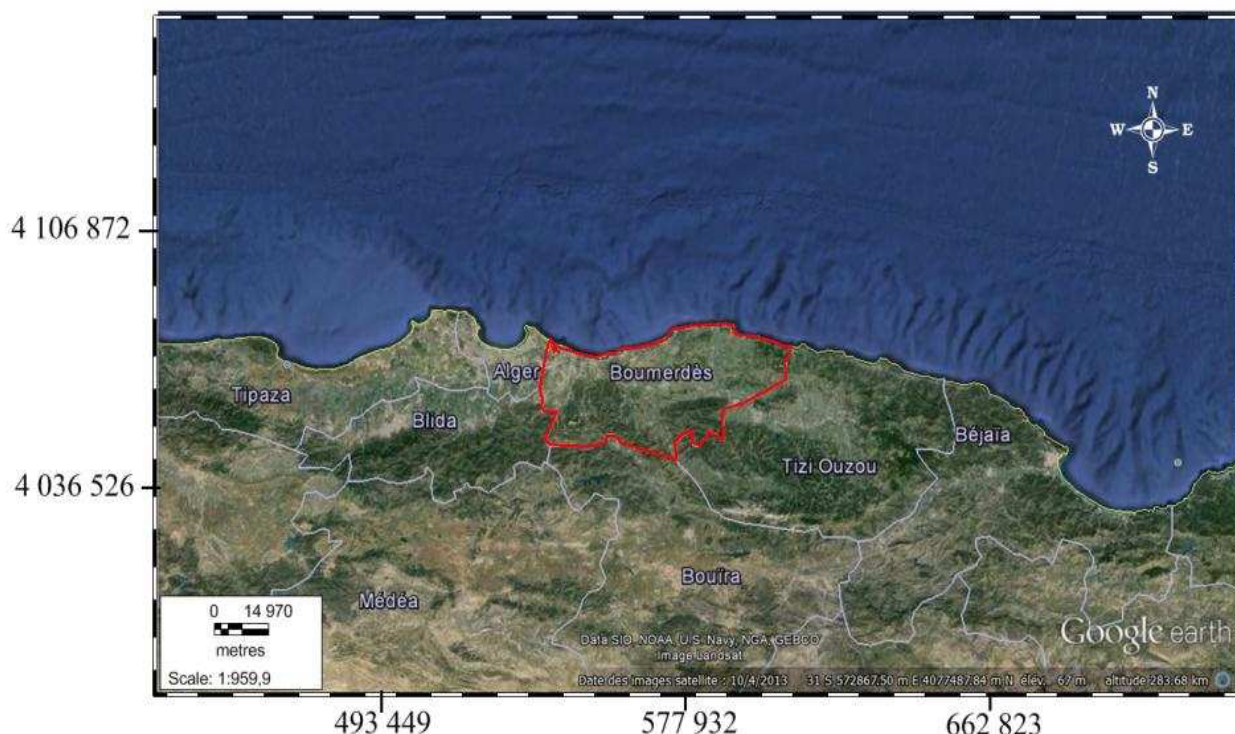


Figure II.1: situation géographique de la wilaya de Boumerdes, (Google Earth, 2014).

II.1.2.Site d'étude

La zone d'étude est dominée par le plateau Ouest de Boumerdes, elle se présente sous forme d'une falaise de 25 à 32 m de hauteur, elle s'étale sur 250 ml. Elle est délimitée :

- Au Nord, par La Méditerranée.
- Au Sud, par cité des 800 logements.
- A l'Ouest, par Boumerdes
- A l'Est, par le figuier.

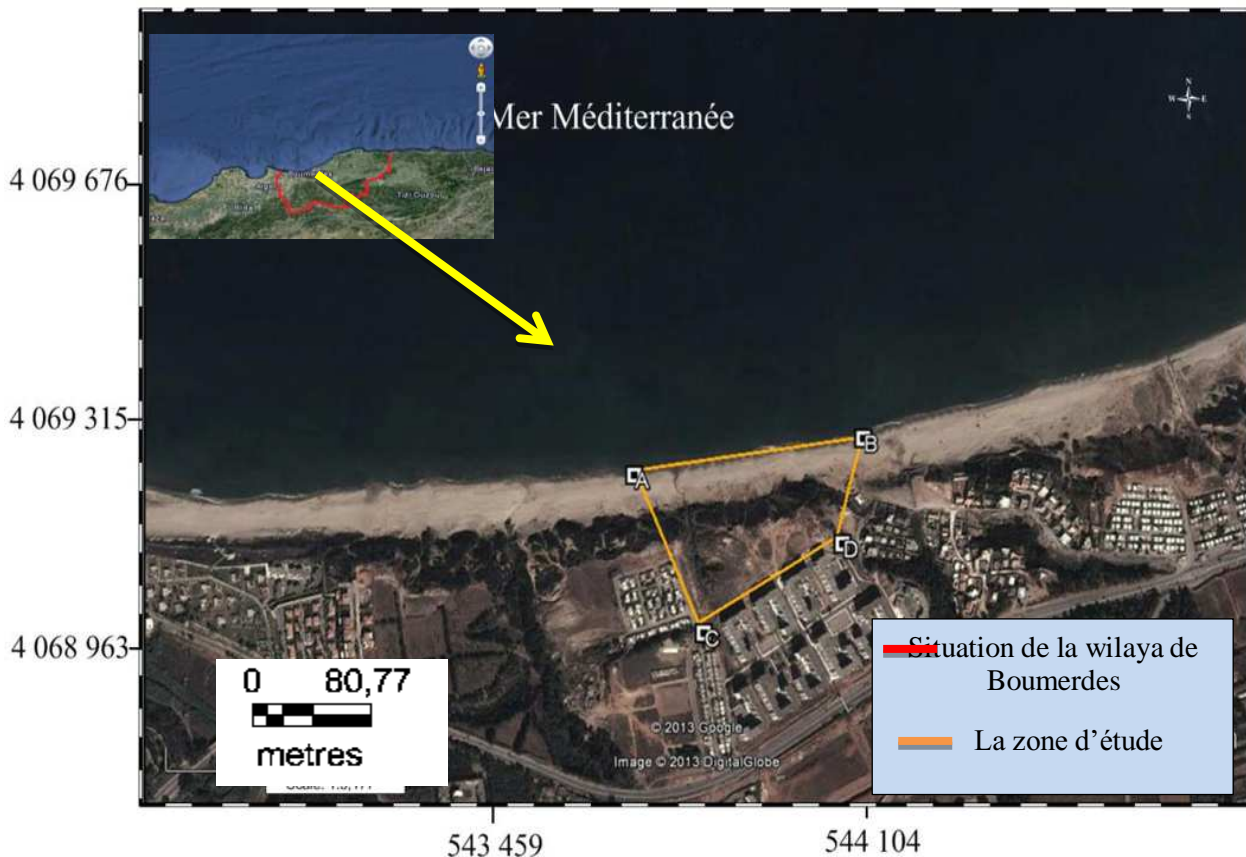


Figure II.2: Situation géographique de la falaise de Boumerdes (Google Earth, 2014).

II.2.Le cadre géologique et géomorphologique

La connaissance de la géologie et la géomorphologie locale du site permet de définir sa sensibilité face aux différents types d'agressions.

En effet, l'aspect géologique et géomorphologique apporte un complément indispensable dans le diagnostic de la zone d'étude.

II.2.1.Cadre géologique

II.2.1.1. Géologie locale

Introduction :

Le littoral de Boumerdes est caractérisé par la présence de plusieurs dunes actuelles mais aussi par des alluvions récentes sous forme de sable argileux au niveau de chacune des trois embouchures des oueds (qui sont actuellement urbanisés) dans notre région d'étude.

Le centre-ville de Boumerdes est constitué de sable rouge du Quaternaire sauf le long des oueds où on peut observer de la marne Plaisancienne et des dépôts récents d'alluvions (**Ouacif, 1995**).

a-Litho-stratigraphie

A partir des observations sur le terrain mais aussi la synthèse de diverses études géologiques on a pu décrire les formations suivantes :

- Le socle cristallophyllien (roche métamorphique et magmatiques)
- Les roches sédimentaires.

a.1.Le socle métamorphique (cristallophyllien)

Au nord du littoral de Boumerdes le socle affleure sous deux formes différentes :

A l'Est de la falaise de Boumerdes au Rocher noir, il est constitué essentiellement de schiste, de débitant en feuillets. En amont de l'oued Boumerdès, dans les zones altérées, le socle est de couleur jaune.

a.2.Les roches magmatiques

Dans la région de Boumerdès, les roches magmatique n'apparaissent que sur les deux rives de l'oued de Boumerdès (partie avale), le socle métamorphique est traversé par quelques dykes de granite et de pegmatite d'âge Précambrien.

a.3.Les roches sédimentaires

C'est un dépôt marin transgressif sur les terrains plus anciens. Il est représenté essentiellement par des marnes bleues compactes au sud de l'oued Corso et Tatareg. La surface parfois très altérée, peut présenter un aspect jaunâtre, friable, contenant des concrétions calcaires.

Les dépôts quaternaires sont d'origine continentale et marine. Ils se distinguent des terrains qu'ils recouvrent par leur caractère détritiques et sont présentés par :

- Les alluvions anciennes.
- L'ancienne terrasse marine.

- Les sables rouges.
- Les alluvions récentes.
- Les alluvions actuelles et plages sableuses littorales.

II.2.2- La géomorphologie

Le relief de la wilaya de Boumerdès se divise en plusieurs unités physiques : les plaines et les vallées au nord, les collines et plateaux dans la partie intermédiaire et les montagnes au Sud.

On distingue deux unités morphologiques caractérisant la zone côtière de Boumerdes:

-La falaise (notre zone étude): Elle s'étend sur environ 250 ml, avec une hauteur de 25 à 32 m du sud au nord. Elle présente un étagement du relief, le contact du plateau avec la zone basse s'effectue par l'intermédiaire d'un talus à pente rectiligne par endroit et convexe dans d'autre, et des dénivellations ne dépassant pas les 8 à 15m environ. Ce versant est aussi touché par l'érosion mais à une échelle plus grande qui est dû au développement des ravins sur le talus, et à sa base se trouve la plage. Cette falaise est caractérisée par une végétation intense de divers type vers l'Est du site.

-La plage : la largeur de la plage peut atteindre 25 à 35 mètres en moyenne en période hivernal.

Notre étude va s'intéresser à l'évolution d'une falaise dont le profil est modelé par des facteurs d'origines très variables, qu'elle soit naturelle ou anthropiques, terrestre ou marine quand va encadrer par la suite.

II.2.3 Lithologie

D'après les prospections géotechniques effectuées par LNHC (laboratoire national de l'habitat et de la construction) en 2004 et 2008 ; avant et après la construction de la cité 800 logements, par sondage carottier. On distingue 3 couches caractérisant notre site d'étude (falaise) :

- La 1^{ère} couche entre 0-5 m de profondeur : elle est constituée de remblais, et d'une formation argilo-sableuse, légèrement graveleuse, ocre (Argile souvent pulvérulente, colorée en jaune ou en rouge par des oxydes de fer) surmontant un facies de sable grossier et de graves à une matrice argilo-sableuse, ces formations ont pour assise le socle dur de la région formé de Schiste bleu, très induré en profondeur.
- La 2^{ème} couche entre 5.00m et 10.50 m de profondeur : elle est caractérisée par l'Argile sableuse, plastique, marron.
- La 3^{ème} couche entre 10.5 m et 15m de profondeur : cette couche est constituée du Sable grossier et graves à matrice d'argile sableuse, ferme, marron.

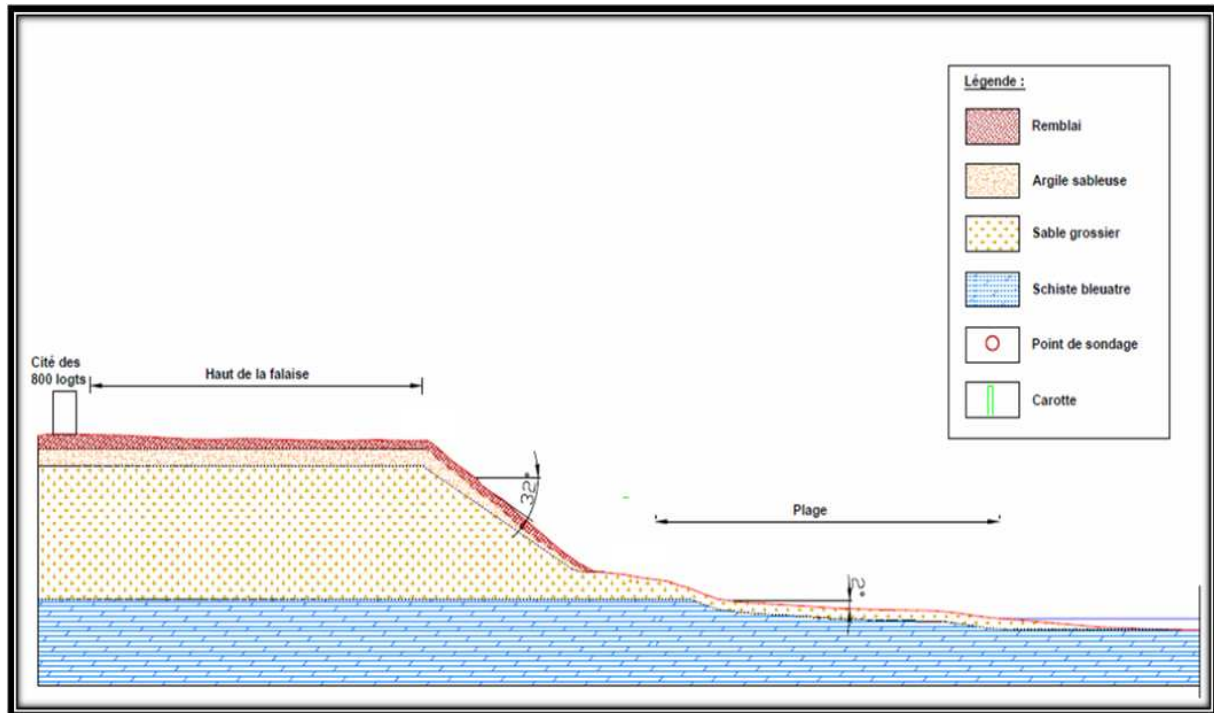


Figure II. 3 : Coupe lithologique de la falaise de Boumerdes (LEM, 2014).

Conclusion

On constate deux sortes de lithologie une de surface issue du démantèlement des formation préexistante (schiste à filon de quartz) caractérisée par un empilement de formation argilo sableuse à graves parfois très graveleuse, vers le bas, surmontés par des remblais d'épaisseur variable allant jusqu'à 5.00m de profondeur, ainsi qu'un substratum dur issue de roche métamorphique du socle représenté dans cette région par les schistes de couleur bleuâtre.

II.3.Contexte climatiques et hydrologiques

Les données climatiques et météorologiques présentent une grande importance pour les travaux maritimes. Certains mouvements de la mer, notamment les houles, dépendent exclusivement des vents, car ils sont générateurs de vagues et de courants superficiels, leurs impacts augmentent avec leurs vitesses. (Moulin et al, 1978).

II.3.1. Données climatologiques

La région de Boumerdes est soumise à un climat méditerranée sub-humide, caractérisée par une période hivernale pluvieuse (tempérée, douce et humide), parfois torrentielle ou les cours d'eau sont bien alimentés, et une période estivale chaude et sèche avec des cours d'eau presque à sec.

a. Température

La température est un facteur important qui est toujours pris en considération pour étudier une zone côtière donnée, dans notre cas on l'a pris en compte puisqu'elle intervient dans l'érosion de notre falaise, on a utilisé des données de l'Office National de la Météo (O.N.M) allant de 1996 jusqu'à 2005 (annexe I). Comme on n'a pas eu de données sur notre zone d'étude (Boumerdès), on s'est contenté des données de la wilaya d'Alger. (**Station** : Alger Dar El Bieda).

La température est soumise à l'influence de la mer qui adoucit le climat. On distingue deux saisons, une saison chaude qui s'étale de juin à octobre où les températures moyennes de l'air varient entre 20°C et 27°C, et se rafraichissent en novembre et une autre saison qui débute en décembre et s'achève en mars où les températures moyennes varient entre 11°C et 18°C.

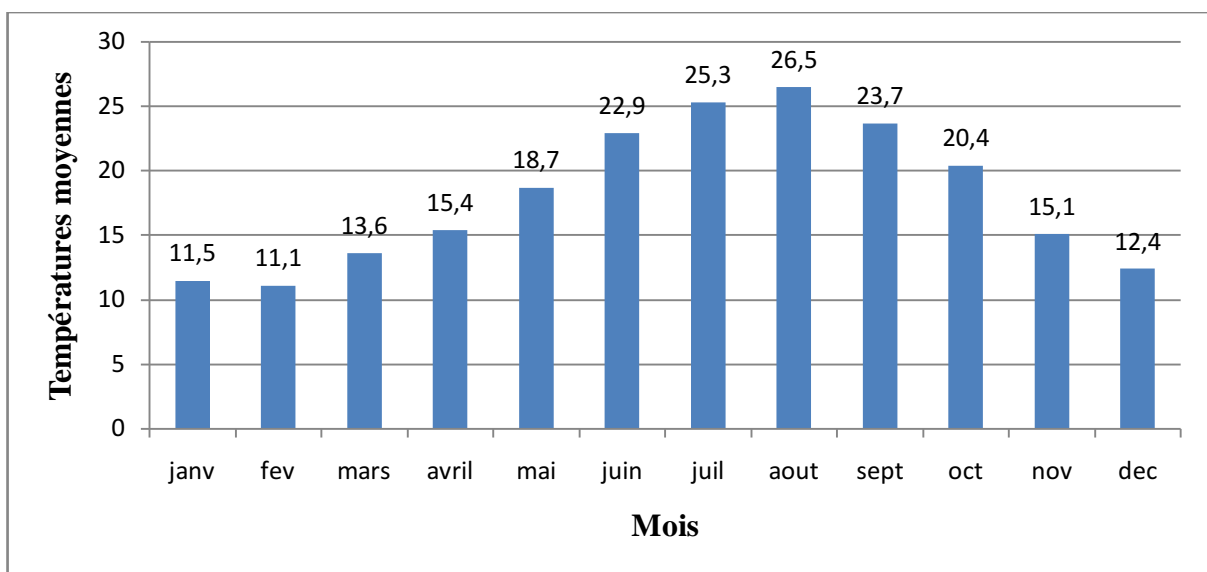


Figure II.4: Température mensuelles en (°C) de la wilaya d'Alger(O.N.M, Dar El Bieda,1996-2005).

On remarque très bien que la variation des valeurs de températures n'est pas vraiment large et que notre zone contient un climat doux tout ça est dû à son approximation à la mer.

Sur la figure suivante nous pouvons apprécier la variation moyenne des températures maximales et minimales entre 1996 et 2005.

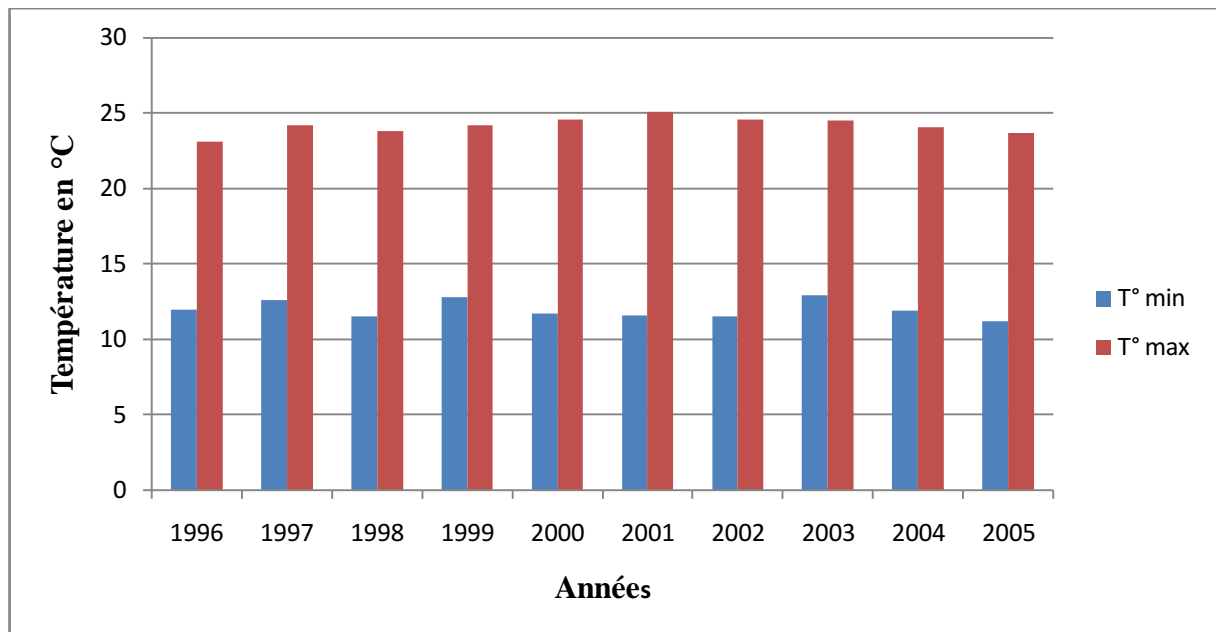


Figure II.5 : Profil de variation des températures moyennes de la wilaya d'Algiers(ONM, Dar El Bieda 1996-2005).

b-Précipitations

D'après les données de précipitation entre la période 1986 et 2008 fournies par l'ANRH, on peut dire que la région de Boumerdes est soumise à un climat méditerranéen connu par ces deux saisons bien distinctes :

- Une saison estivale sèche allant de Mai à Septembre (précipitation moyenne est 14,16 mm).
- une saison hivernale humide allant de mois d'Octobre à mois d'Avril (précipitation moyenne est 64,50 mm).

La moyenne des précipitations annuelles dans cette région est d'environ 522,15 mm. La moyenne mensuelle des précipitations le long de l'année est de 44,5 mm.

Ces données ont été représentées dans le diagramme suivant (Figure II.6)

Les résultats obtenus indiquent que le rôle des ruissellements a joué dans l'érosion de notre falaise est plus important que celui de la mer, et ça est dû à la construction des surfaces bétonnées qui ont donné naissance à des écoulements très tourbillonnants et que ces derniers ont engendré des ravins qui se remarquent sur la falaise et qui sont aujourd'hui le souci de notre étude.

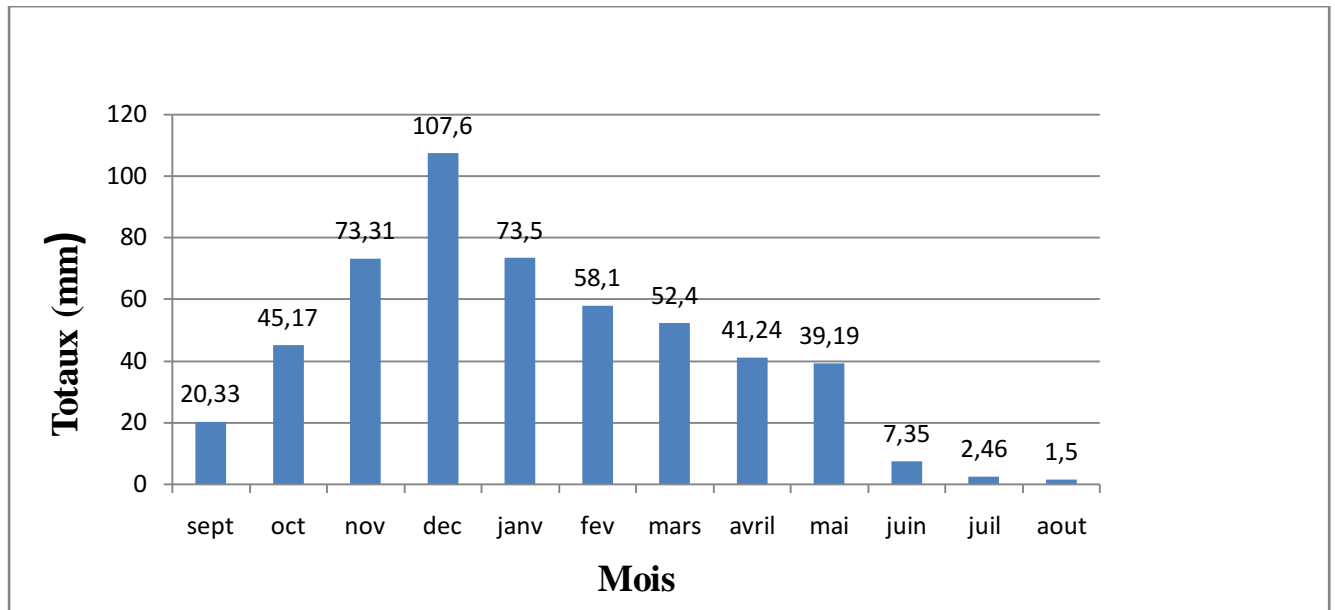


Figure II.6 : Moyennes mensuelles des précipitations de 1985 à 2008 dans la région de Boumerdes (A.N.R.H, 2014).

En plus de cette précipitation on a une saison sèche dans la température diminue, cette diminution est due au réchauffement climatique qui est causé par le phénomène «effet de serre »,ce dernier peut avoir des conséquences sur le couvert végétal de notre falaise et le sol, car pendant la saison sèche les sols s'étendent et s'effritent sous l'effet de la sécheresse et sont facilement transportés par ruissellement pendant la saison hivernale. Ainsi, l'absence de végétation et l'action des eaux de ruissellement et d'infiltration provoquent l'érosion et dégradation des falaises.

II.3.2. Données Hydrologiques

Lazone littorale de Boumerdès est alimentée par trois oueds essentiels qui sont :

- Oued Sébaou (bassin versant Bas Sébaou, d'une superficie de 2890km²) ;
- Oued Isser (bassin versant Bas Isser, d'une superficie de 3615km². Les apports solides inter-annuel entre 1954-1978 ont été évalués à 6332.444millions de tonnes) ;
- Oued Keddara (145,6 hm³, d'une superficie de 95km². Les apports solides inter- annuels entre 1968-1978 ont été évalués à 717,119 millions de tonnes (ANRH).

Comme on trouve aussi des petits oueds tel que : Oued corso qui présente un bassin versant d'une superficie de 82km² et un débit liquide moyen annuel de 20km³/an et un débit solide moyen de 0.1km³ et Boudouaou qui a une superficie de 150km² et un débit liquide moyen annuel de 37km³/an.

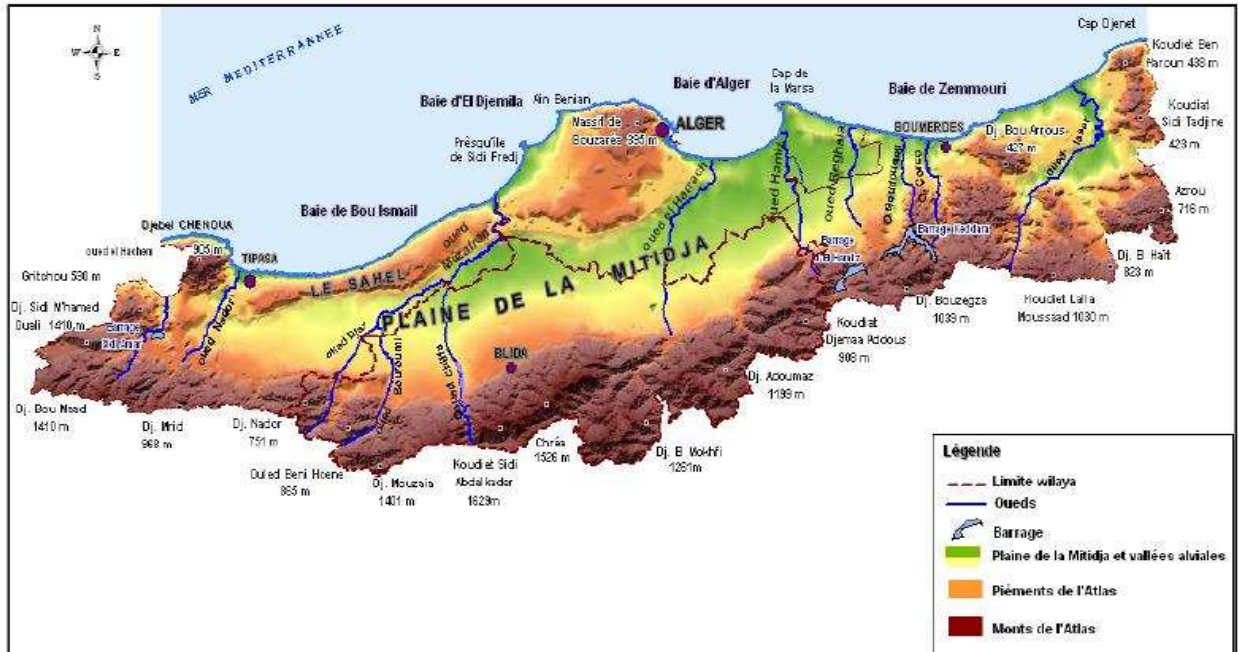


Figure II.7 : Carte hydrologique de la wilaya de Boumerdes, (Google Earth, 2014).

➤ Ressources souterraines

La wilaya de Boumerdes comprend de nombreuses unités hydrogéologiques avec plusieurs aquifères exploitées par l'irrigation, les plus importants sont, d'Ouest en Est sur la wilaya :

- Une portion Est de la nappe de la plaine alluviale de la Mitidja caractérisée par un aquifère multicouche avec nappes libres et aquifères profonds.
- Sur le littoral, deux formations dunaires du Sahel, qui possèdent des aquifères alluviales monocouches, libres et indépendantes des oueds. Ces formations ont des puissances et des réserves faibles.

Dans notre zone d'étude, le réseau hydrographique n'a pas d'effet direct, sachant que les cours d'eau les plus proches, à savoir oued de Boumerdes vers l'Est déverse dans la plage Est de Boumerdes, et l'oued Corso

II.4. Contexte hydrodynamique

II.4.1. Les données météorologiques

a. Le vent

Pour une région côtière, la connaissance des régimes des vents est une extrême importance dans la dynamique des eaux marines. En effet, ils sont des générateurs de vagues et de courants superficiels, leur impact croît avec leur vitesse (Moulin, 1978).

Ils jouent donc un rôle considérable dans l'évolution géomorphologique des milieux littoraux, surtout sur les côtes basses d'accumulations des régions à climat sec (**Boutiba, 1996**). Ce facteur joue un rôle considérable dans le transfert sédimentaire directement sur la partie aérienne et par les différents agents hydrodynamiques générés par celui-ci sur la partie immergée.

L'analyse du régime des vents dans la région de Boumerdes est effectuée à partir de 3 sources de données météorologiques :

- les données de la station de Dar El Beida de 1975 à 1984,
- les données de Medatlasde 1999 à 2004. (LEM).

a- Données de la station de Dar ElBieda (Période 1975 à 1984)

Ces enregistrements montrent que :

- Les vents de direction N 360° (fréquence 12%) présentent une répartition constante durant toute l'année.
- Les vents de direction N45° (fréquence 10%) sont dominants en période estivale s'étalant de mai à septembre.
- Les vents de direction N225° (fréquence 14.5%) et N 270° (fréquence 11.5%) sont dominants en période hivernale qui s'étale d'octobre à avril.

b- Données de Medatlas(1999-2004)

Les résultats de cette étude mettent en évidence une prédominance des vents provenant des directions Est-Nord-Est et Ouest-Sud-Ouest, avec des vitesses maximales qui atteignent 20m/s pour les directions comprises entre 240° et 270°N. Aussi pour les directions comprises entre 45° et 90°N on observe des vitesses de vent qui atteignent 16 m/s. (LEM).

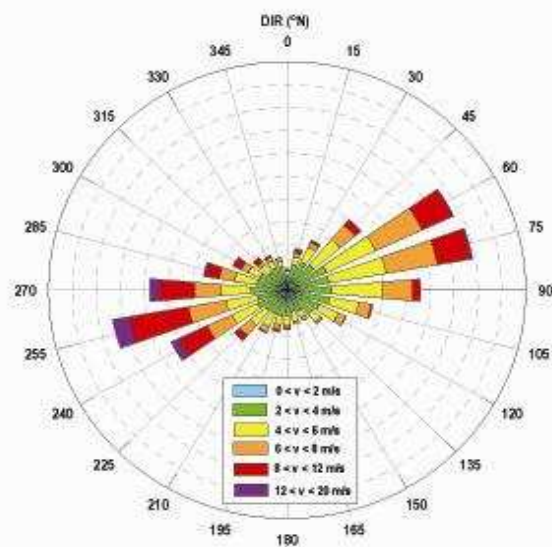


Figure II.8 : Rose des vents dans la région de Boumerdes (Medatlas, région centre 31N, 1999-2004).

II.5.2. Les données océanographiques

a. La houle

La houle est un agent fondamental des transports sédimentaires. En effet, d'une part, elle peut provoquer une remise en suspension et un déplacement des matériaux déposés sur les fonds et, d'autre part, elle engendre, lorsqu'elle est oblique au rivage, un courant littoral qui transporte des sédiments (Mezouar, 2009). Sur l'estran. La connaissance des caractéristiques de la houle au large : direction, amplitude, période, énergie.

Les données de la houle au large sont reprises d'un document intitulé « Summary of Synoptic Meteorological Observation » (S.S.SM.Tome2). Ces données s'étalent sur une période de 8ans de 1963 à 1970.(Annexe 3)

Une analyse statistique de ces données de base permet de définir les secteurs de la houle prédominants et leurs amplitudes respectives dans la région de Boumerdes. Des roses de houles sont établies saisonnièrement et annuellement. (Figure ci-dessous).

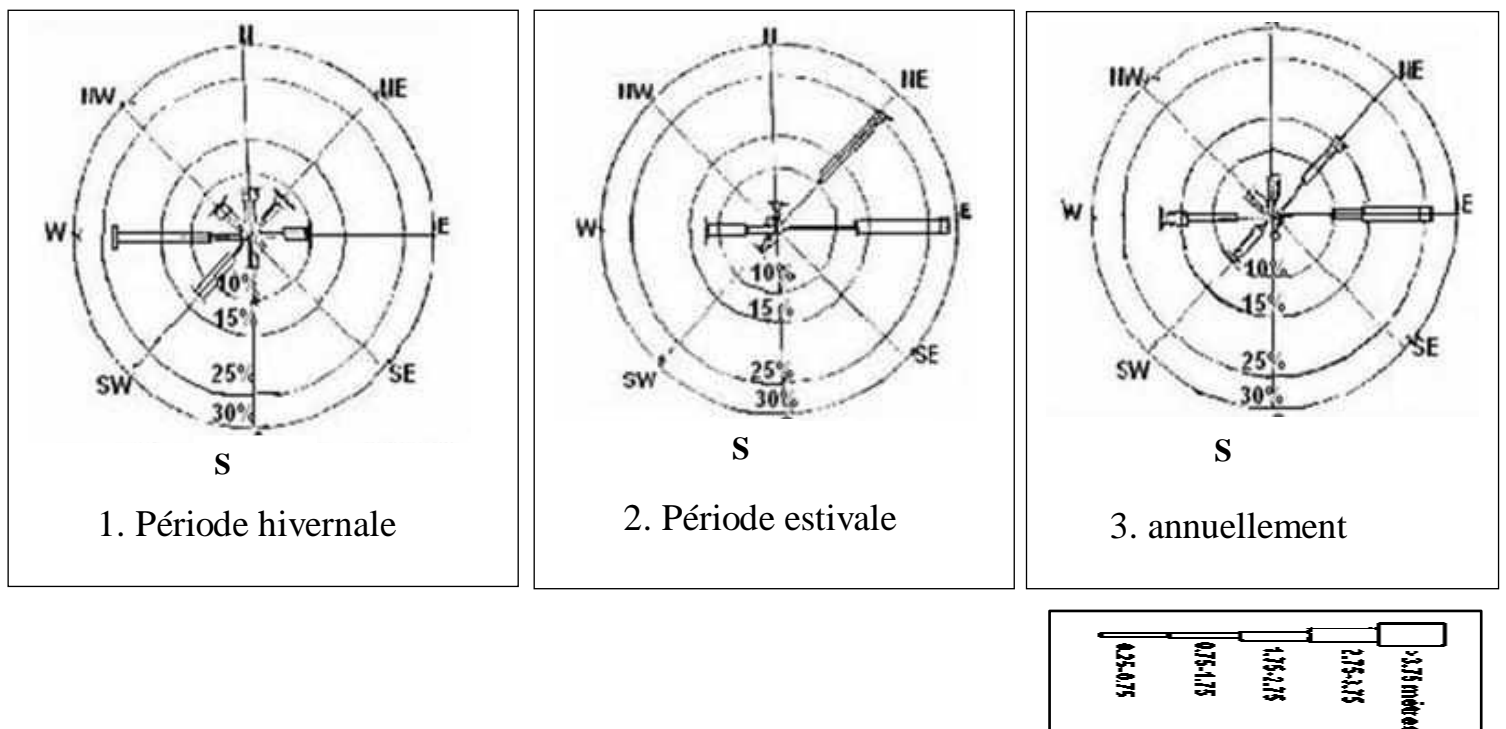


Figure II.9: Rose des houles (S.S.M.O,région centre 31N, 1963- 1970).

➤ **Fréquence d'observation par direction de la houle au large**

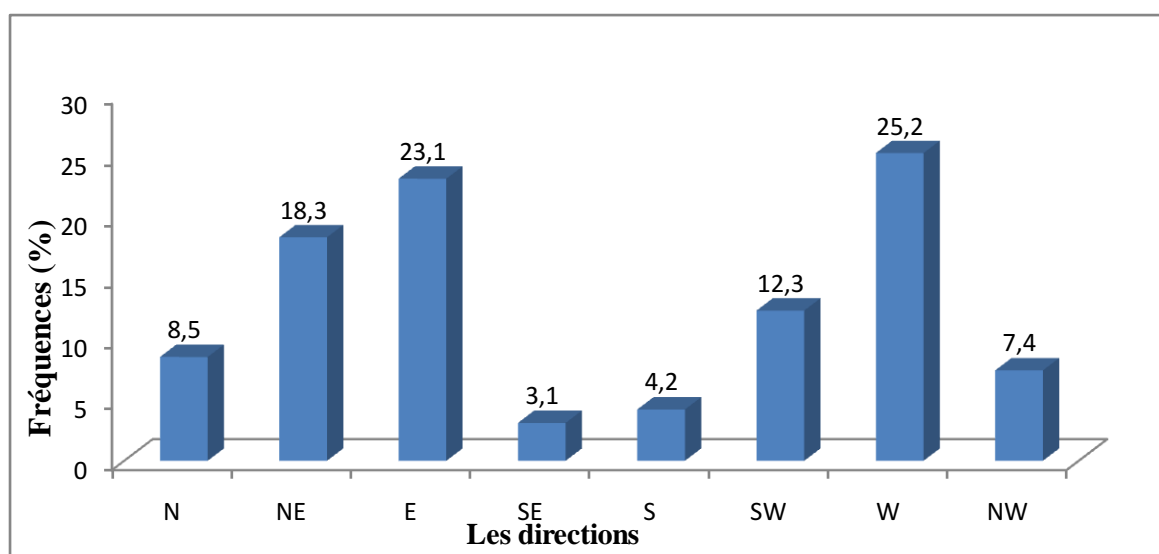


Figure II.10: Fréquence annuelle d'observation de la houle par direction au large (source S.S.M.O, région centre 31N, 1963-1970).

Tableau n°1 : Fréquences mensuelles de la houle du large (%) par direction (S.S.M.O, région centre 31N, 1963-1970).

Mois	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
Janvier	8.10	12.90	18.20	5.00	6.50	13.20	28.80	7.30
Février	8.80	10.30	12.60	4.00	6.10	16.90	35.60	5.80
Mars	11.30	12.60	15.80	3.60	4.50	12.30	30.50	9.20
Avril	11.70	15.40	16.00	2.00	4.40	13.70	26.70	10.20
Mai	8.20	26.30	31.90	3.00	3.30	7.20	13.90	6.20
Juin	9.20	29.10	29.80	1.80	1.40	8.20	16.40	4.20
Juillet	5.90	32.50	35.10	1.40	1.00	5.90	16.30	2.00
Août	8.80	27.70	37.30	1.90	1.10	5.00	13.40	4.90
Septembre	6.70	26.40	40.50	2.20	2.30	4.60	14.80	2.50
Octobre	7.80	14.10	20.30	3.20	4.20	14.80	28.80	6.80
Novembre	5.50	5.80	10.00	5.10	8.00	15.90	40.40	9.40
Décembre	10.20	6.20	9.40	4.60	7.50	15.00	37.10	10.00

Les houles d'Ouest, d'Est et de Nord-est sont les plus fréquemment observées. Les fréquences d'observations sur l'année des houles d'Est et d'Ouest sont sensiblement identiques avec une légère prédominance du secteur Est.

Les houles de tempête proviennent essentiellement du secteur Ouest. Les fréquences d'apparition sont plus faibles pour le secteur Nord et Nord-Ouest. Le secteur Nord a une répartition assez régulière durant l'année. (Tableau n°1).

Tableau n°2: Amplitudes des houles en fonction des directions et leurs périodes de retour(SSMO, région centre 31N, 1963-1970).

Direction	Nord	Nord-Est	Est	Ouest	Nord-Ouest
période de retour (m)					
Biennale	4.90	4.93	4.12	7.36	4.16
Quinquennale	5.75	5.67	4.70	8.43	4.87
Décennale	6.38	6.23	5.14	9.22	5.40
Vingtennale	7.02	6.79	5.59	10.02	5.94
Cinquantennale	7.87	7.53	6.17	11.08	6.65
Centennale	8.50	8.08	6.62	11.88	7.18

On constate sur le tableau précédent qu'en hiver les houles prédominantes sont de secteur Ouest avec une période moyenne de 8 à 9 secondes, des périodes supérieures à 10 s (pouvant atteindre 13s) sont relevées lors de grandes tempêtes. (Tableau n°2)

Tableau n°3 : Répartition des états de mer par période (SSMO,région centre 31N, 1963-1970)

Etat de la mer	Périodes de la houle					
	< à 6s	6-7s	8-9s	10-11s	11-12s	13s
calme	5,2	0,1	-	-	-	-
0	20,8	1,9	0,4	-	-	-
1	24,6	13,1	2,7	0,5	0,2	-
2	2,6	5,4	3,1	0,9	0,2	-
3	0,4	1,1	1,00	0,6	0,2	-
4	0,1	0,5	0,3	0,3	0,3	-
Total (%)	53,7	22,1	7,5	2,3	0,9	-

Les houles observées ont pour la majorité une période courte (pour 75% la période est \leq à 7s), seuls 3% des houles ont une période comprise entre 10 et 13s. (Tableau n° 3).

b-Les courants

Les courants jouent un rôle très important dans le transport sédimentaire, ils participent dans l'évolution des formes de la plage en conduisant à des ensablements et à des envasements et d'érosion (Larid, 1992).

b.1. Les courants généraux

Il longe la côte algérienne d'Ouest en Est, résulte d'un écoulement des eaux de l'atlantique à travers le détroit de Gibraltar avec une vitesse entre 0.5 à 2.5 nœud. (**SSMO**).

Ces courants n'interviennent pas d'une façon importante dans le phénomène d'érosion, mais ils jouent un grand rôle dans le transport en suspension et flottant des particules fines.

b-2-Les courants côtiers

La houle abondant le rivage engendre différents types de courants :

b-2-1-Les courants de retour

A la côte, les houles frontales du Nord, puissantes et fréquentes en hiver, engendrent des courants de retour dont la vitesse dépend l'énergie des houles et de la pente de la plage. Comme la plage est réduite en hiver, le déferlement à lieu presque au pied de la falaise, il s'ensuit une érosion mécanique intense par affouillement prononcé.

Les sables de la plage et les sédiments arrachés par la falaise sont repris par ces courants pour être déposés au large et créer de ce fait une situation d'amaigrissement. (**Kelai. F, 2005**).

b-2-2- les courants de dérive littorale

Ces courants de dérive littorale ne peuvent être effectifs que si la houle arrive à la côte avec une incidence oblique ou autrement dit avec un angle d'incidence compris entre 50° et 60°. Ce courant joue un rôle très important dans l'évolution des rivages, en particulier quand il s'agit de plage, et sa connaissance est essentielle lorsque l'on procède à des aménagements qui empiètent sur l'espace infralittoral (**Paskoff. R, 1973**).

Les vents de secteur Ouest et Nord-Ouest d'hiver et les houles induites Nord-Ouest provoquent une dérive littorale Ouest-Est avec une érosion intense de la plage Ouest de Boumerdes (**Mezouar.K, 2009**).

Pour les houles et les vents estivaux du secteur Nord-Est, la dérive littorale induite est moins importante, car l'angle d'incidence est inférieur à 50°, sauf qu'elle participe de manière faible à l'engraissement de cette plage et la trajectoire des courants de dérive littorale induite se fait d'Est en Ouest.

c-La marée

La marée est généralement est réduite en Méditerranée, mais présente d'importants écarts suivant l'époque lunaire. La marée de pleine lune est de l'ordre de 25 à 30 cm, celle de la nouvelle lune de 5 à 15 cm. La variation journalière observée sur les côtes algériennes est inférieure à 10 cm.

La différence entre la valeur moyenne maximale et minimale du niveau de la mer ne dépasse pas les 50 cm (**LEM, 2014**).

II. 5.Evolution du trait de côte

Le premier objectif de cette partie est d'observer et d'analyser les variabilités morpho- sédimentaire de notre site d'étude, à une échelle spatiotemporelle à court terme (pluriannuelle) par un suivie topographique et bathymétrique.

II.5.1. Méthodes et techniques utilisées

II.5.1.1.Les documents utilisés

L'analyse diachronique de l'évolution du littoral de notre site d'étude a été déterminée grâce à la comparaison de différentes cartes géographiques à différentes échelles.

On utilise des images satellitaires de Google Earth 2006, 2009, 2012 et 2014, pour obtenir des résultats plus significatifs concernant l'évolution de site, l'espacement (08 ans) pour la plage sablière de Boumerdés.

II.5.1.1.1.Méthode de traitement des photos

Le traitement des images a été effectué par l'utilisation des techniques numériques de traitement d'images. Ces méthodes sont désormais régulièrement utilisées dans l'étude des variations de la ligne de rivage). Les démarches de cette méthode suivent les étapes établies par Thieller et Danforth, 1994 (*in* Courtaud, 2000) : digitalisation de ces cartes satellitaires, corrections des distorsions, géo-référencement, restitution graphique et superposition multi-temporelle des traits de côte. L'ensemble des documents a été numérisé sous le logiciel *map-info*).

Pour chaque photographie, on a saisi les coordonnées (X et Y) de chaque amer et les coordonnées (X et Y) sur le document de référence. La qualité du calage repose entièrement sur la sélection des amers et elle dépend de ces facteurs : la précision avec laquelle sont déterminés les amers, la répartition spatiale et le nombre des amers. Ces derniers doivent être suffisamment nombreux pour assurer un quadrillage spatial homogène. Pour chaque photographie aérienne, au moins 10 amers ont pu être régulièrement déterminés. Après cette étape de correction, les images sont ensuite mosaïquées par année, créant ainsi une table couvrant l'ensemble de la plage.

II.5.1.1.2.Résultat

L'examen des images satellitaires de la plage sablière de Boumerdes à différentes années a permis de voir une réduction de la largeur entre le trait de côte et la falaise.

On assiste à une évolution assez variable, marquant des périodes d'engraissement et d'amaigrissement ; depuis 2006 ; on a noté 1,7m de régression du trait de côte vers l'ouest du site et un avancement de 1,8m vers l'est de la plage.



Figure II.11 : Evolution du trait de côte de la plage sablière de Boumerdes (Google earth, 2014).

II.6. Occupation du sol et type d'activités

Le changement de Boumerdès en ville autonome a fait développer l'urbanisme dans cette ville et ce qui a donné une occupation continue vers la côte et qui ne cessait pas de croître depuis 1985.

a-Population

Taux de croissance de la population entre 1998 et 2008 (date des deux derniers recensements de la population et de l'habitat), le taux d'accroissement annuel moyen de la wilaya était de 2,15 %.

L'élévation démographique de la wilaya de Boumerdès et son changement de statut ont donné une augmentation pour la dynamique urbaine (habitation, locaux de commerce, et infrastructures publics) des efforts considérables ont été déployés dans ce sens.

b-Tourisme

Les infrastructures touristiques apparaissent à la fin des années 1980, la route front de mer et les hôtels hauts standing ont été construits en 1987, suivis par la réalisation des locaux de commerces (restaurants, cafés).

c- Agriculture et le couvert végétal naturel :

Pendant la période coloniale jusqu'en 1973, 90% de la superficie des plateaux de Boumerdès étaient typiquement agricoles, les espaces côtiers, les talus bordant les plateaux et les vallées des oueds,

étaient occupés essentiellement par la végétation sauvage (maquis, broussaille et roseaux), au fur et à mesure que l'urbanisation prenait place, et le couvert végétal disparaissait.

II.7. Les agents de l'érosion observés

➤ La pluviométrie

La pluviométrie dans la wilaya est assez irrégulière ; elle varie entre 500 et 1 300 mm/an.

Les fortes pluies déstructurent superficiellement le substrat, puis éliminent par ruissellement les particules arrachées, ravinent le terrain et affaiblissent naturellement le talus ; ces effets sont les suivants :

➤ Le splash, la battance et le ruissellement

Les gouttes de pluie brisent les mottes et les agrégats et projettent les particules arrachées (figure n°32). Ce phénomène de rejaillissement sous l'impact, ou « splash », déplace les particules sur quelques dizaines de cm, la distance dépendant de la masse des particules et de l'angle d'incidence des gouttes de pluie par rapport à la surface. Les particules fines déplacées sont piégées entre les éléments plus grossiers et ferment les pores : la surface du sol perd de sa capacité d'infiltration et sur certains sols, il apparaît un litage qui lors de la dessiccation provoque une croûte de battance.

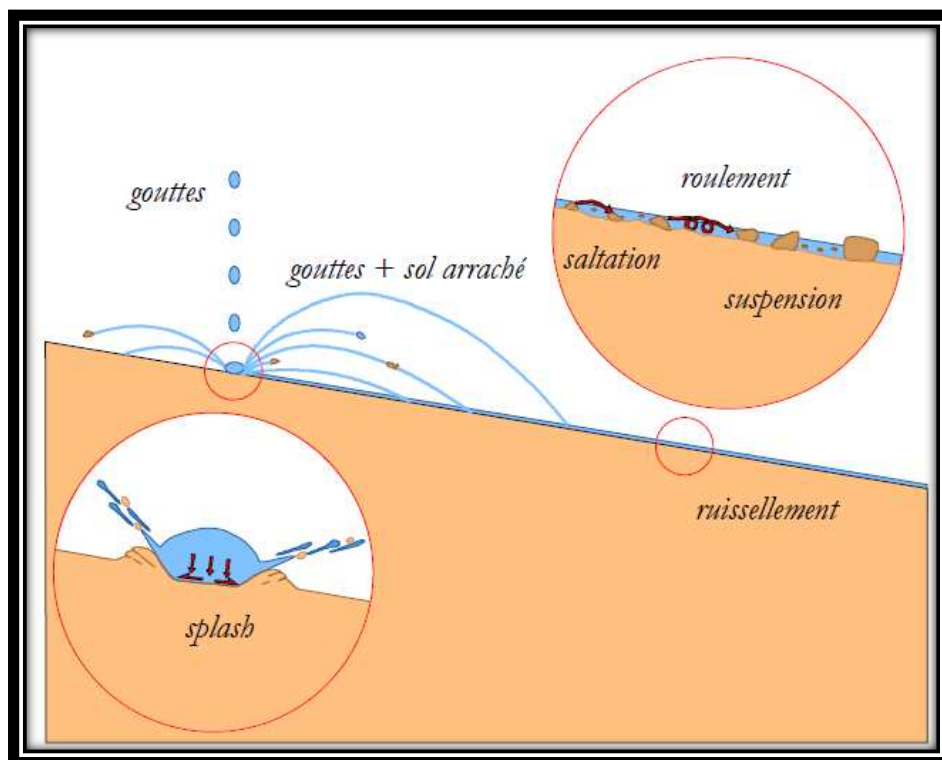


Figure. II.12: Les mécanismes de l'érosion pluviale.

L'eau exerce sur le sol une force de cisaillement qui arrache les particules puis les transporte. Les conditions d'arrachement, de transport et finalement de dépôt dépendent de la vitesse du courant et de la taille des particules. Il existe ainsi pour un sol donné une vitesse critique d'arrachement et une vitesse limite au-dessous de laquelle les particules sédimentent.

L'érosion se fait en nappe (érosion aréolaire) dans le cas de ruissellement diffus ; l'arrachement des particules est sélectif, il est produit par le splash sur l'ensemble de la surface, le transport est faible et le dépôt proche sous forme de colluvionnement (Figure. II.13).



Figure. II.13: Dépôt de colluvion au pied du talus et au niveau de la plage.

L'érosion en rigoles apparaît lorsque le ruissellement se concentre et acquiert un pouvoir d'arrachement suffisant pour mobiliser localement l'ensemble des particules.

Il se forme d'abord de simples griffures, puis des rigoles décimétriques qui peuvent évoluer en ravines métriques comme on l'a observé sur site (Figure. II.14).



Figure. II.14 :Formes d'érosion pluviale observées.

➤ Les facteurs intrinsèques du sol

La structure : les différentes structures sont plus ou moins sensibles à l'érosion. Si on les classe en allant vers une sensibilité croissante, on obtient : structure grumeleuse – finement polyédrique - polyédrique moyenne à grossière - en bloc, feuilletée ou massive. La dite falaise est de nature polyédrique moyenne.

- **la granulométrie** : les sols les plus sensibles à l'érosion sont les sables fins et les silts. En effet, pour ces sols, les particules de faible masse sont aisément transportées par le ruissellement ; c'est ce qui a été confirmé par l'étude géotechnique, la couche superficielle du remblai (mélange de terre végétale, matériaux de construction et de déchets de tous types....) ne peut qu'accentuer ce ruissellement superficiel.
- **la composition chimique** : l'influence de la composition chimique du sol et également de l'eau de ruissellement a été mise en évidence. Ainsi le carbonate de calcium fait flocculer les argiles et augmente la cohésion du sol. Le sodium, lui, les disperse et diminue donc la cohésion du sol. Des valeurs allant de 1-7% issues de l'étude géotechnique viennent à rajouter à l'instabilité de la falaise, certes des valeurs assez faible mais auxquelles on ne peut les négliger.
- **l'état de la surface du sol** : la formation d'une croûte sous l'effet de la battance diminue l'infiltration. La rugosité de la surface diminue la vitesse du ruissellement mais les irrégularités peuvent créer des passages privilégiés qui seront autant d'amorces de ravines (Figure.II.15).



Figure. II.15:Etat de surface de la falaise.

➤ **Les facteurs topographiques :**

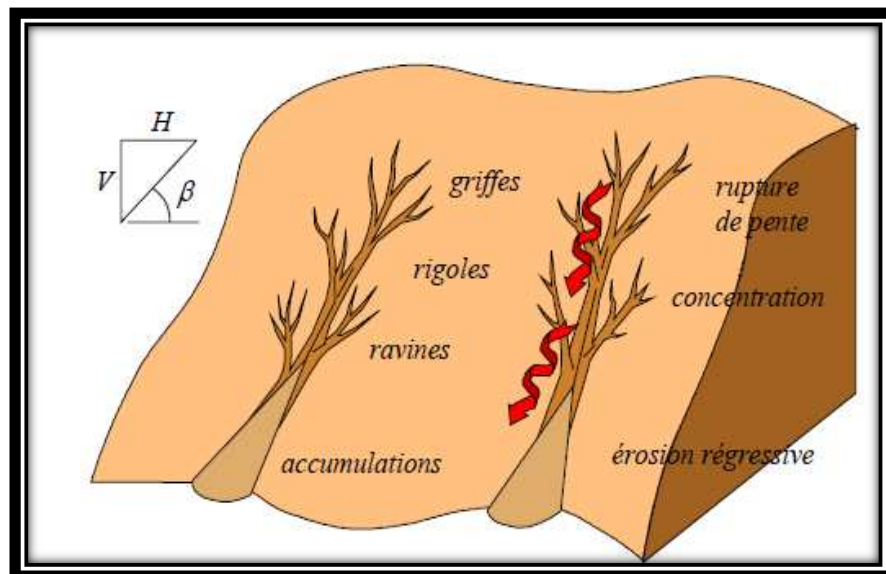


Figure.II.16 : Géométrie d'un talus érodés.

- **l'inclinaison :** les transports de sol croissent de façon exponentielle avec l'inclinaison de la pente. La falaise présente une pente moyenne qui forme avec le plan 28° à 36° par endroit. Donc sa difficulté à lutter contre l'érosion.

Tableau n°4: Relation entre la pente d'une falaise et sa difficulté à lutter contre l'érosion.

Talus H/V	Angle β	Difficulté à lutter contre l'érosion
3/1	18,4°	faible
2/1	26,6°	faible
3/2	33,7°	moyenne
1/1	45,0°	moyenne
1/2	63,3°	forte
1/5	78,7°	très forte
0	90°	à voir

- **la longueur de la pente :** En principe, plus la pente est longue, plus le ruissellement s'accumule, prend de la vitesse et de l'énergie et plus l'érosion s'intensifie. Mais en raison des irrégularités du terrain ceci n'est pas toujours vérifié dans la réalité. Pour notre cas, la longueur de la pente est assez importante entre 30-50m par endroits.
- **la forme de la pente :** Les pentes concaves sont moins sensibles à l'érosion que les pentes convexes. La forme générale de la pente est concave.

Conclusion

Il s'agit d'un phénomène complexe où plusieurs paramètres jouent un rôle controversé : la capacité d'infiltration, qui est relative à la nature de la falaise, de la pente et des facteurs climatiques de la zone. On assiste à une érosion pluviale, conjuguée à une érosion marine qui peut attaquer le pied de la falaise en période hivernale. Les techniques de lutte contre l'érosion pluviale doivent s'attacher à améliorer ou modifier ces éléments pour limiter l'action de l'eau (battance et ruissellement) ; de la pente et de la nature du sol.

Chapitre III

Etudes, Méthodes, résultats et
discussions

Introduction

Ce chapitre rassemble les différentes études effectuées et recueillies sur notre zone d'étude (partie sous-marine et partie aérienne), pour ensuite définir la nature des solutions qu'on va proposer en fonction des résultats obtenus.

A savoir ceux élaborées par le laboratoire d'Etudes Maritimes (LEM) et ceux effectuées par nous-même en utilisant les résultats des investigations sur terrain du LEM.

III.1. Etudes topo- Bathymétriques

Introduction

Dans le cadre de l'étude de protection de la falaise des 800 logements la Direction des Travaux Publics de la wilaya de Boumerdes, a confiée au LEM, une campagne d'investigations comprenant des levés topo bathymétriques et des prélèvements d'échantillons de sédiments, ont été réalisées par l'équipe de reconnaissances du LEM (CTS) au niveau du site d'étude. (Centre de Travaux sur Site)

En raison des conditions météorologiques défavorables et notamment une mer généralement très agitée, cette campagne a nécessité trois interventions réparties sur la période comprise entre le 06 octobre et le 30 décembre 2013.

III.1.1. Etude topographiques

La connaissance de tous les facteurs intervenant dans l'érosion de notre falaise nécessite à l'étude de plusieurs paramètres y'est compris la topographie, cette dernière joue un rôle fondamental pour la détection de la source du problème voulu rédigé.

Un levé topographique détaillé de la falaise et des ouvrages existants, réalisé sur une bande côtière de 400 mètres linéaires avec une longueur moyenne de 100 mètres, s'étalant du rejet d'eaux usées à l'Ouest jusqu'au début du camp de surveillance militaire qui constitue ainsi la limite Est, ont été ainsi levés tous les points constituant le haut et le pied de la falaise, les points intermédiaires ainsi que les accès, les talus, les constructions existantes. La surface topographique totale levée est de 9 hectares.

Ce levé topographique a été effectué à l'aide du GPS en mode RTK/OTF. Le récepteur GPS cinématique en temps réel (RTK) permet de mesurer un point à quelque centimètre près

Ce récepteur mobile, porté par le topographe au moment du levé, fonctionne en mode RTK (real time Kinematic), résolution des ambiguïtés en mode OTF. Il reçoit les données des satellites et de la station de référence simultanément et fournit instantanément la position très dimensionnelle du point à une précision inférieure à cinq centimètres (5cm).

Le transfert et le traitement de données sont réalisés sur logiciel TGO (trimble Geomatic office).

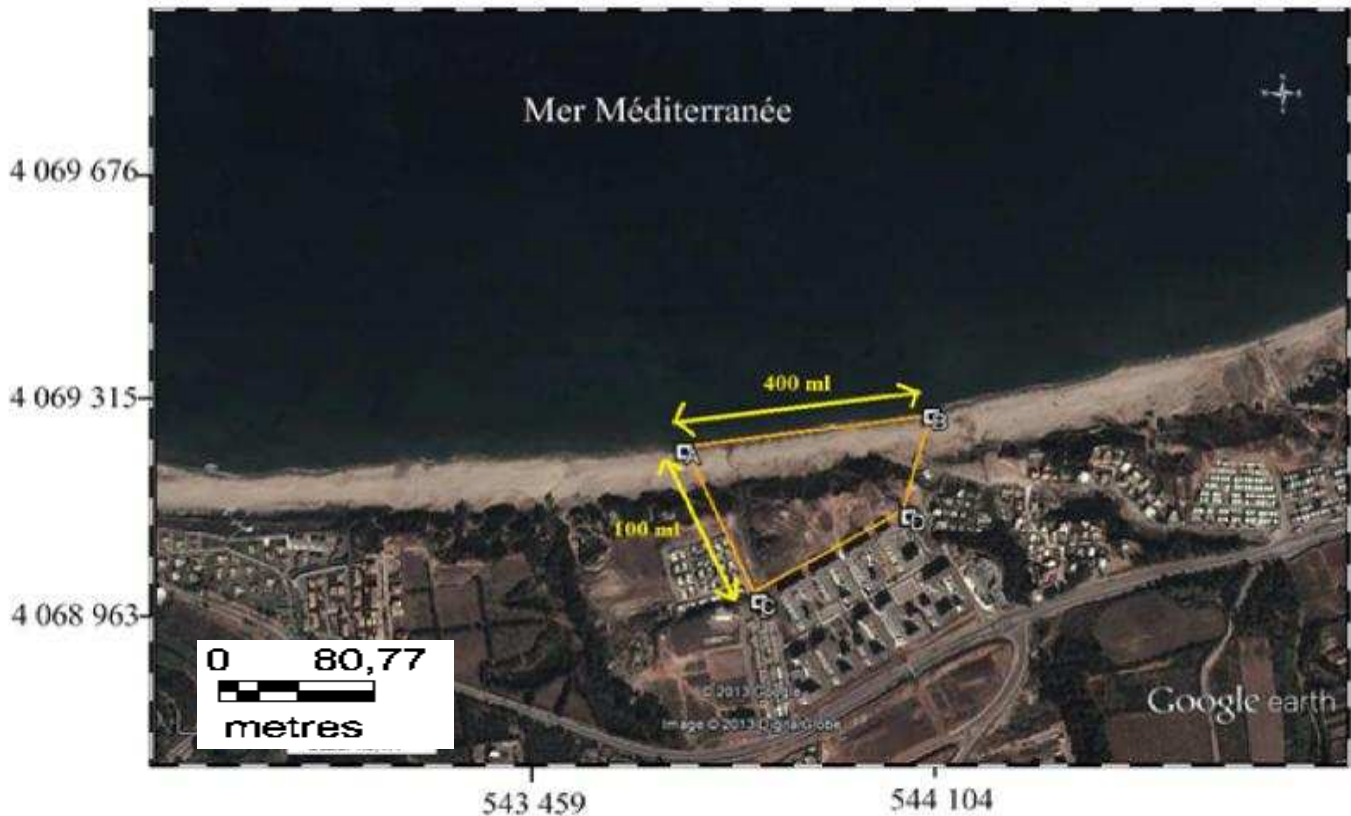


Figure III.1 : Levé topographique de la falaise de Boumerdes, (Google Earth, 2014).

➤ L'analyse de la carte topographique

En utilisant les résultats topographiques obtenus nous ont permis d'obtenir une carte sur laquelle apparaît notre zone d'étude (la falaise) qui s'étale sur une longueur de 400m et une largeur de 100m, une hauteur qui arrive jusqu'à 32m.

Au milieu de notre site se trouvent certains ravins que leur résolution est l'objectif de notre étude, ces derniers semblent être le résultat de la conjugaison de plusieurs facteurs anthropiques et naturels.

Deux sources d'eau potable ont été recensées, ainsi que la présence d'un rejet d'eau usée.

III.1.2. Etude bathymétrique

Les fonds marins constituent généralement le prolongement naturel des structures terrestres, il y a souvent donc une relation étroite entre la géomorphologie du littoral et la topographie générale des fonds.

L'analyse bathymétrique sur la base des cartes établies à partir des points de sondes relevés sur terrain (résultats de la campagne bathymétrique) ainsi que l'analyse de quelques profils rendant compte de la morphologie sous-marine sont développées ci-après.

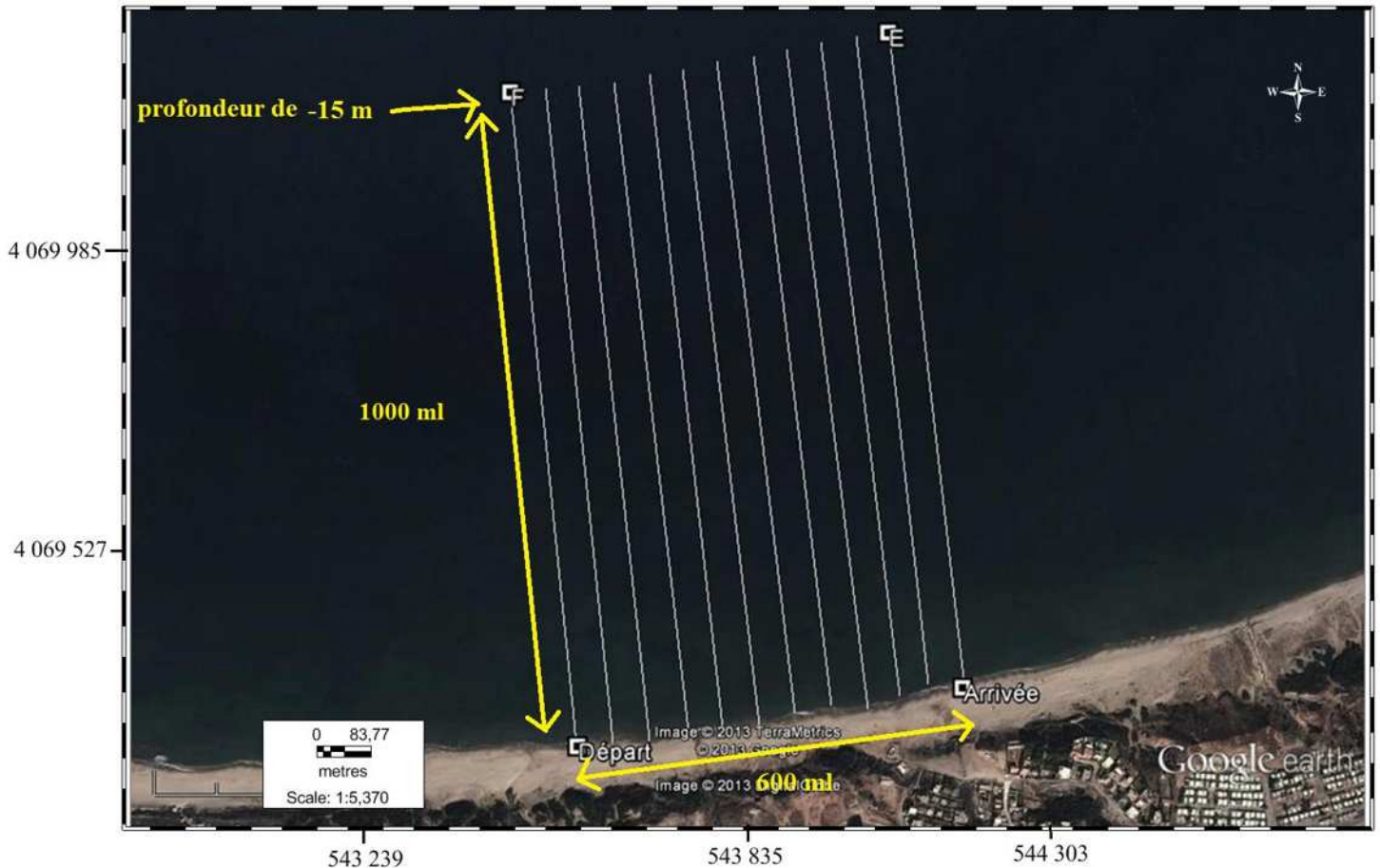


Figure III.2 : Levé bathymétrique de la plage sablière de Boumerdes (Google Earth, 2014).

III.1.2.1. Travaux sur terrain

Les travaux ont consisté en un levé bathymétrique de la zone d'étude, exécutés suivant des profils parallèles réalisés avec un maillage de 500 *1000 mètres et ceci sur 100 stations dans le cadre de l'élaboration de la carte sédimentaire de la wilaya de Boumerdes. Ce levé bathymétrique servira entre autre de bathymétrie d'approche entre 0 et -15 m à l'étude de réfraction.

a. Moyens

a.1. Moyens humains

- 01 chef de mission
- 01 ingénieur topographe
- 01 plongeur

- 01 marinier
- 01 chauffeur

a.2. Moyens matériel

- 01 station totale LEICA.
- 01 échosondeur.
- 01 embarcation pneumatique.
- 01 moteur hors-bord de 25 chevaux.
- 01 système de communication radio (talkies walkies).
- 01 lance avec flexible.
- 02 lots complets de matériel de plongée.
- 03 bouteilles de plongée.
- 01 micro-ordinateur portable.
- 01 véhicule utilitaire.

a.3. Rattachement des levés

Altimétrie et planimétrie : Les cotes des levées sont rattachées en altimétrie au zéro hydrographique (ZH). Un canevas de points de polygonisation a été afin de définir un système local de coordonnées devant servir de base aux levées à réaliser, on a utilisé un système géodésique ws84.

b. Mode opératoire

b.1. Mesure des sondes

Les sondes (profondeur d'eau) sont mesurées d'une manière continue par un échosondeur de haute précision installé sur un rapport nautique (embarcation pneumatique). La précision est de l'ordre de 0,5% de la profondeur indiquée.

Les profondeurs sont obtenues sur papier graphique de l'échosondeur. Les tops qui sont donnés par la station à terre et marqués à intervalles régulier sur le papier graphique et digitalisés sur l'écran, serviront de base au dépouillement des écho-grammes de l'échosondeur. Avant chaque intervention, l'appareil est étalonné à étalonnage est renouvelé deux fois au cours de la journée et lors de brusques variations des conditions météorologiques.

b.2. Position des sondeurs :

La position spatiale de l'embarcation est déterminée en continu et en temps par la station totale « LEICA » installée sur des points connus en coordonnées (station de polygonisation). Les réflecteurs embarqués sur le support nautique sont installés le plus près possible du transducteur pour permettre une meilleur précision de positionnement des sondes. La précision du positionnement donné par la station totale est de l'ordre de trois centimètres.

La station à terre et l'embarcation sont en communication permanente grâce à des émetteurs récepteurs qui permettent la synchronisation parfaite des « tops » de positionnement avec ceux de l'échosondeur. La station à terre et l'embarcation sur le profil à réaliser et enregistrer à intervalle régulier les coordonnées spatiales des sondes ainsi que le niveau d'eau (z des réflecteurs).

III.1.2.2. Traitement des observations

a. Transfert

Le dépouillement des observations est entièrement informatisé grâce à l'utilisation de la station totale de marque « LEEICA » d'interface de transfert, des logiciels « GMSTED sous Windows ». Après enregistrement des observations sur la mémoire interne de l'appareil, le transfert est lancé à travers un câble « RS232 » vers l'ordinateur en utilisant le logiciel « GMSTED ».

A l'aide du logiciel « Topocad », le changement des observations issues du transfert est effectué dans une base de données TXT. Ainsi l'ensemble des conventions de format utilisées par la station LEICA, lié à la nature des mesures (angle vertical, angle horizontal, distanceetc.) est décodé.

b. Calcul des points du semis et sortie du plan bathymétrique

A l'aide du module de calcul topo métrique, le canevas et le semi de points sont calculés automatiquement. Toutes les données altimétriques sont rattachées au ZH. Le fichier définitif est ensuite utilisé par le module « D.A.O » pour la sortie du plan à l'échelle voulue.

c. Report des levés

Le plan est élaboré à l'aide du logiciel « Topocad ». Le report totalement automatisé est réalisé à l'aide des modules suivant :

- Le module « D.A.O » pour tout ce qui est de la rédaction des plans
- Le module « modèle de surface » pour générer le « M.N.T » (Modèle Numérique du terrain)
- Le module « courbe de niveau » pour la représentation en plan des isobathes.

d. Exploitation des données obtenues

Les résultats obtenus par les levés bathymétriques et topographiques sont exploités dans l'élaboration des cartes bathymétriques en 2D ou en 3D ainsi que des profils de la plage (arrière-plage et plage sous-marine), ceci à l'aide du logiciel Surfer 8.

III.1.2.3. Description du logiciel

Le logiciel Surfer 8, conçu par Golden Software, permet de réaliser des modèles numériques de terrain (MNT) issus des données récoltées sur le terrain via GPS, théodolite....Le principe de Surfer est le suivant :

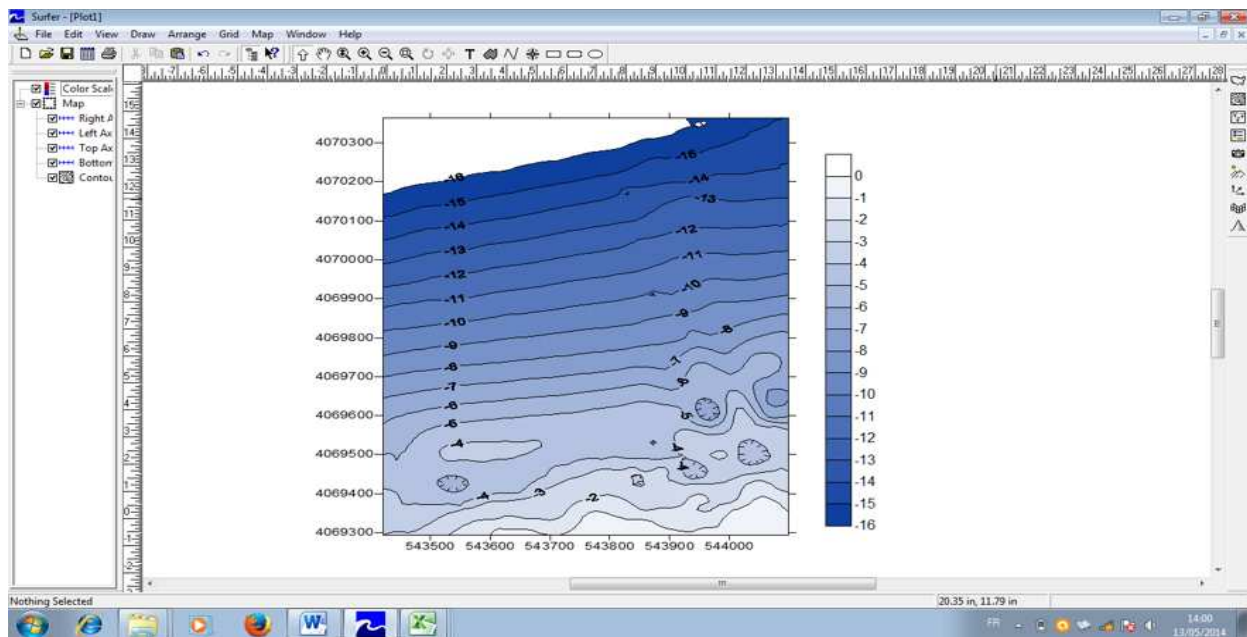
Le logiciel crée des grilles qui interpolent les données irrégulières des points (x, y, z) afin de les ordonner, c'est à partir de ces grilles que l'on pourra obtenir plusieurs types de cartes : Base Map, Contour Map, 3D surface, Vector et bien d'autres.

III.1.2.3.1 Manipulation sur surfer

1-Préparer les données bathymétriques et topographiques dans une feuille d'Excel (respecter les valeurs négatives pour la bathymétrie et positives pour la topographie, ainsi que le format mettre des virgules non pas des points et surtout mettre le fichier au format Excel 2003 pour éviter les problèmes de comptabilité entre les différentes versions de Surfer 8,9,10 et 11).

2-Créer une grille en allant dans :

Grid=>Data et parcourir le fichier Excel puis cliquer sur ok.



3-Une fois la grille est créée, aller dans « Toolbar Options ».

4-Pour l'obtention des cartes des isobathes en 2D cliquer sur l'icône n°1 et parcourir la grille obtenue en 2 et pour les cartes bathymétriques en 3D cliquer sur l'icône n° 3. Enfin pour localiser les stations de mesure, cliquer sur l'icône n°2 et là on doit parcourir le fichier Excel directement et stations apparaissent.

III.1.2.4.Résultats d'analyses bathymétriques

Les cartes bathymétriques constituent un document fondamental et nécessaire pour connaître et interpréter les morphologies sous-marines.

Une carte bathymétrique près de la côte a été établie après interpolation des minutes du levé bathymétrique réalisé par le LEM en 2013. Ce levé couvre les fonds de la côte jusqu'à une profondeur d'environ -16m (Figure III. 3).

L'analyse globale de la carte bathymétrique indique que entre -7m et -15m les lignes isobathes sont plus ou moins régulières, espacées et parallèles à la côte presque'elles ont les même distances. Elles s'élargissent traduisant ainsi l'adoucissement de la pente en allant vers le large et en deçà, on note un espacement de plus en plus réduit entre de ces derniers de l'Est vers l'Ouest.

A l'approche du rivage entre 0 et -7m la bathymétrie est faible et variation de la morphologie sous-marine ou présence des petites cavités et la plupart de ces dernières se trouvent dans la partie Est, aussi il y a une élévation de 1m entre les isobathes -4m et -5m qui a participé à son tour à ce décalage de distance. Cette partie est caractérisée par une morphologie rocheuse avec des pentes douce et qui témoigne d'une mobilité relativement importante sous l'action hydrodynamique.

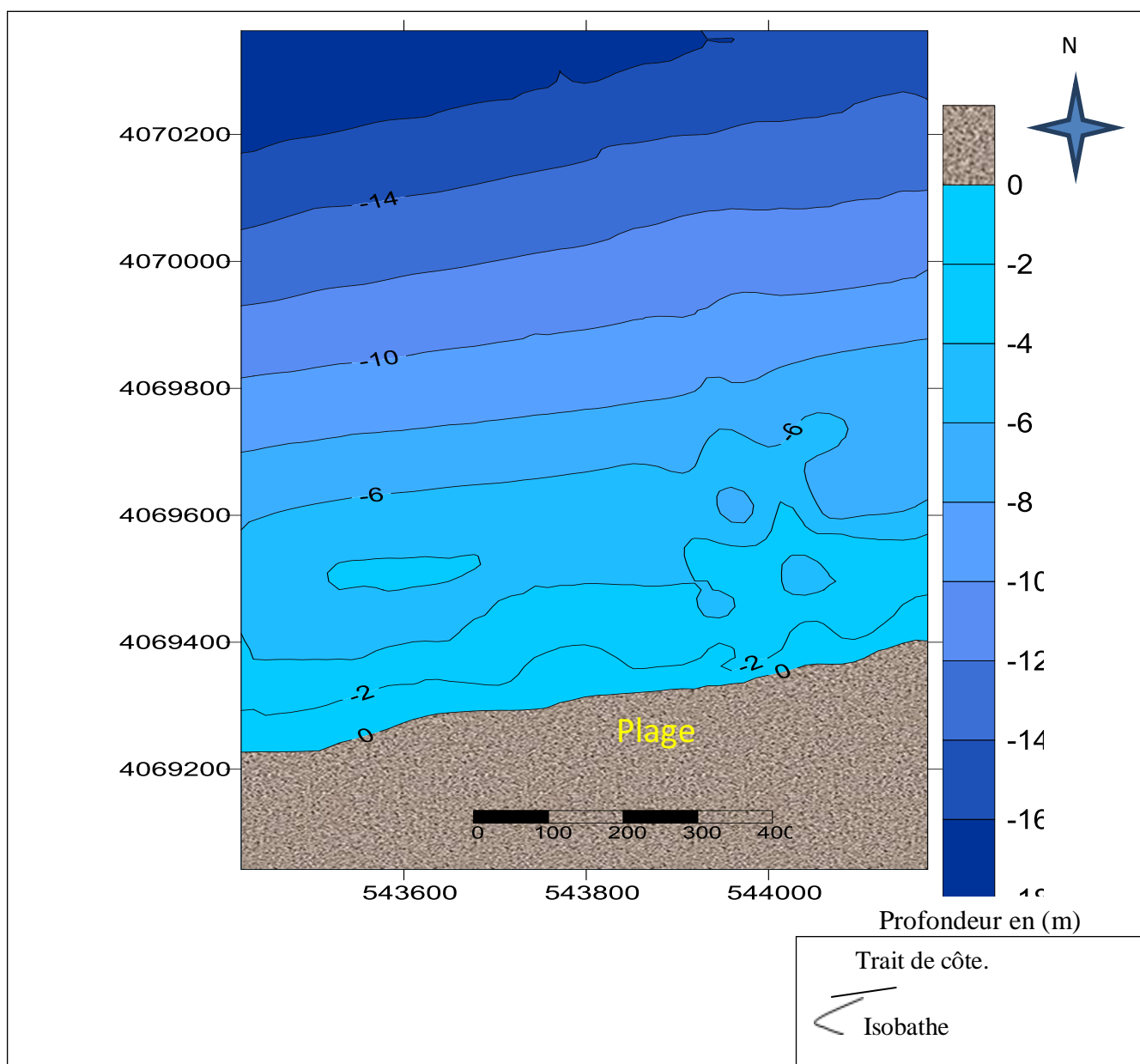


Figure III. 3 : Bathymétrie de la plage sablière de Boumerdes en 2D

Sur cette figure on distingue deux parties :

- **la partie sous- marine** : elle indique que l'estran se prolonge en mer par une avant- plage en pente relativement douce. On note aussi des cavités peu profonde dans la partie Est.

La vue en relief met en évidences la présence de barres sous -marines appelées barres avant côtes. Ces barres se constituent par le déferlement des houles longues ou la profondeur diminue pour provoquer ce déferlement. La morphologie sous-marine légèrement chahutée dans la partie Est entre les profondeurs -2 à -6 mètre.

-**la partie aérienne** ou se situe notre falaise

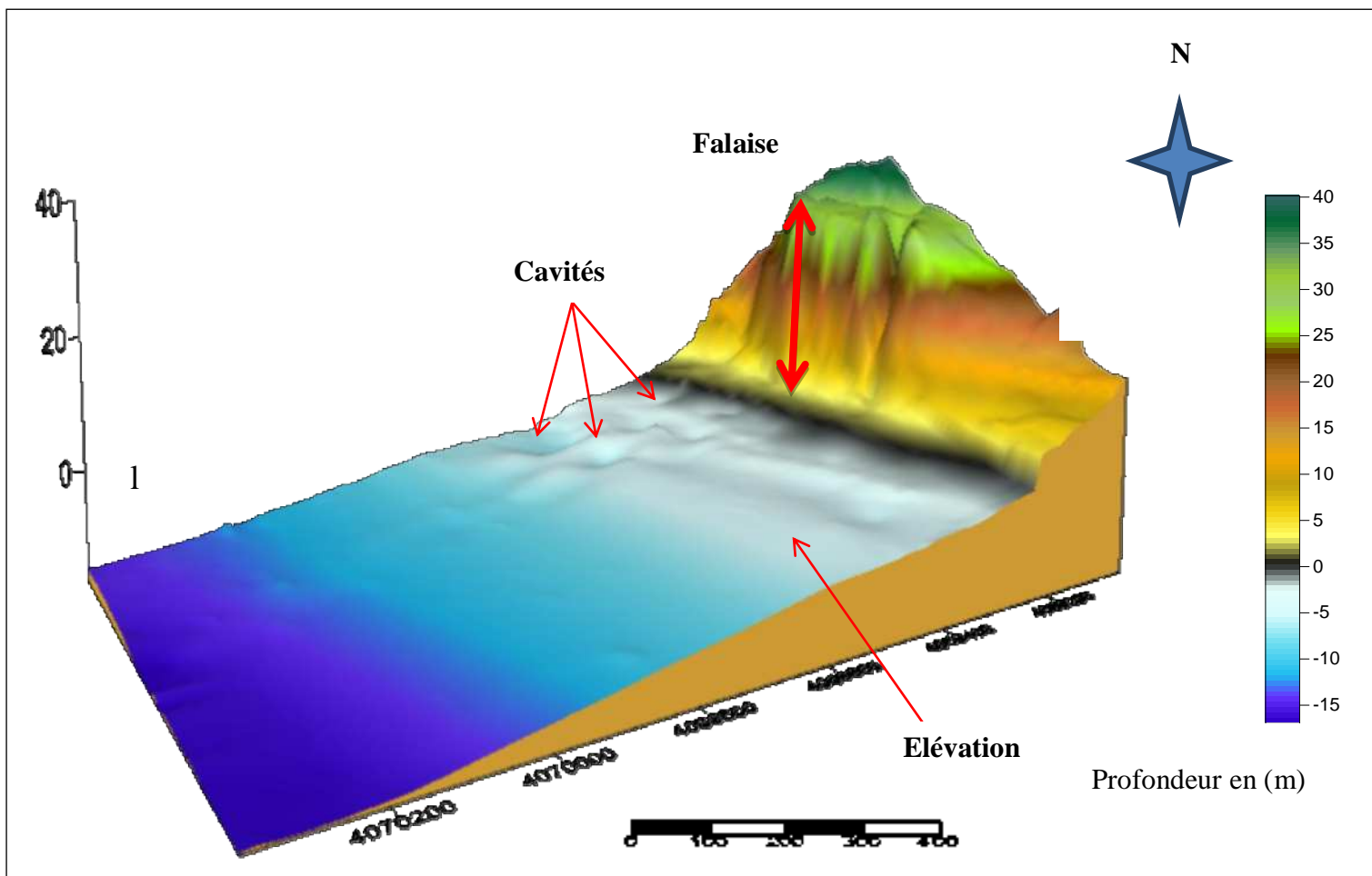


Figure III.4 : Carte bathymétrique en 3D de la partie sous-marine et partie aérienne.

III.1.2.5 Les profils transversaux

Quatre profils sont tracés sur la carte bathymétrique afin d'étudier au mieux la morphologie sous-marine et comprendre l'évolution du fond de la côte vers le large (annexe n°1).

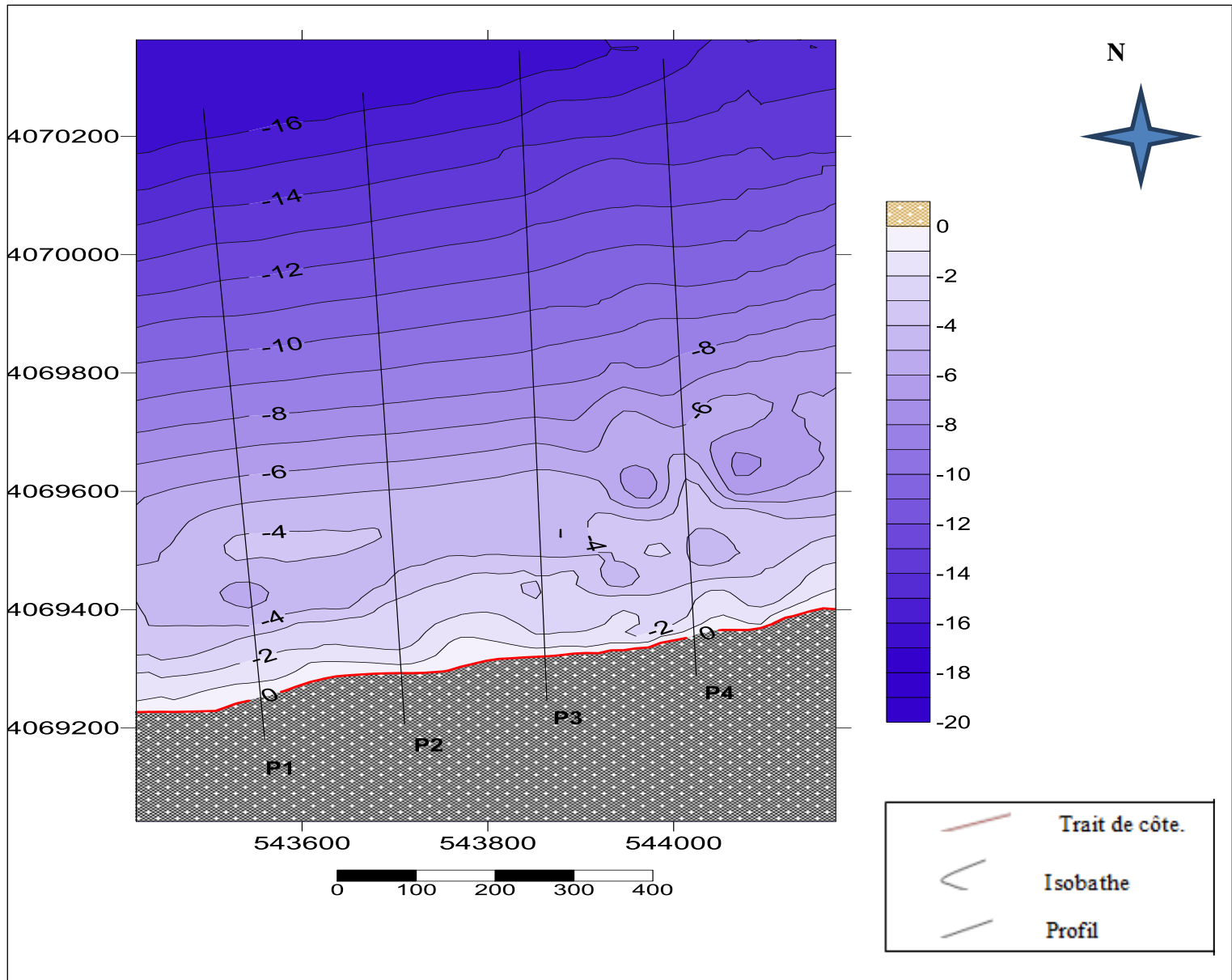


Figure III.5 : Carte bathymétrique interpolée et localisation des profils transversaux.

Remarque :

La partie annexe n°3 comporte les levés topographiques et bathymétriques de notre zone d'études au format A3.

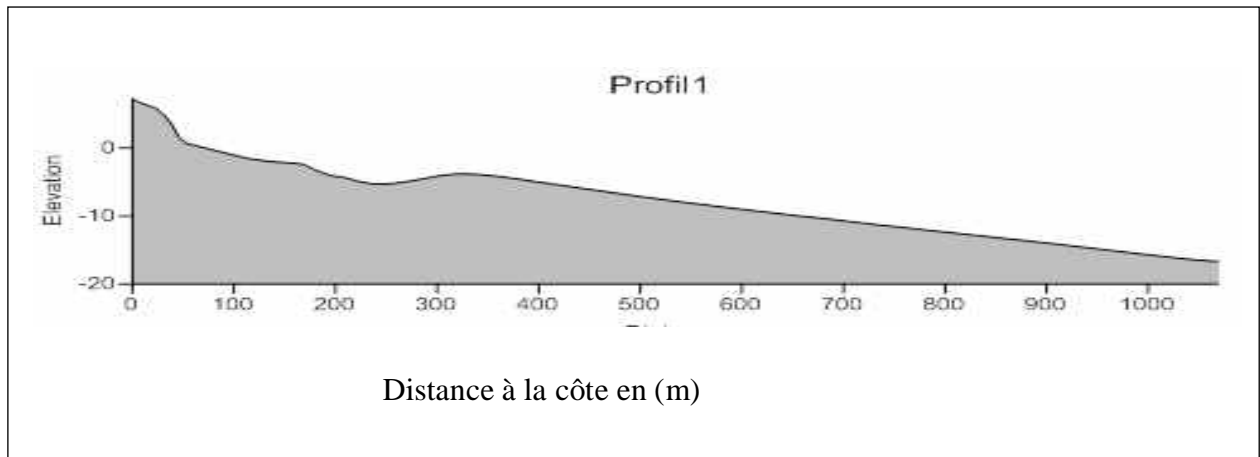


Figure III.6 : Profil sous- marin n°1.

- **Profil 1 et 2 (partie Ouest)**

Le niveau marin commence à 2 ou 3 m de profondeur ; il est représenté par un replat s'étendant sur 80 m par rapport à la côte. Il entame sa descente avec une pente estimée à 4% jusqu'à environ 7 ou 8 m de profondeur puis s'accroît en poursuivant sa descente vers le large avec une pente moyenne de 8%.

- **Profil 3**

Le profil descend en pente douce jusqu'à 2 m de profondeur, on distingue une cavité étroite, à 270 m de la côte et d'une pente assez douce estimée à 3%.

- **Profil 4 et 5 (Partie Est)**

Le profil évolue normalement en pente douce de 4%, elle s'adoucit à partir de 5 mètres de profondeur où la pente est estimée à 0,8% jusqu'à 8 m de profondeur. Une cavité observée à 140 m de la côte. Au-delà de 8 m de profondeur la pente moyenne est de 3,5%.

Conclusion

D'une manière générale, la morphologie sous-marine du site se caractérise par un talus à pente moyenne évaluée à 5% jusqu'à environ 6 m de profondeur, cette pente s'accroît vers le large et atteint une moyenne de 10% avec toutefois la présence de rides d'avant côtes et des fosses peu profondes à l'approche de la côte.

Cette étude a révélé que l'action des vagues n'atteint pas notre falaise (la pente est douce), à l'exception des périodes hivernales lorsqu'on a des grandes tempêtes,

N.B : l'annexe n°2 comporte les autres profils.

III.2. Etude sédimentaire

III.2.1. Introduction

L'analyse des données sédimentologiques ne consiste pas seulement à définir les caractéristiques des sédiments. Ces seuls éléments conduisent à une image statique des phénomènes dont l'examen permet de dégager les traits généraux des mouvements sédimentaires (à partir de l'évolution des divers indices granulométriques).

La synthèse des données concernant tant les sédiments que les facteurs hydrodynamiques permet de définir les conditions d'érosion, de transport, de dépôt et de répartition des sédiments sous un terme général, la *dynamique sédimentaire*.

III.2.2. Points de prélèvements

Les prélèvements ont été effectués au niveau la zone qui se trouve en face notre falaise d, dans le but d'avoir une vision globale sur la granulométrie du site. Cette étude a été effectuée sur 100 échantillons de sédiments superficiels prélevés en mer à l'aide d'un plongeur avec un scaphandre autonome, envoyé sur le fond, une fois remonté, le sédiment est récupéré dans des sacs en plastique étiquetés et reportés au laboratoire.

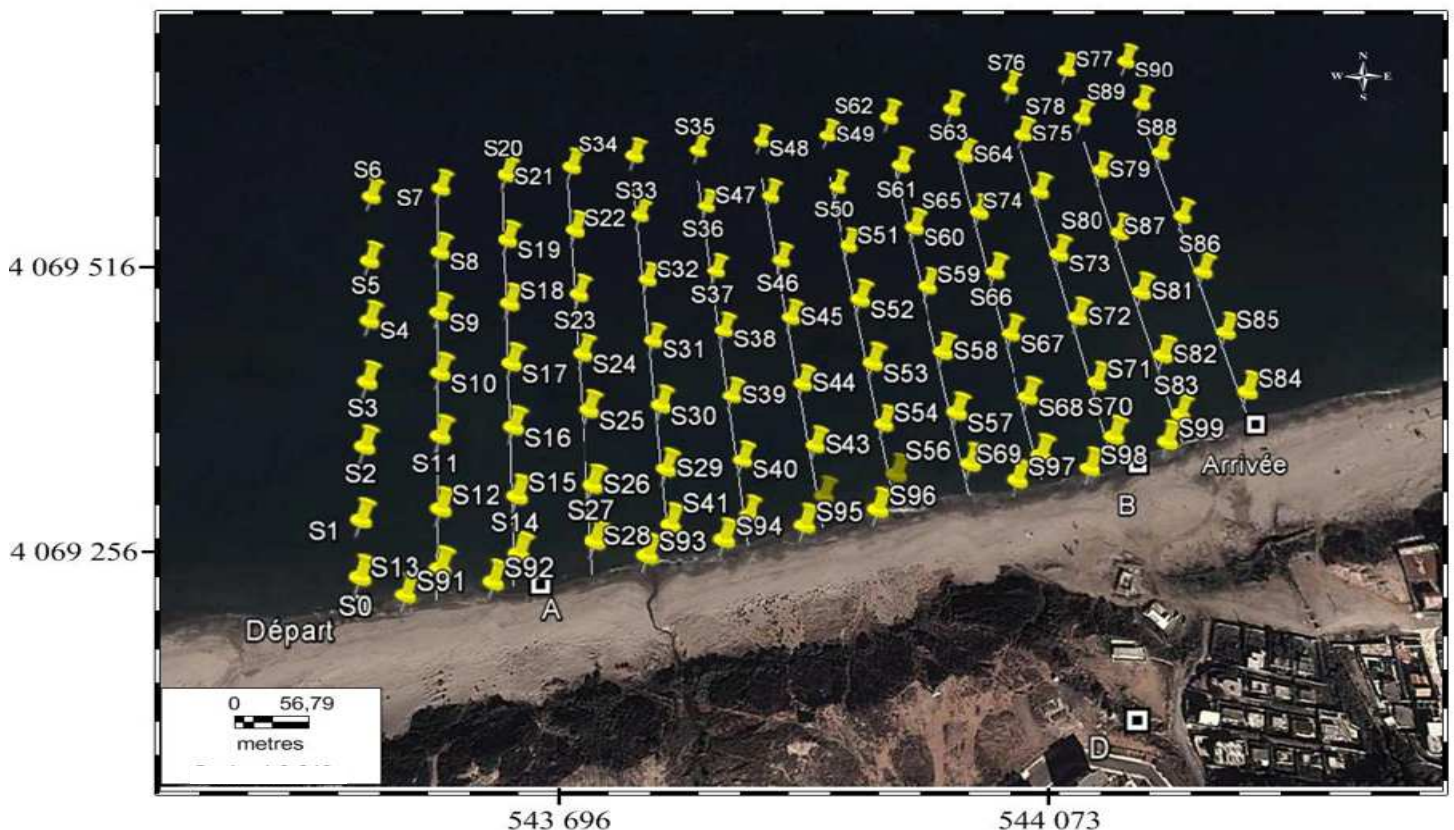


Figure III.7 : Situation des stations de prélèvements dans la plage sablière de Boumerdes (Google Earth, 2014).

III.2.3. Méthode d'analyse au laboratoire

Les tailles des particules sédimentaires sont extrêmement divers ; bien que de forme très :diverses, les particules sont soumises à l'analyse granulométriques. (**Vatan. A, 1967 in Sallay. M, 2012**).

Cette analyse consiste à évaluer le pourcentage de la masse totale qui correspond à chaque dimension selon la méthode classique (**Riviere. A, 1977 in sallay. M, 2012**)

-Séchage à l'étuve à 105° pendant 24h ;

-Pesée l'échantillon à 200g ;

-Rinçage à l'eau dans un tamis de 40 µm pour éliminer la fraction pélitique ;

-Séchage de la fraction grossière à l'étuve à 105° pendant 24h ;

-Tamisage de l'échantillon sec pendant 10 minutes par une tamiseuse de type AFNOR dont la diamètre des mailles en microns des tamis est dans l'ordre décroissant 10000-8000-6300-5000-4000-3150-2500-2000- 1600-1250-1000-800-630-500-400-315-250-200-160-125-100-80-63-50-40.

-Pesée le refus de chaque tamis et le pourcentage pondéral est calculé pour chaque classe granulométrique.

Remarque : les prélèvements d'échantillons et le tamissage ont été effectués par le LEM.

III.2.3.1. Résultat de l'analyse granulométrique

D'après les résultats granulométriques on a obtenus :

-Cartes modales.

-Carte des médianes.

-Représentation des indices granulométriques.

III.2.3.1.1. Les indice granulométriques

➤ La médiane D50

La taille moyenne des sédiments de diamètre supérieur ou égal à 50 µm. Cet indice correspond au diamètre du grain dont l'ordonnée est à 50% du poids total du sédiment.

La carte des médianes (**figure III.8**) limite bien le domaine de la fraction grossière dans les petits fonds en face de notre site.

La répartition des sédiments en place correspond à une répartition classique des sédiments en mer (la diminution graduelle de la taille des sédiments de la côte vers le large) principalement causées par la position géographique du site.

On constate sur cette carte que le faciès sédimentaire dominant est du sable moyen.

Les diamètres des sédiments sont répartis comme suit :

Entre 0 et -2m : La taille des sédiments est 300 μm à 380 μm .

Et entre -2m et -6m : la taille des sédiments est 200 μm à 260 μm

On remarque aussi entre la profondeur -4m et -6m là où on a une petite élévation que la taille des sédiments arrive jusqu'à 620 μm .

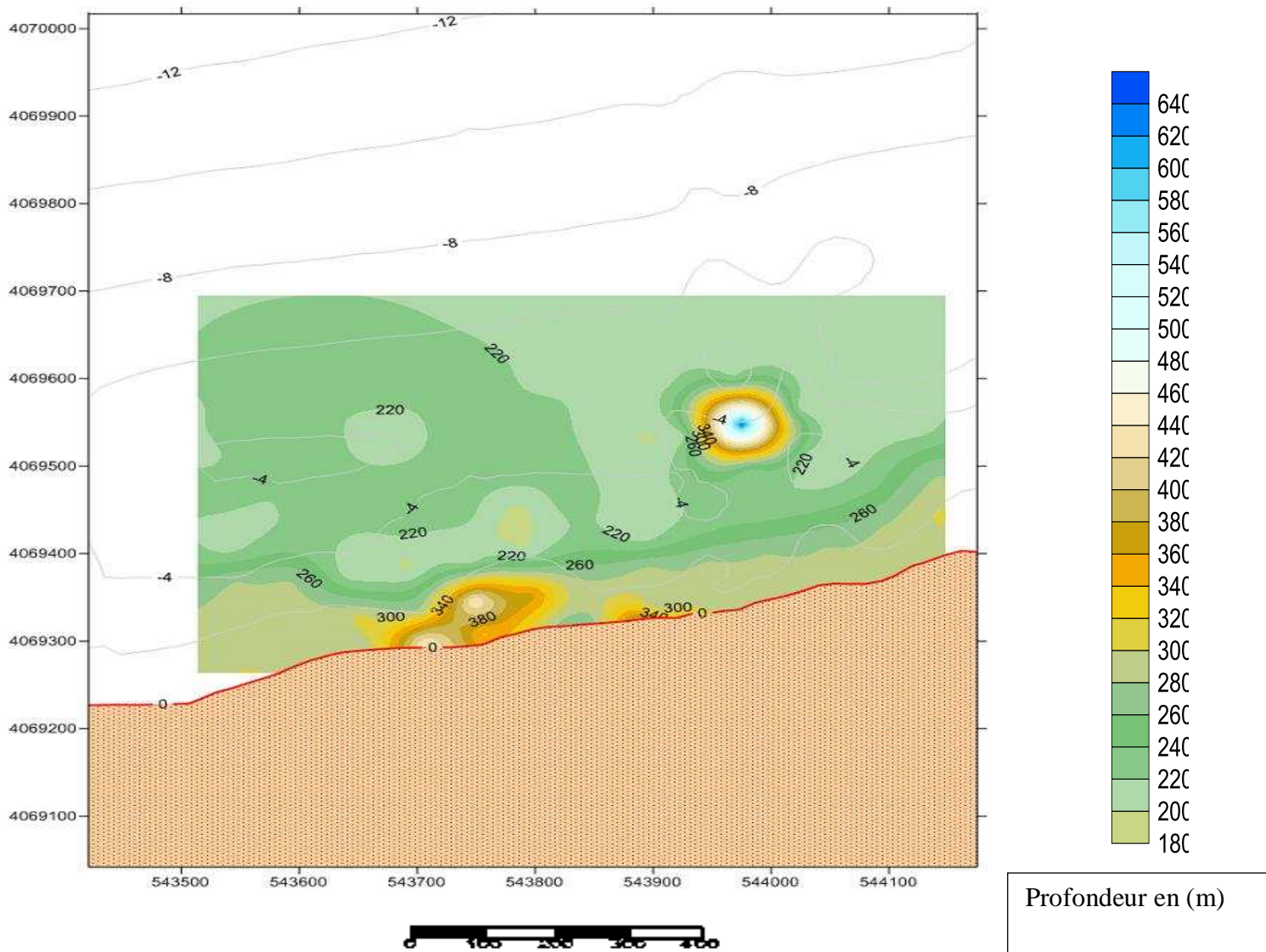


Figure.III.8 : Répartition des médianes (Q50) en fonction de la profondeur dans la plage sablière de Boumerdes.

➤ Indice des tailles maximales (D90)

Cette taille est telle que 90% du sédiment (en poids) lui est inférieur.

On constate sur cette carte que la répartition des déciles supérieurs est plus au moins régulière, elle décrit une diminution graduelle de la taille des grains de la côte vers le large (grosiers – moyens-fins).

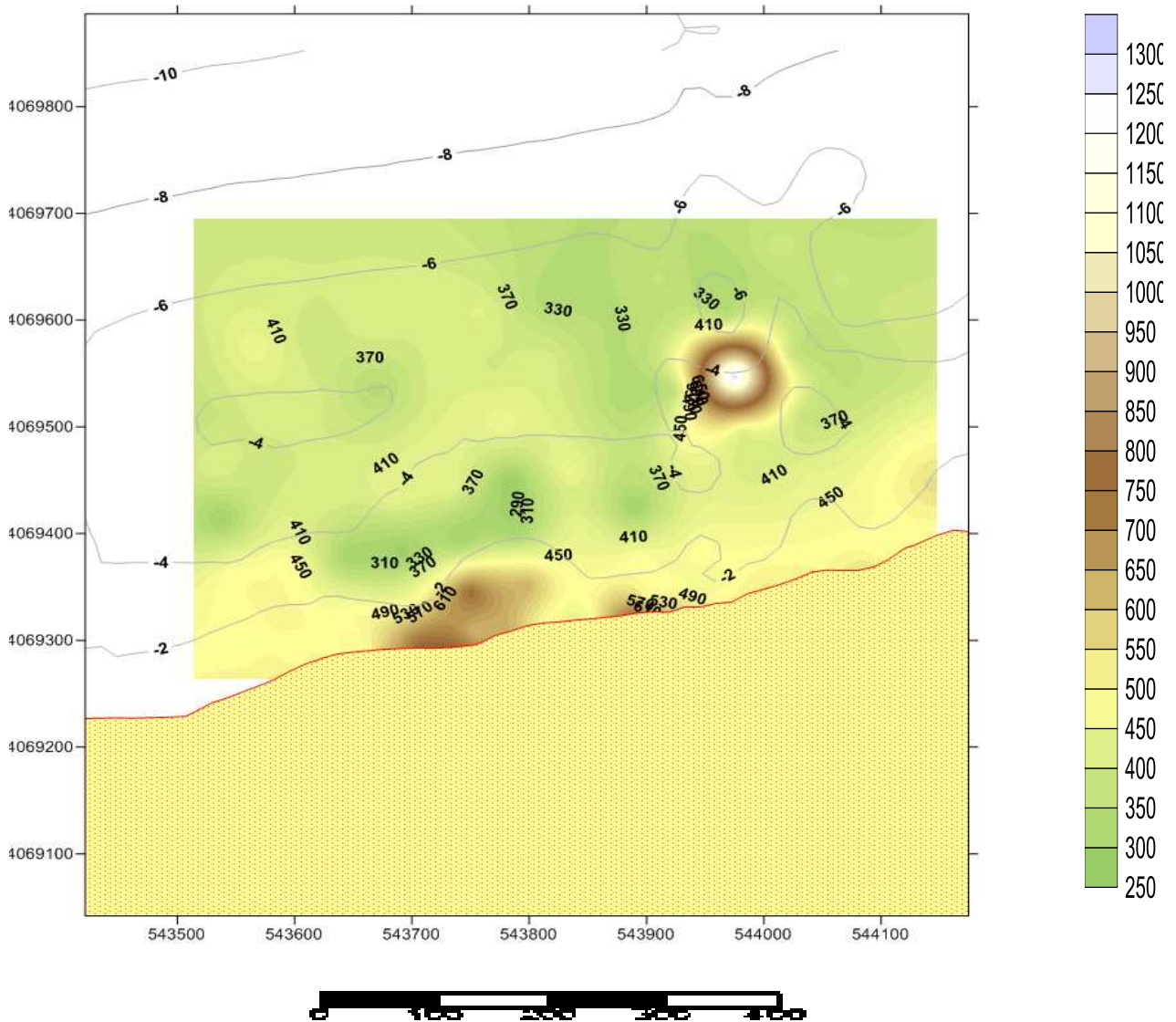


Figure III.9: La répartition des déciles supérieurs (D90) en fonction de la profondeur dans la plage sablière de Boumerdes.

➤ Indice de classement (Sorting de Trask)

Cet indice représente la disposition des tailles de part et d'autre de la médiane. Le paramètre qui a été adopté est celui de Trask noté S_0 (Chamley, 1987), qui est calculé par la formule suivante :

$$S_0 = \sqrt{\frac{Q_{75}}{Q_{25}}} \quad \text{III.1}$$

Les limites utilisées sont :

- $S_0 < 2$ le sédiment est très bien classé.
- $2 < S_0 < 2.6$ Le sédiment moyennement classé.
- $S_0 \geq 2$ le sédiment est très mal classé.

Sur cette figure on constate que tous les sédiments présentent $S_0 < 2$, donc le sédiment est très bien classé, le classement est maximum vers les grossiers.

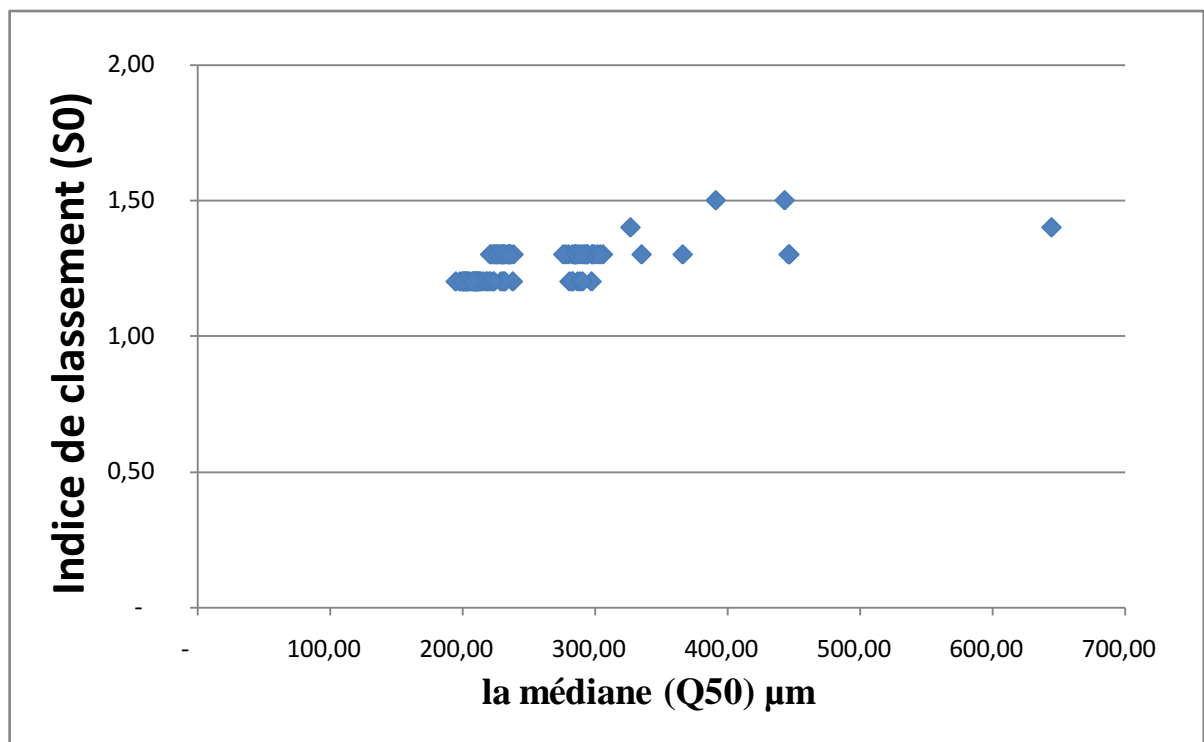


Figure III.10 : Variation de l'indice de classement et la médiane de la plage sablière de Boumerdes.

➤ Le coefficient d'asymétrie (S_k ; Skewness de Trask)

L'asymétrie reflète d'avantage le milieu de dépôt (Chamley H., 1987), plus exactement la prédominance ou non de fraction péltique ou grossière par rapport à la moyenne de l'échantillon. Il est défini par la relation suivante :

$$SK = \frac{Q_{25} - Q_{75}}{(D_{50})^2}$$

III.2

- Si $S_k < 1$, le classement est maximum vers les fines.
- Si $S_k = 1$, le classement est parfait.
- Si $S_k > 1$, le classement est maximum vers les grossiers.

On remarque sur la figure III.11 La majorité des échantillons prélevés présentent un coefficient d'asymétrie (S_k) égale à 1, donc les sédiments présentent une répartition symétrique correspondant au bon classement ce qui traduit un tri maximum vers les grossiers, sable fin ; et les autres échantillons les valeurs de l'indice d'asymétrie sont supérieur à 1, donc le classement est maximum vers les grossiers, sable moyen.

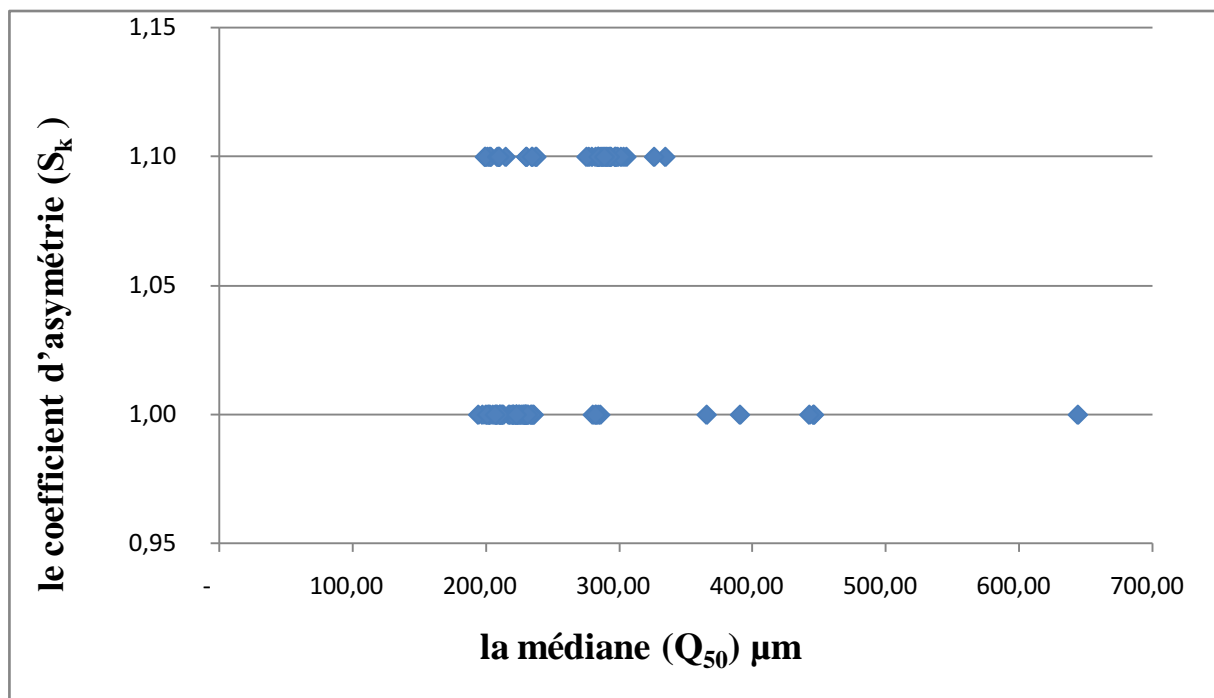


Figure III.11 : Variation du coefficient d'asymétrie et la médiane de la plage sablière de Boumerdes.

Conclusion

D'après les études qui ont été faites on constate que la majorité des sédiments constituant la partie marine de la plage sablière de Boumerdes sont du sable moyen, donc on peut dire que l'origine de ces sédiments est marine dans la plus part des cas et peut être terrestre aussi (issus de la falaise) ce qui explique la participation de la mer pour l'érosion de notre falaise durant les grandes tempêtes.

III.3. La réfraction de la houle

Introduction

A l'approche des côtes, et à partir d'une certaine profondeur (d'après la théorie linéaire $d = 1/2L_0$, soit la demi longueur de la houle au large) la propagation des houles est influencée par la bathymétrie, et les crêtes de houles tendent à devenir parallèles aux isobathes.

Ce phénomène se nomme réfraction des houles. Il induit une concentration de l'énergie sur les saillants (cap, flèches, etc....).

L'étude de la réfraction a pour but la connaissance des caractéristiques de la houle (direction et hauteur) au cours de sa propagation depuis le large jusqu'à l'approche de la côte et plus particulièrement les ouvrages de protection.

La connaissance des caractéristiques de la houle (direction, amplitude, période) permettent d'apprécier et de comprendre les phénomènes qui se produisent dans la zone de déferlement et serviront de données d'entrée pour le dimensionnement des ouvrages maritimes.

III.3.1. Principe de calcul de la réfraction de la houle

On rend compte de ce phénomène par le calcul des coefficients de réfraction (K_r) en plusieurs points d'un littoral pour les secteurs de houle dominants, et pour une période de houle donnée.

Les valeurs de K_r calculées jusqu'à la côte traduisent :

- L'atténuation de l'énergie lorsque $K_r < 1$ (divergence des vagues).
- La conservation de l'énergie lorsque $K_r = 1$ (propagation rectiligne des vagues).
- La concentration de l'énergie lorsque $K_r > 1$ (convergence des vagues).

Les calculs de la réfraction de la houle entre le large et la côte sont effectués par le modèle numérique SWAN.

SWAN (Simulating Waves Nearshore), développé par l'université de Delft et le bureau d'étude Delft Hydraulics (Pays-bas), est un modèle spectrale qui résout l'équation de conservation de l'énergie de la houle aléatoire en milieu peu profonde, pour différentes conditions au large (hauteur, période et direction).

Il est donc parfaitement adapté à la problématique du littoral. Le coefficient de réfraction est calculé par le SWAN.

III.3.2. Données de base

Cette étude a nécessité l'utilisation des données statistiques de houle au large et des données bathymétriques.

III.3.2.1. Données bathymétriques

La bathymétrie utilisée pour cette étude de réfraction est celle issue de la digitalisation de la carte SHOM N°3061 «partie comprise entre le cap Matifou et le cap Tesdles, échelle : 1/120^{ème}», complétée par le levé bathymétrique réalisé en septembre 2013 par le LEM dans le cadre de l'étude de l'évolution et dynamique et protection de la falaise de Boumerdes.

III.3.2.2. données de houles au large

Les données du Summary of Synoptic Meteorological Observations (SSMO consistent en des observations de navire sur la période allant de 1963 à 1970.

Un traitement statistique de ces données a permis de déterminer les fréquences d'apparition de houle par direction et par période.

Afin d'optimiser les calculs sur le modèle SWAN, nous avons procédé au calcul d'une houle équivalente par période et par direction. Celle-ci correspond à la moyenne des amplitudes significatives pour une période donnée, les périodes de houle considérées dans le cadre de de cette étude sont : 6,8 et 10 secondes (tableau n°5).

Tableau n°5 : Hauteurs des houles annuelles retenues par secteur de provenance au large

Hauteur Equivalente Annuelle (m)			
Période (s)	N360°	N45°	N315°
6	1,00	1,09	1,10
8	2,67	2,56	2,64
10	4,92	5,05	4,53

III.3. 3. Choix du secteur angulaire

Le secteur angulaire considéré correspond aux limites naturelles imposé d'une part, par la configuration géographique du site d'étude, et d'autre part, par le secteur d'intérêt des houles du large.

Ainsi trois (03) directions ont été retenues en tenant compte des tableaux de fréquence par direction des houles au large ainsi que l'incidence de ces houles par rapport à la zone d'étude (figure III.12):

- Une direction approximativement perpendiculaire à la côte pour mesurer les effets d'une houle frontale (N 360°)
- Deux directions de houle à incidence oblique (N 315°et N 45°).

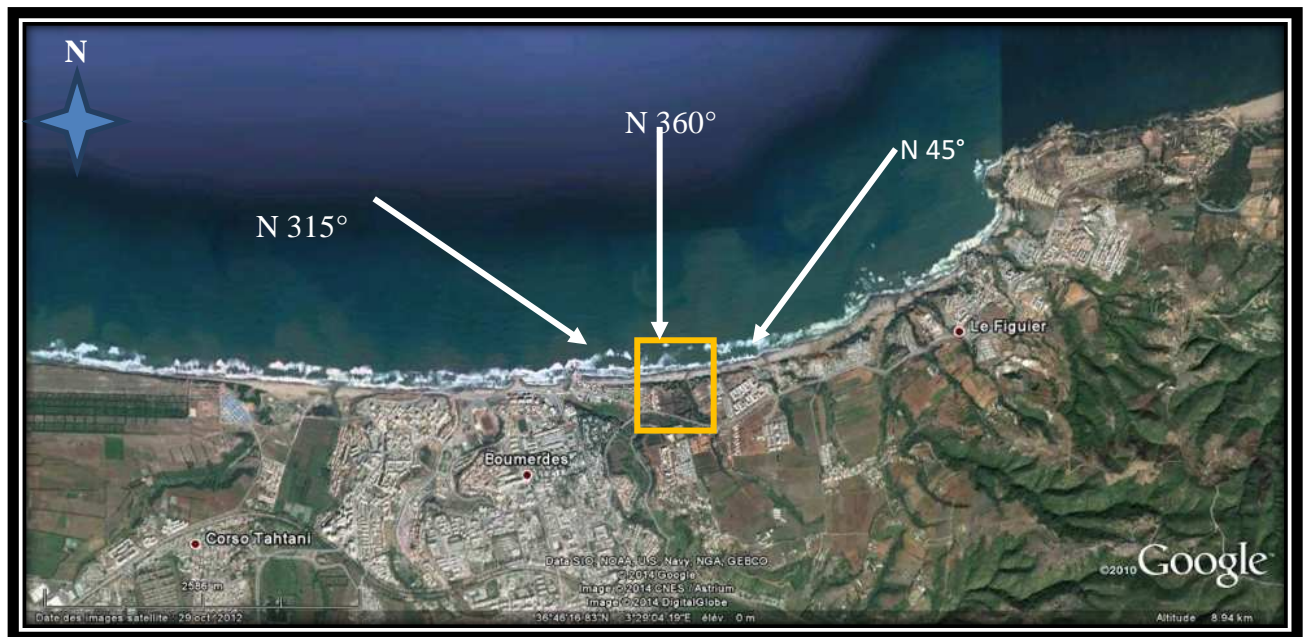


Figure III.12 : Choix des directions défavorable au site d'étude (Google Earth, 2014).

III.3.4. Les étapes de calcul de la réfraction

Les étapes de calcul de la réfraction sont résumées dans l'organigramme suivant :

III.3.5. Résultats de la réfraction

Les résultats de la réfraction de la houle se présentent sous formes des épures de réfraction qui représentent le sens de direction de propagation de la houle, leurs longueurs étant proportionnelles à la hauteur de la houle,

Aussi ces résultats de réfraction de la houle déterminent les conditions de la houle en quelques points, qui permet l'établissement de la statistique locale de la houle à cette profondeur qui sera utilisée pour l'estimation de la capacité de transport et/ ou pour le calcul du dimensionnement des ouvrages maritimes.

Le coefficient de réfraction (K_r) pour les houles vingtennale a été calculé pour chaque direction retenue à une profondeur d'environ -10 m, profondeur limite de la dynamique sédimentaire (voir tableau n°6).

On remarque parmi ces trois secteurs que ce sont les houles de direction Nord 315° qui conservent leur énergie et attaque le site frontalement.

Remarque

La partie annexe n°3 comporte les résultats de la réfraction (amplitude de la houle, angle d'arrivées et période après réfraction pour les profondeurs choisies).

Les résultats sont présentés par des épures de réfraction de la houle à l'aide de SWAN sont les suivants :

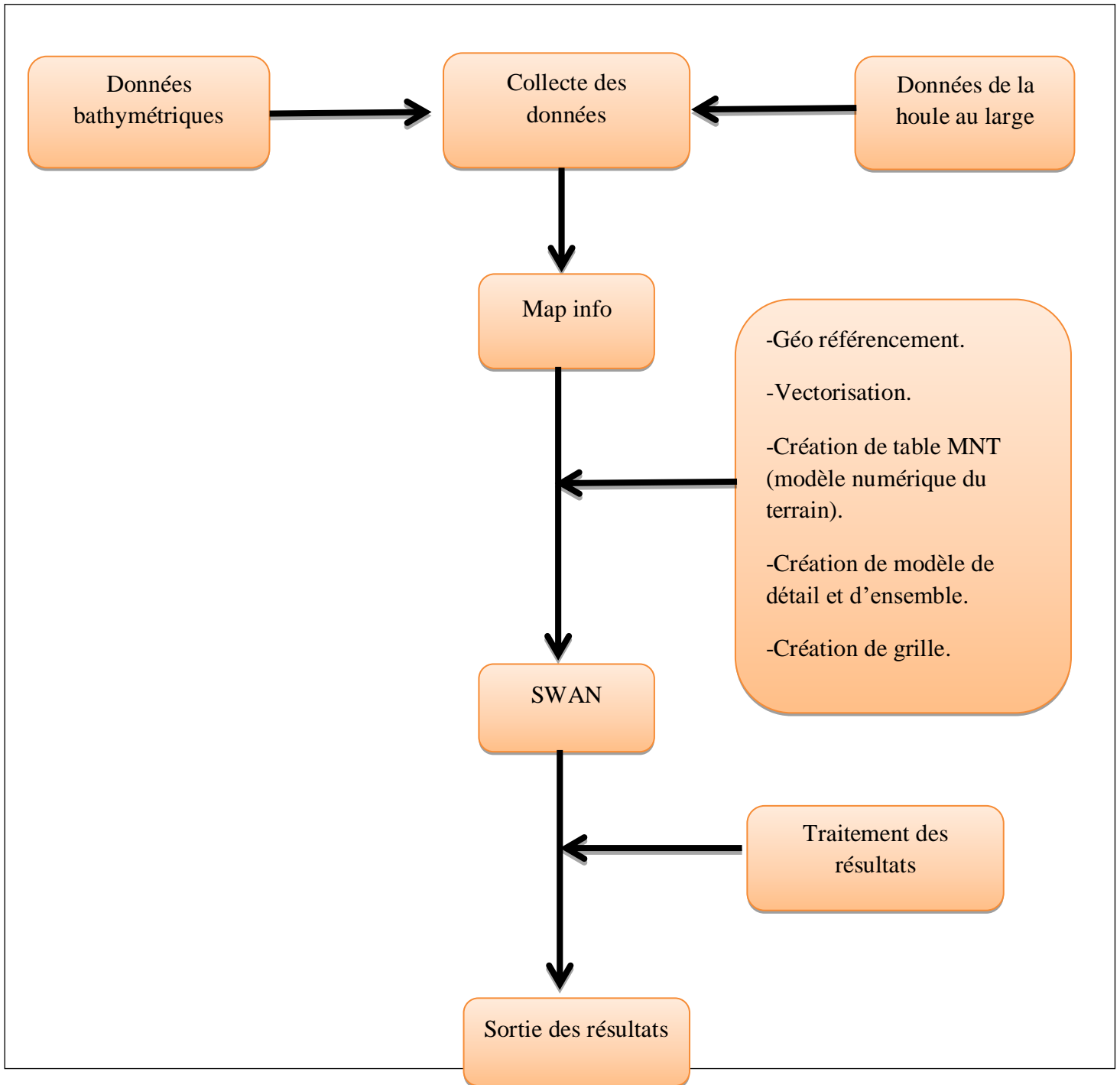


Figure III.13. Organisme du déroulement des étapes de la réalisation de la réfraction.

Tableau n°6 : Les moyennes des résultats obtenus par direction et par période de la houle vintennale à -10.00m.

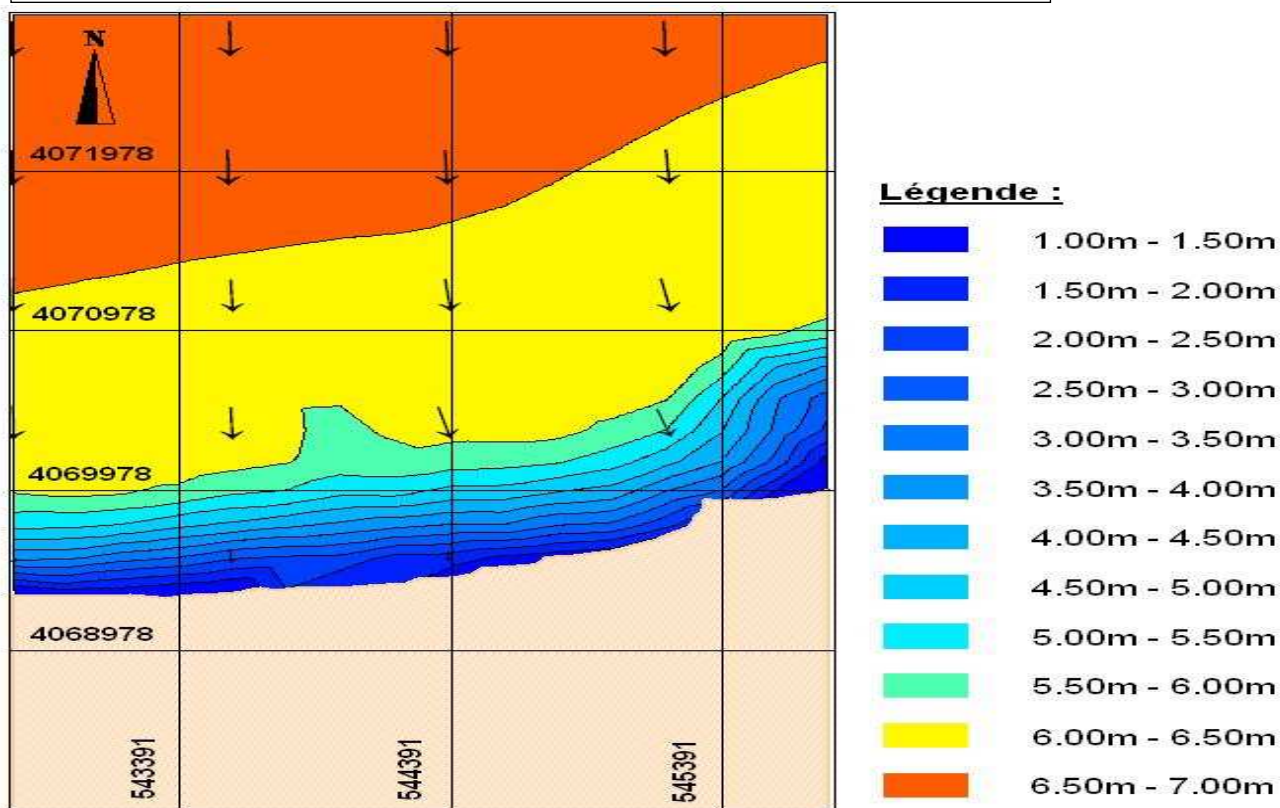
	Période (s)	Amplitudes des houles au large (m)	Amplitudes des houles à -10m	Kr	Angle d'arrivé (°)
N°45	12,73	6,79	4,13	0,61	17,11
N°315	11,96	5,95	4,61	0,78	329,13
N°360	12,92	7,02	5,19	0,74	349,48

Caractéristique de la houle au large :

Période de retour= 20 ans.

Direction= N 360°

Hs= 7,02 m et Tp= 12,92s



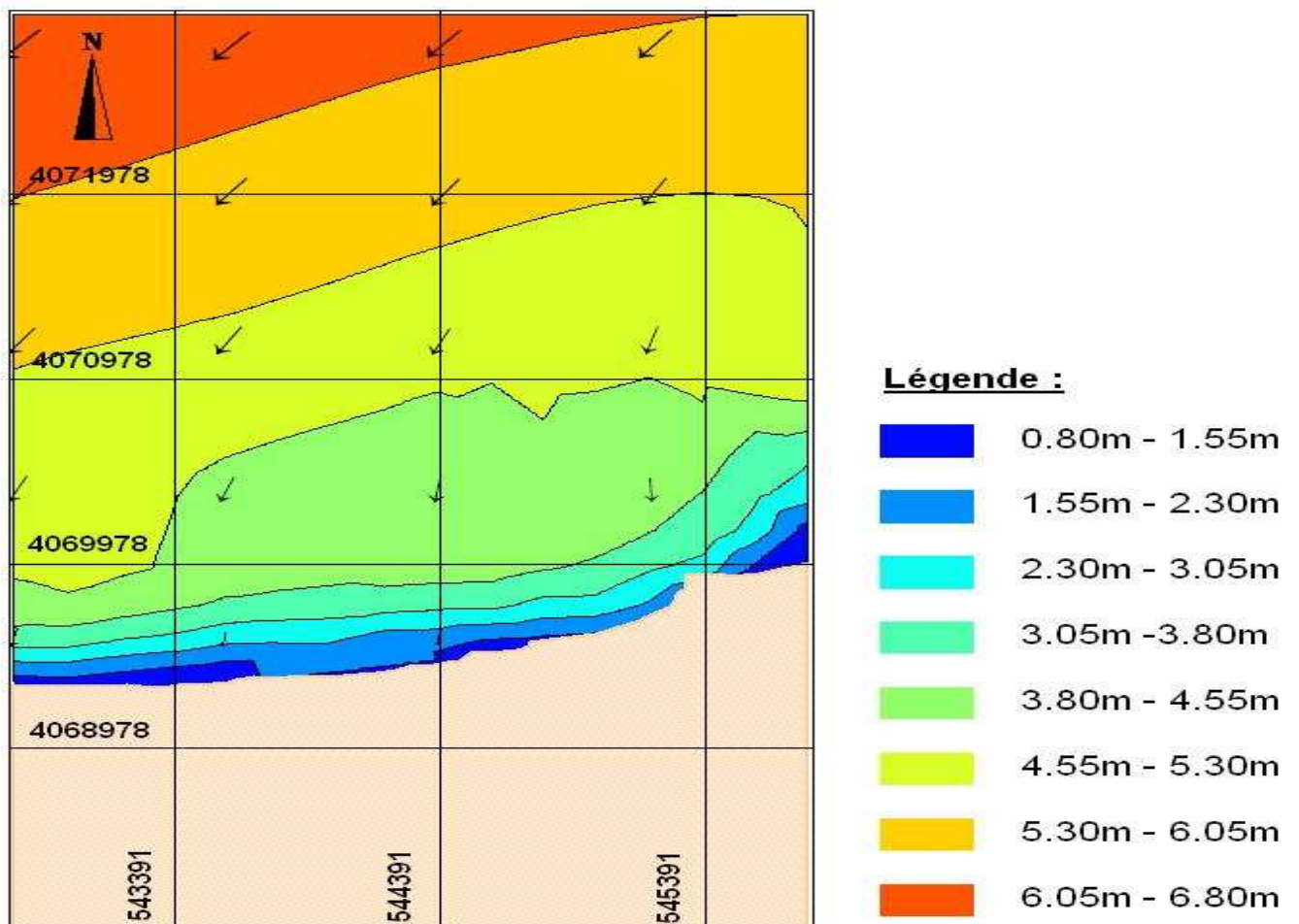
Référence Altimétrique : NGA

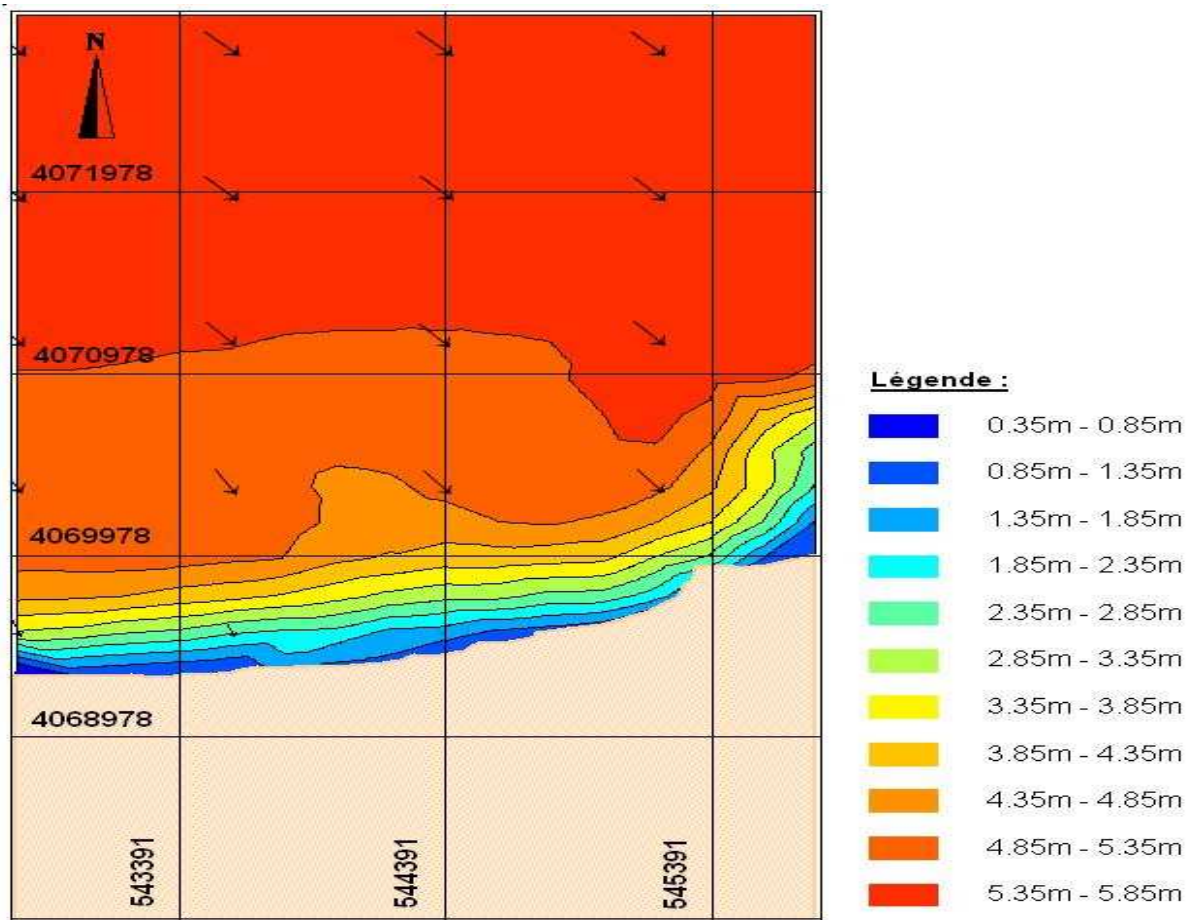
Référence Planimétrique : UTM –WGS 84 –Zone 31N

Bathymétrie extraite des carte Shom (lat 36° 54' – Echelle : 1/ 120 000)

Bathymétrie du terrain : LEM (2013)

Figure III.14 : Réfraction de la houle pour une direction N360° et une période de 12,92

Caractéristique de la houle au large :**Période de retour= 20 ans.****Direction= N 45°****Hs= 6,79 m et Tp= 12,73s****Modèle de Détail****Référence Altimétrique : NGA****Référence Planimétrique : UTM –WGS 84 –Zone 31N****Bathymétrie extraite des carte Shom (lat 36° 54' – Echelle : 1/ 120 000)****Bathymétrie du terrain : LEM (2013)****Figure III.15:** Réfraction de la houle pour une direction N45° et une période de 12,73s

Caractéristique de la houle au large :**Période de retour= 20 ans.****Direction= N 315°****Hs= 5,94 m et Tp= 11,96s****Modèle de Détail****Référence Altimétrique : NGA****Référence Planimétrique : UTM -WGS 84 -Zone 31N****Bathymétrie extraite des carte Shom (lat 36° 54' - Echelle : 1/ 120 000)****Bathymétrie du terrain : LEM (2013)****Figure III.16 : Réfraction de la houle pour une direction N315° et une période de 11,96**

III.3.6. Interprétation des résultats

- **La figure III.14** présentant les résultats de l'étude de la réfraction pour une houle de secteur Nord ($N360^\circ$) et de période de 12,92 secondes, la propagation se fait de façon quasi frontale, le coefficient de réfraction est en moyenne égal à 0.84, donc les houles ne perdent que un peu de leur énergie. Les orthogonales ne pivotent que légèrement à l'approche du rivage.
- **Sur la figure III.15** on constate que l'étude de la réfraction sur ce cas démontre que pour une houle de secteur Nord-Est ($N45^\circ$) et de période de 12,73 secondes, la réfraction s'opère sur cette dernière de façon à diminuer son énergie au fur et à mesure de son évolution vers la côte, avec un coefficient de réfraction est en moyenne égal à 0,60. Donc elles ne conservent que la moitié de leur énergie de large,

La dissipation de l'énergie se présente par un pivotement des orthogonales en direction Nord à Nord – Est, avec un angle moyen de 35° .

- **La figure III.16** présentant les résultats de l'étude de la réfraction pour une houle de secteur Nord-Ouest ($N315^\circ$) et de période de 11,96 secondes, la propagation se fait de façon frontale. Le coefficient de réfraction est en moyenne égal à 0.86, les houles ne perdent que très peu de leur énergie, Ces houles atteignent la zone d'étude sans changer de direction, mais en termes d'énergie elles sont beaucoup moins importantes que les houles de direction Ouest.

Conclusion

Les houles les plus énergétiques qui peuvent influencer sur notre zone sont les houles de secteur Nord- Ouest, et elles vont être prises dans le dimensionnement des ouvrages de protection.

III.4. Le transit littoral

Introduction

Les courants marins, d'origines diverses, ont une influence notable sur les processus sédimentaires. Les houles, par l'énergie qu'elles dissipent à l'approche de la côte et suivant l'obliquité de leur attaque vis à vis du rivage, provoquent soit des transits perpendiculaires, soit des transits parallèles à la plage, si une alimentation ne vient pas compenser le transit littoral, celui-ci va, par des quantités importantes de matériaux mis en mouvement, entraîner un déficit sédimentaire et une érosion du littoral.

De même, les vents sont loin d'être négligeables, Ils peuvent enlever à la plage des milliers de m^3 de sable. Dans notre étude on a pris en considération tous ces facteurs et on a fait une étude sur le transit sédimentaire, mais avant de commencer notre étude on a défini certains paramètres tels que :

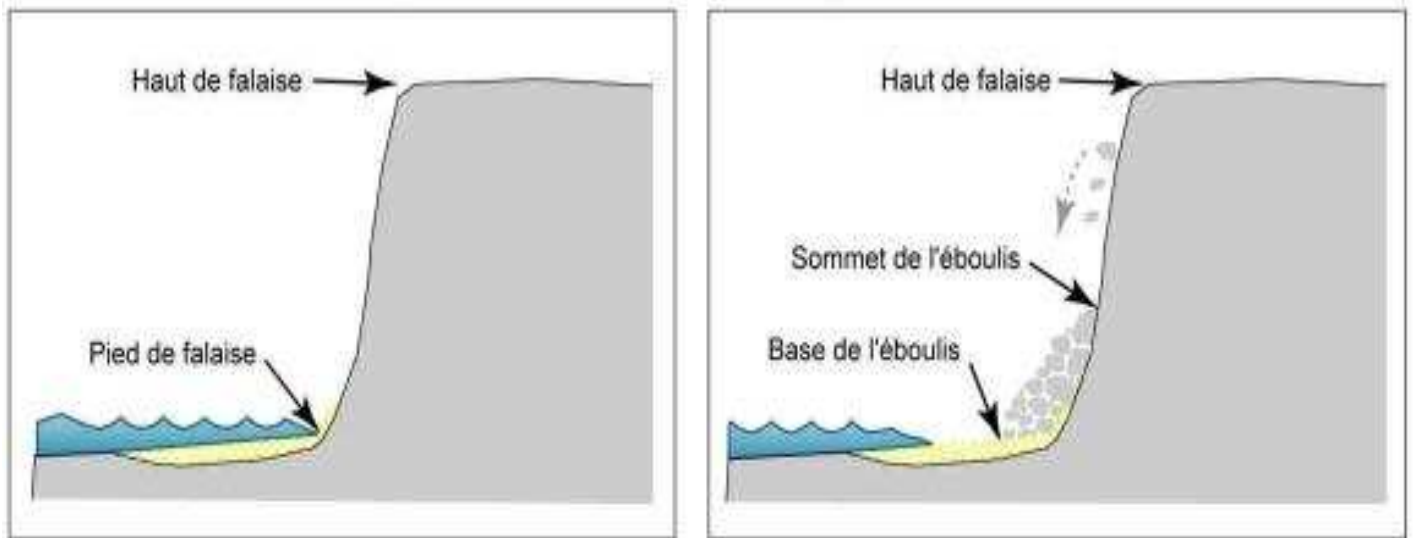


Figure III.17 : Littoraux à falaises, plage adossées.

III.4.1. Mouvement d'entraînement des sédiments sur le fond

D'après Chauchat (2007), il existe trois modes de transport des particules : le roulement ou charriage, la saltation et la suspension. Ces trois modes peuvent se produire simultanément et les particules concernées par chaque mode dépendent des conditions d'écoulement (contrainte de cisaillement sur le fond) :

a- Le transport par roulement ou charriage

Concerne les grains de la couche superficielle des sédiments non-cohésifs qui roulent sur le fond dans le sens de l'écoulement jusqu'à travers une nouvelle position d'équilibre. Ce mode de transport se produit essentiellement lorsque la contrainte de frottement est proche de la contrainte critique de mouvement.

b -Le transport par saltation

Apparaît lorsque le seuil de mouvement est dépassé. L'impulsion fournie par le fluide fait sauter les particules au-dessus du fond suivant une trajectoire balistique. La hauteur maximale atteinte par les grains est de l'ordre de grandeur du diamètre de celle-ci.

c- Le transport en suspension

Se produit lorsque l'écoulement est suffisamment fort pour maintenir en suspension les particules sans que celles-ci ne se redéposent. Les particules concernées par ce mode de transport sont les sables, les silts et les argiles.

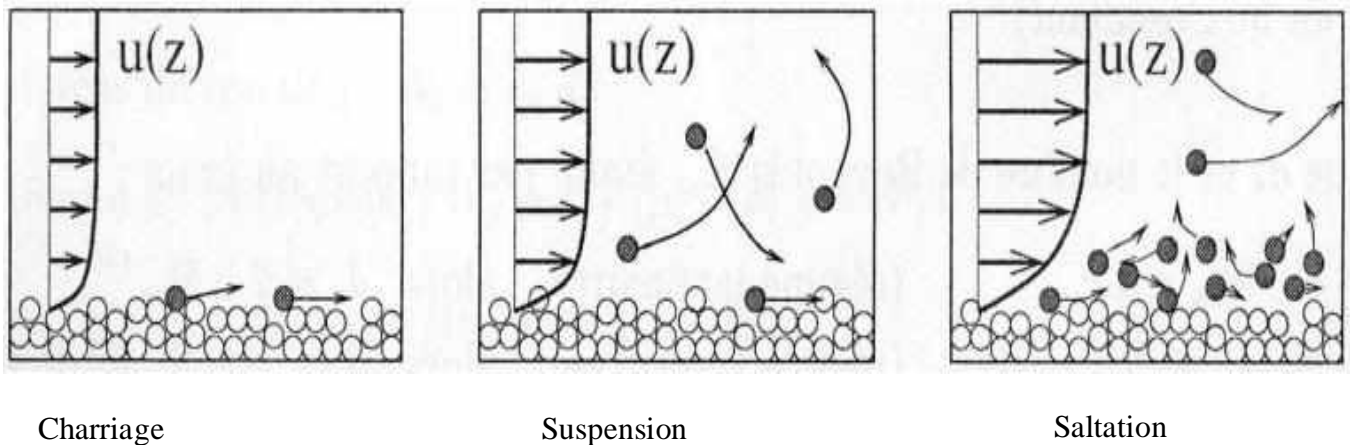


Figure III.18: Les trois modes de transport sédimentaire (Camenen, 2002 in Mezouar, K. ; 2009): transport par charriage, transport par suspension, transport par saltation.

III.4.2. Dynamique sédimentaire

La méthodologie d'estimation des transits sédimentaires repose en premier lieu sur l'identification des cellules sédimentaires, entre lesquelles s'organise le transport longitudinal, dans le cadre d'un système fermé à ses deux extrémités ainsi que vers la terre et le large (Drapeau et Mercier, 1990).

Il est très important pour une côte donnée, si l'on veut comprendre son évolution et si l'on a l'intention de l'aménager, de connaître à la fois le volume des sédiments et, lorsque la dérive littorale subit des inversions de sens, la direction résultante du transport à l'échelle de l'année. L'évaluation du transit sédimentaire est difficile (Paskoff, R, 1993).

Le site d'étude est soumis aux houles de secteur Nord, Nord-Est et Nord-Ouest, responsable du transit sédimentaire existante et qui est généralement parallèle à la côte.

Le calcul du transit sédimentaire s'effectuant annuellement montre un sens dominant Est-Ouest avec une capacité de transport estimée à $11\,011,17\text{ m}^3/\text{an}$. La figure suivante (Figure III.20) résume le schéma probable de la dynamique sédimentaire.

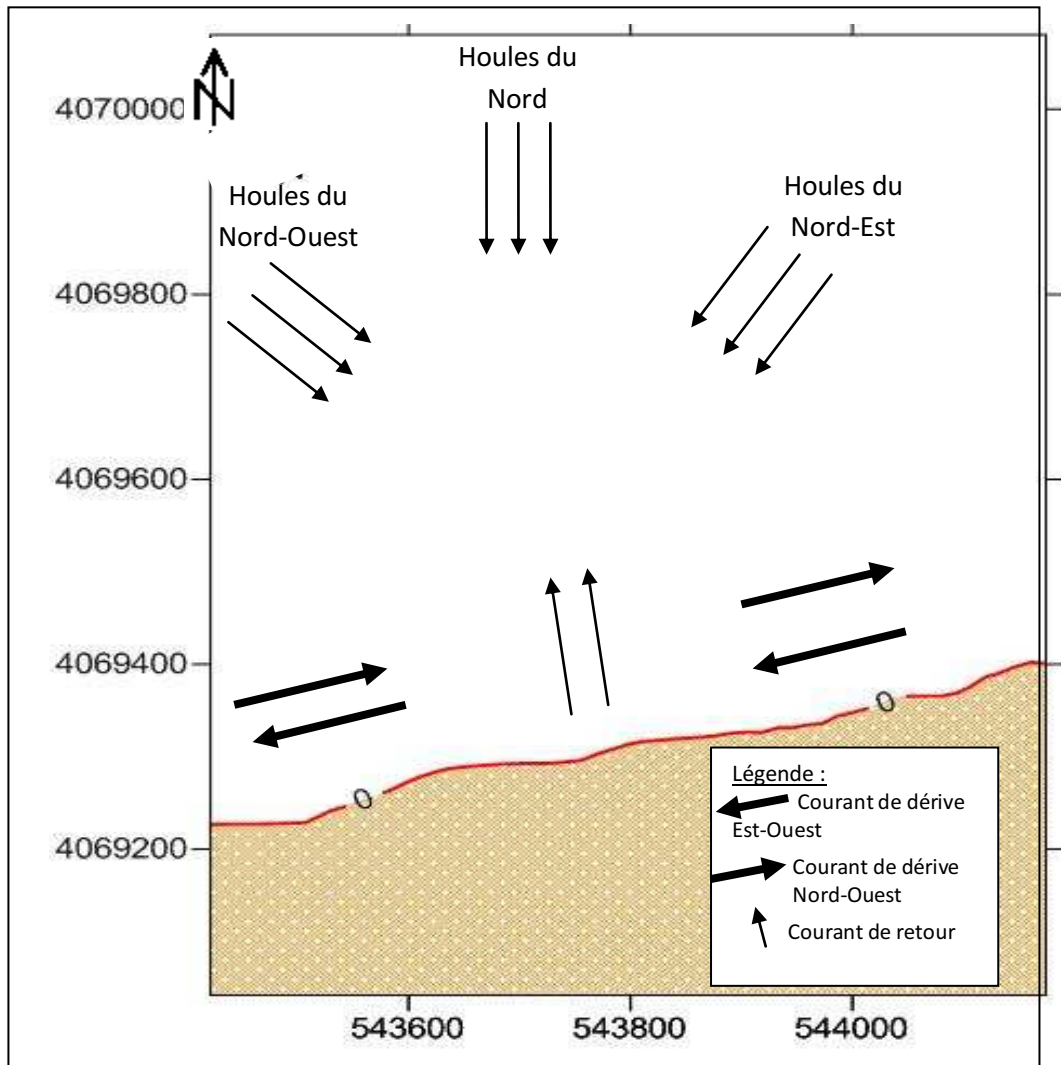


Figure III.19 : Schéma probable de la dynamique sédimentaire

III.4.2.1. Estimation du transit sédimentaire

Les ordres de grandeur du volume déplacé des sédiments parallèlement à la côte (transit littoral) peuvent être évalués à partir de différentes formules dont la plus utilisée est la formule de Sauvage de Saint-Marc et de Vincent « L.C.H.F » :

$$Q = \frac{K}{c} * g * H_s^2 * T * t * f(\alpha) \tag{III.3}$$

- Q = volume de sable transporté (en m³).
- K = coefficient de transport du sédiment (2,5 10⁻⁶).
- g = accélération de la pesanteur (en m/s²).
- c = cambrure de la houle (0,03).
- H_s = amplitude significative de la houle (m).
- T = période de la houle (en secondes).

$f(\alpha)$ = fonction de l'obliquité « α » de la crête de la houle avec la côte.

t = durée d'action de la houle (en secondes).

Le coefficient k pour des sables fins à moyens (d_{50} est de 0,2 à 0,5 mm) varie de 2,5 à 5,0 10^{-6} ; pour un sable de diamètre supérieur à 0,5mm le coefficient k peut s'exprimer par la relation suivante : $K = 1,8 \cdot 10^{-6} d^{1/2}$ avec ; diamètre en mm.

L'utilisation de cette formule conduit à définir :

- le bilan énergétique annuel de transport caractérisé par : $H_s^2 T t$.

- la fonction $f(\alpha)$ liée à l'obliquité de la houle $f(\alpha) = \sin(7/4(\alpha))$.

Les calculs suivants résument les étapes du calcul du transit sédimentaire ainsi que le bilan énergétique :

➤ Données utilisées

Les données nécessaires à l'établissement du transit sédimentaire proviennent des résultats de l'étude de réfraction de la houle réalisée dans le cadre de cette étude et sont obtenus par extraction de points situés à la profondeur de -10 m (trois points choisis) au niveau du site des 800 logements (Plage Sablière) à partir du modèle SWAN sont moyennés comme suit :

Tableau n° 7 : Les moyennes des résultats obtenus par direction et par période.

Direction	N°360			N°45			N°315		
	Période (s)	Hs (m)	t (s)	Angle d'arrivée (°)	Hs (m)	t (s)	Angle d'arrivée (°)	Hs (m)	t (s)
6	0,93	6,20	359,16	0,82	5,67	32,63	1,00	6,23	321,21
8	2,43	6,51	358,29	1,71	7,84	25,00	2,33	7,84	327,71
10	4,26	10,28	357,63	3,22	10,00	32,63	3,91	10,28	333,13

➤ Calcul du bilan énergétique annuel

* Calcul de la durée d'action de la houle « t »

Le temps "t" est donné par la relation suivante :

$$t = \frac{365j \times 24h \times 3600 s}{100} \times f(\%)$$

Avec $f(\%)$ fréquence d'observation.

Tableau n°8 : Récapitulatif de la fréquence d'observation et de la durée d'action de la houle.

Direction	N°360		N°45		N°315	
	f(%)	t (s)	f(%)	t (s)	f(%)	t (s)
6	7,52	2 371 421,87	17,02	5 368 586,25	5,72	1 802 565,05
8	0,94	295 094,48	1,21	380 423,00	0,81	255 985,57
10	0,09	28 442,84	0,11	35 553,55	0,03	10 666,07

Tableau n°9 : Récapitulatif du bilan d'énergie annuel par direction et par période.

Direction	N°360		N°45		N°315	
	(H _s) ² * T* t * (m ² s ²)	(H _s) ² * T* t * (m ² s ²)	(H _s) ² * T* t * (m ² s ²)	(H _s) ² * T* t * (m ² s ²)		
6	12 290 911,71	20 613 238,68	11 281 012,14			
8	11 305 699,07	8 707 310,72	10 862 205,48			
10	5 314 133,81	3 682 854,97	1 677 874,26			
Total =	28 910 744,59	33 003 404,37	23 821 091,88			
Total Général : H _s ² . T. t = 85 735 240,84 m ² s ²						

Le bilan énergétique annuel est estimé à environ 85 735 240,84 m² s².

➤ **Calcul du transit sédimentaire**

* Calcul de l'angle "α" angle que fait la crête de la houle avec la côte

Sachant que : $f(\alpha) = \sin(7/4(\alpha))$ le tableau suivant résume les angles obtenus :

Tableau n°10: Récapitulatif du calcul de l'angle « α » et de la fonction f(α).

Direction	N360		N45		N315	
	α (°)	f(α)	α (°)	f(α)	α (°)	f(α)
6	-4	-0,122	-37	-0,904	44	0,974
8	-3	-0,092	-30	-0,793	38	0,917
10	-2	-0,061	-37	-0,904	32	0,829

Tableau n°11 : Récapitulatif du transit sédimentaire par période et par direction.

Direction	N360	N45	N315	Total par période Q (m ³ /an)
Période (s)	Q (m ³ /an)	Q (m ³ /an)	Q (m ³ /an)	
6	-1224,52	-15 241,27	8985,86	-7479,92
8	-845,70	-5647,27	8143,36	1650,39
10	-265,21	-2723,07	1137,16	-1851,13
T/direction	-2335,43	-23 611,61	18 266,38	-7680,66
Total Général : 44 213,20 m ³ /an				

Ouest (+) 18 266,38 m³/an, Est (-) -25 946,82 m³/an

Le volume résultant des sédiments pouvant être déplacés de l'Est vers l'Ouest serait de 7680,66 m³/an.

Par convention le signe (+) correspond à un transport Ouest ==> Est et le signe (-) correspond à un transport Est ==> Ouest.

Conclusion

Toutes les études qui ont été faites suivant différentes méthodes déjà citées, ont donné des constats sur l'origine de l'érosion de notre falaise et aussi elles nous ont orienté sur le type de protection qu'on va utiliser pour la protection de notre falaise.

Chapitre IV

Les ouvrages de protection

Introduction

Suite aux différentes investigations effectuées au niveau de la falaise est due principalement à la combinaison de plusieurs facteurs explicités dans le chapitre.... on ne peut assurer une protection optimale de cette dernière en tenant compte uniquement de l'une des causes. Ceci étant confirmé par le fait que la falaise continue à se par le sommet et la formation des ravins se voient clairement, le principal objet de ce chapitre est de proposer des solutions permettant d'arrêter, du moins freiner l'érosion de la falaise.

IV.1. Nécessité d'une étude d'aménagement

Notre zone d'étude est en voie d'érosion, c'est pour ça qu'on a fait toutes ces études, notre objectif principale est de trouver une ou plusieurs solution qui vont arrêter ce phénomène qui ne cesse pas de menacer notre site et aussi qui pourra conduire à la disparition de la falaise.

Une étude d'aménagement alors s'impose, elle doit être cependant conduite avec rigueur afin d'obtenir la meilleure synthèse possible pour notre site.

IV.2.Des ouvrages de protection envisageables

La plage, absorbant graduellement l'énergie de la houle par les déferlements successifs qu'elle provoque, constitue le meilleur ouvrage de défense du littoral contre l'érosion. C'est en effet la dynamique naturelle des plages qui est fondamentale pour la survie physique de la plage et pour la diversité de ses habitats biologiques.

Pour toute défense contre l'érosion, il est donc plus efficace de se tourner vers des ouvrages de défense souples qui travaillent en harmonie avec les dynamiques naturelles en jeu. Toutefois, la diversité des phénomènes à l'origine de l'érosion, conduit à une diversité de réponses techniques. Ainsi, pour améliorer l'efficacité des interventions de protections, on adopte souvent des défenses de natures mixtes. Suite aux différents résultats obtenus lors des études élaborées sur la zone d'étude, on a pu retenir les variantes suivantes :

IV.2.1.Géotube

Parmi les nouvelles méthodes de protection des plages, une large part est faite par l'utilisation des géotextiles. Ces utilisations consistent essentiellement, soit à conforter des mouvements de matériaux, soit à favoriser des phénomènes de transport et de dépôt estimés souhaitables, soit en utilisation sous forme d'ouvrages tels que des épis ou brise-lames.

IV.2.1.1. Définition

Il s'agit de tubes ou boudins géotextiles d'une enveloppe géotextile tissé de haute résistance remplie de sable. La structure est réalisée in situ et remplie par pompage hydraulique avec des matériaux locaux, à l'intérieur de l'enveloppe. Le Géotube est fabriqué sur mesure selon les besoins de l'ouvrage et il est disponible en dimensions et longueurs variables pour correspondre aux

spécifications de l'ouvrage et de l'étude. Il est idéal pour une installation à sec ou à des profondeurs d'eau n'excédant pas 5 mètres, il a d'une durée de vie de 20 à 30ans.



Figure IV.1 Installation d'un géotube, (expérience à El Kala 2008).

IV.2.1.2. Prédimensionnement

Les géotubes peuvent être utilisés pour la protection du site d'étude. Afin de proposer une solution légère, économique et réversible, on a opté pour la réalisation d'un atténuateur de houles en tubes. Pour le Pré-dimensionnement du géotube on s'est basé sur les caractéristiques suivantes :

IV.2.1.3. Caractéristiques dimensionnelles

Ces dimensions sont utilisées pour avoir une protection réussite pour cela on a utilisé les houles vingtennales de 315° et on a calculé les paramètres suivants :

- **La distance du géotube par rapport à la cote (X)**

$$X = \frac{L}{2} \quad \text{IV.1}$$

Avec :

L : la longueur d'onde au large

$L=1,56T^2$ et que $T=11,96s$ et L_c 'est la longueur d'onde à la côte.

AN : $L=1,56 (11,96)^2$ donc $L=223,144m$

Donc

$$X = \frac{223,14}{2}, X=111\text{m}$$

A 111m, la profondeur est de $d=-3\text{m}$ et à cette profondeur on a H_s varie entre 1,88m et – 2,85m
On prend la moyenne alors on aura **$H_s=2,35\text{m}$** .

Pour le diamètre, on veut implanter des géotubes immergés à **-3m** ; donc le diamètre du géotube doit être inférieur, on le prend donc **$D=2\text{m}$** .

➤ La longueur du géotube

C'est à partir de la longueur d'onde qu'on va déduire la longueur du géotube

On a

Au large :

$$L = 1,56 T^2 \quad L=223,144\text{m} \quad \text{IV.2}$$

Au pied de l'ouvrage :

$$L_p = \frac{g+T^2}{2\pi} \sqrt{\tanh\left(\frac{4\pi^2 D_p}{T^2 g}\right)} \quad \text{IV.3}$$

L_p : La longueur d'onde au pied de l'ouvrage

D_p : la profondeur au pied de l'ouvrage

$$\text{AN : } L_p=223,144 \times 0,29=64\text{m} \quad L_p=64\text{m}$$

A la côte :

$$L_c = 1,2 (X + 0,3L_p) \quad \text{IV.4}$$

$$\text{AN: } L_c = 1,2 (223,144 + 0,3 \times 64) = 155\text{m}$$

$$L_c = 155$$

La longueur du géotube (L_G)

$$\text{On a : } L_G > L_c$$

Donc la longueur du géotube $L_G = 160m$

➤ **La largeur du géotube (B)**

On a : $B = H_b \times 4$ IV.5

Le calcul de H_b

On a la longueur de la crête $L = \frac{D_p}{gT^2}$

D_p : La profondeur au pied de l'ouvrage, $D_p = 3m$

g : La force de gravité, $g=9,81$

AN : $\frac{D_p}{gT^2} = \frac{3}{9,81 \times (11,96)^2} = 0,002$

On prend la pente 0,02 et avec l'utilisation de l'abaque on aura :

$$\frac{H_b}{D_p} = 1$$

Donc : $H_b = D_p \times 1$ IV.6

AN :

$$H_b = 3 \times 1 = 3$$

Donc la largeur du géotube est de : $B=12m$

➤ **La hauteur du géotube (H)**

$H=1,5H_b$ IV.7

$$H=1,5 \times 3=4,5m$$

IV.2.1.4. Caractéristiques de stabilité

Pour la stabilité des géotubes on va utiliser la formule suivante.

$$\frac{H_s}{\Delta D} < 1$$

Et que :

$$\Delta = \left(\frac{\gamma_s - \gamma_w}{\gamma_w} \right) IV .8$$

D : épaisseur du géotube

γ_w : la masse volumique de l'eau de mer ; $\gamma_w = 1.028 \text{ t/m}^3$

γ_s : La masse volumique de sable utilisé pour remplir le géotube ; $\gamma_s = 2.65 \text{ t/m}^3$

AN :

$$\Delta = \frac{2,65 - 1,028}{1,028} , \quad \Delta = 1,57$$

Donc :

$$Hs/\Delta D = \frac{2,35}{3,14} = 0,74 \quad \text{IV.8}$$

On remarque que $Hs/\Delta D < 0$ donc on peut dire que le géotube est stable.

D'après les résultats obtenus on suggère une protection par une batterie de géotube sur une longueur de 160m ; le profil de cette variante est le suivant : (Voir le plan de masse variante n°1 et variante n°2 dans l'annexe 5 sous forme A3).

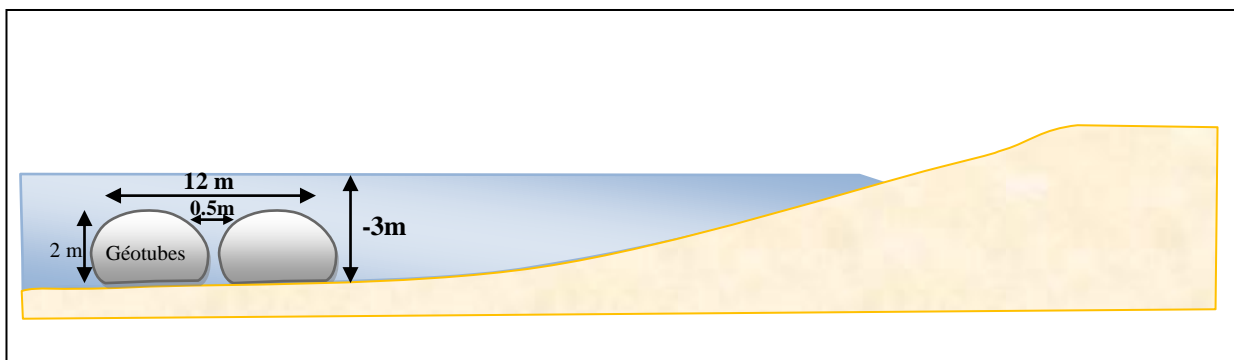


Figure IV.2 : emplacement des géotubes.

➤ **Avantage**

- Vous n'avez pas besoin de digue d'enclôture de la zone de refoulement.
- En prévoyant une couche d'étanchéité inférieure, vous pouvez recycler l'eau.
- Vous pouvez juxtaposer les Géotubes ou les empiler selon une géométrie prédéfinie.
- Vous pouvez installer les Géotubes à des endroits qui ne sont pas reliés.

- Vous utilisez les boues déshydratées des Géotubes pour la consolidation et le rehaussement des digues.
- Les boues de dragage sont une alternative attirante pour les matériaux primaires (argile, sable, limon).
- Le rechargement facile des géotextiles en un matériau non spécifique et disponible localement.
- La facilité d'exécution de ce genre de protection qui ne demande pas des moyens humains et techniques considérables.
- Les matériaux géotextiles sont inertes aux acides et bases, donc plus résistants à l'attaque chimique de l'eau de mer, ils peuvent avoir une durée de vie de 100 ans.
- L'intégration facile de ce procédé dans le paysage (les matériaux géotextiles existent en couleurs variées, selon les exigences du site concerné).
- Une solution par géotextiles coûte un cinquième (1/5) du coût d'un ouvrage en enrochement ou en BCR.
- Grâce à ses propriétés couvrantes, il réduit le tassement différentiel et facilite ainsi la maintenance

➤ Inconvénients

- lorsque des affleurements rocheux sous l'eau sont présents, le placement des enrochements sur le géotextile occasionnera d'inévitables dommages au géotextile, en créant des trous, ce qui entraînera la perte des particules fines des zones voisines.
- Leur résistance aux actions brutales de la mer est en tout état de cause limitée et les conditions du vieillissement des matériaux géotextiles ne sont pas encore toujours convenablement connues.

IV.2.2. Reprofilage de la falaise

IV.2.2.1. Définition

C'est une méthode adaptée aux falaises meubles. Des travaux de terrassement, de reprofilage sont susceptibles d'améliorer les conditions de stabilité d'une falaise ; cependant, cela nécessite une bonne connaissance de la structure géologique et des conditions d'infiltration de l'eau. Cette méthode consiste à améliorer la stabilité générale de la falaise en lui donnant une géométrie (pente) plus adéquate (abaissement de la pente générale) et en éliminant éventuellement les blocs instables dangereux.

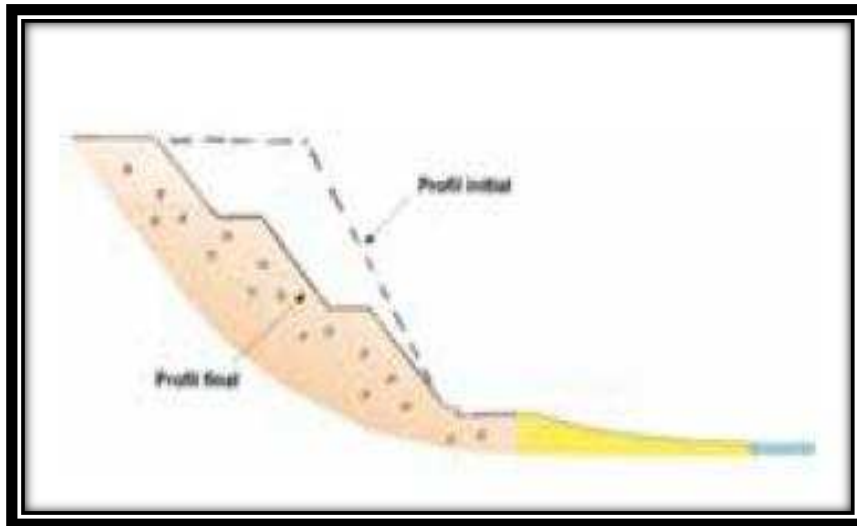


Figure IV.3 : schéma montrant le reprofilage d'une falaise.

➤ **Engins utilisés :**



Figure IV.4 : Engins utilisés pour le reprofilage d'une falaise meuble.

Dans notre étude deux types de reprofilage ont été proposés.

IV.2.2.2. Reprofilage en banquettes

C'est un reprofilage sous forme de banquettes dont l'objectif est d'avoir un double espace pour la végétation, avec une pente de 3/2 et une largeur de 2,50m et une hauteur de 5,00 puis une fixation se fait à l'aide d'un géotextile ordinaire (pour fixer la pente) et 30 cm de terre végétale qui sera

végétalisée par la plante qui s'appelle la main de la sorcière, et pour avoir une meilleur décente d'eau on a utilisé un gabionnage.(figure IV.5).

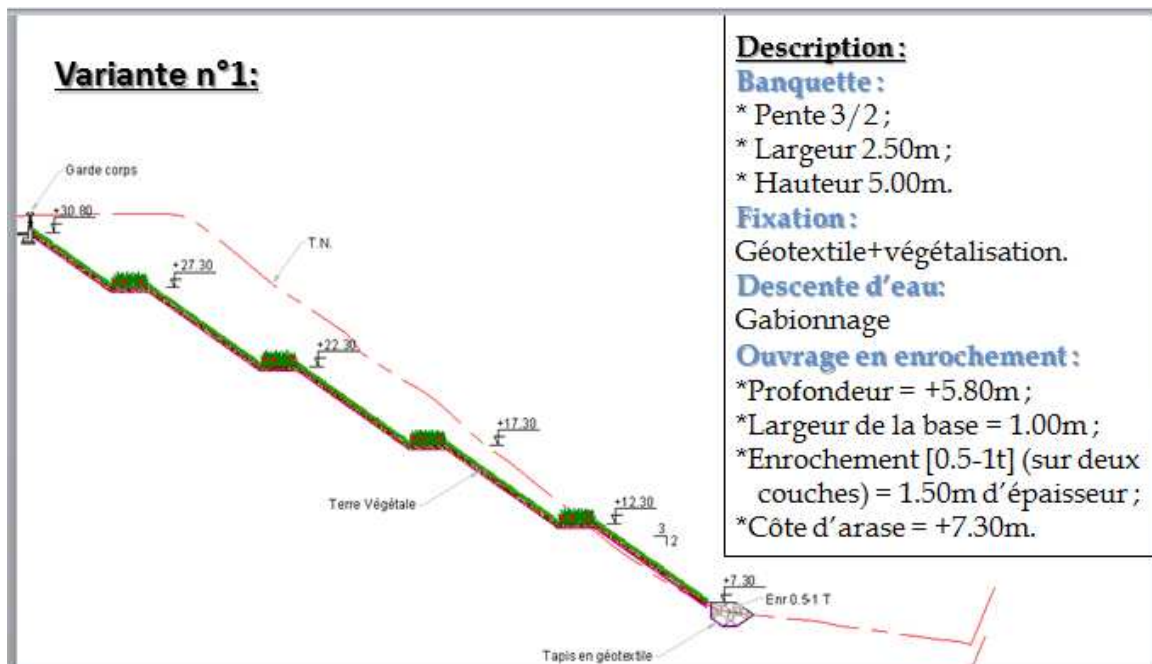


Figure IV.5 : Schéma représentatif du reprofilage en banquettes

IV.2.2.3.Reprofilage en une seule pente

Dans ce type de reprofilage on a utilisé une seule pente de 2 pour 1 (pente stable) avec une couverture en géotextile en nid abeille qui va constituer un berceau pour les plantations et 30 cm de terre végétal. (Figure IV.6)

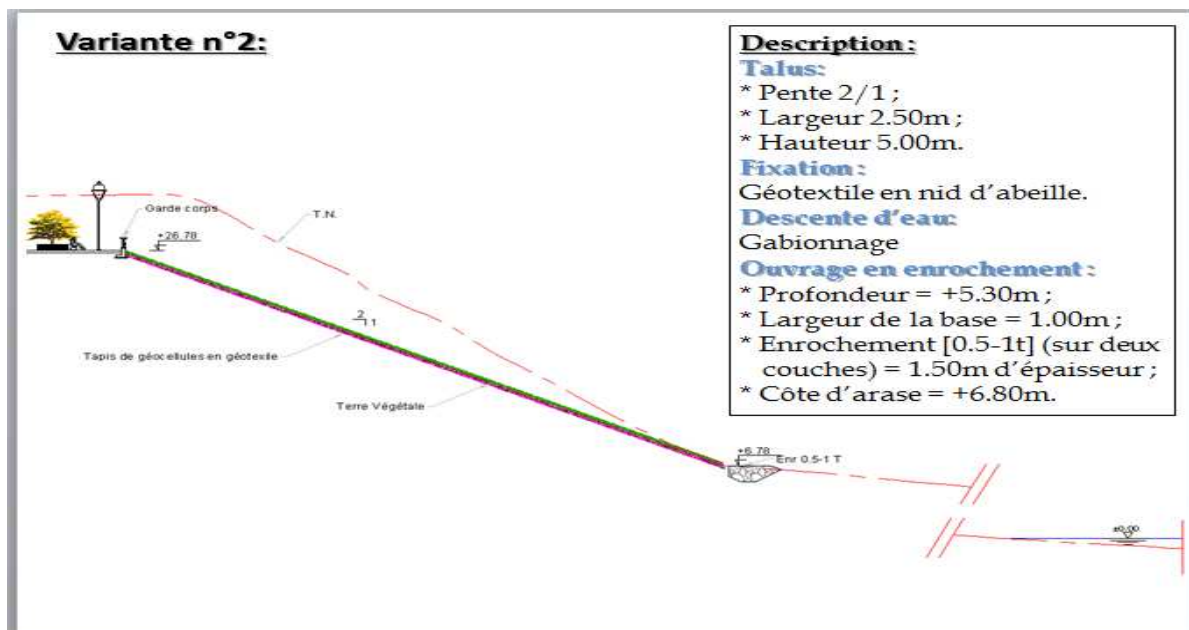


Figure IV.6: Schéma représentatif du reprofilage à pente douce.

➤ Avantages

Le coût des travaux reste peu élevé si le terrassement n'est pas important. Les études de projet sont relativement simples. C'est une solution durable. Il permet de traiter des zones sur lesquelles les volumes en jeu sont potentiellement importants.

➤ Inconvénients

La technique peut induire un recul plus ou moins important en sommet de falaise, donc cela nécessite à la fois l'absence de zones urbaines ou enjeux (proche de la bordure de la falaise) et une maîtrise foncière. Ce procédé peut perturber la biodiversité littorale (destruction des habitats principalement). Il faut un espace suffisant entre le pied et le sommet de la falaise (non adapté aux falaises rocheuses car dures). Cette technique ne peut être appliquée à tous types de falaises (notamment dans le cas de grands versants fortement inclinés). L'impact visuel est plus ou moins important en fonction des travaux.

IV.2.3. Les enrochements naturels

IV.2.3.1. Définition

Il s'agit de placer des enrochements naturels au pied de falaise, à la base du versant. Ce procédé a également comme conséquence d'atténuer l'érosion par l'action marine en pied de falaise. Cette méthode se rapproche de la méthode de rechargement des cordons littoraux. Elle permet cependant de reconstituer une butée stabilisatrice en pied de la falaise.

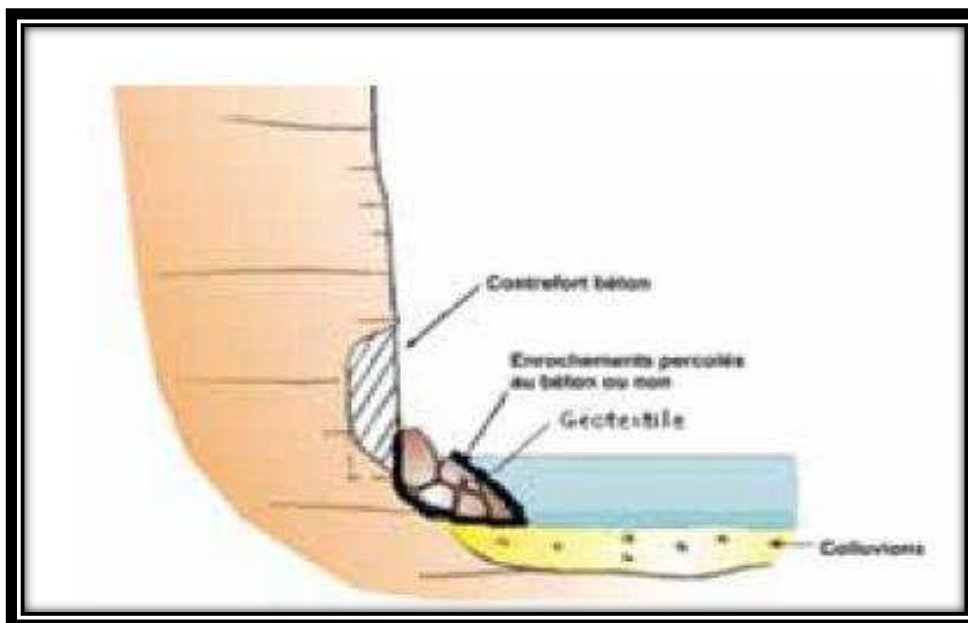


Figure IV.7: schéma montrant l'enrochement naturel au pied de la falaise.

IV.2.3.2. Prédimensionnement

Pour réussir un enrochement on doit prendre en compte les mesures et les dimensions de roches utilisées et la façon avec laquelle ils seront installés pour cela plusieurs formules pourront être utilisées tel que :

-La formule d'Hudson

Cette formule est utilisée pour calculer le poids des roches à utiliser

$$W_{50} = \frac{\rho_S H_{1/10}^3}{K_D (\frac{\rho_S}{\rho_w} - 1)^3 \cot \alpha} \quad \text{IV.9}$$

H : la houle de projet

ρ_S : La masse volumique du matériau (de bloc)

ρ_w : La masse volumique de l'eau de mer

α : La pente du talus

K_D : Coefficient de stabilité

AN : $W_{50} = 0,70t$

Ce qui fait une carapace à [1-3t].

Les caractéristiques géométriques sont les suivantes :

- Une hauteur de 7.30 m par rapport au niveau de la mer,
- Une carapace de deux couches en enrochement de catégorie [1-700kg] et d'une épaisseur de 1m50 avec une pente de 3 pour 2 et ancré jusqu'à 1.50m de profondeur,
- Un géotextile de filtration en dessous de l'ouvrage en enrochement pour éviter l'érosion interne du talus soumis aux battements des vagues.

➤ Avantages

Les études de projets restent simples et il faut avoir recours à des entreprises de génie civil classiques. C'est une méthode durable et peu onéreuse. Cependant, la simplicité des études et les coûts peuvent varier en fonction du site.

➤ Inconvénients

Cette technique s'oppose le plus souvent au développement de glissements plans peu profonds dans des versants à inclinaison moyenne et peut être également utilisée dans le cas de glissements

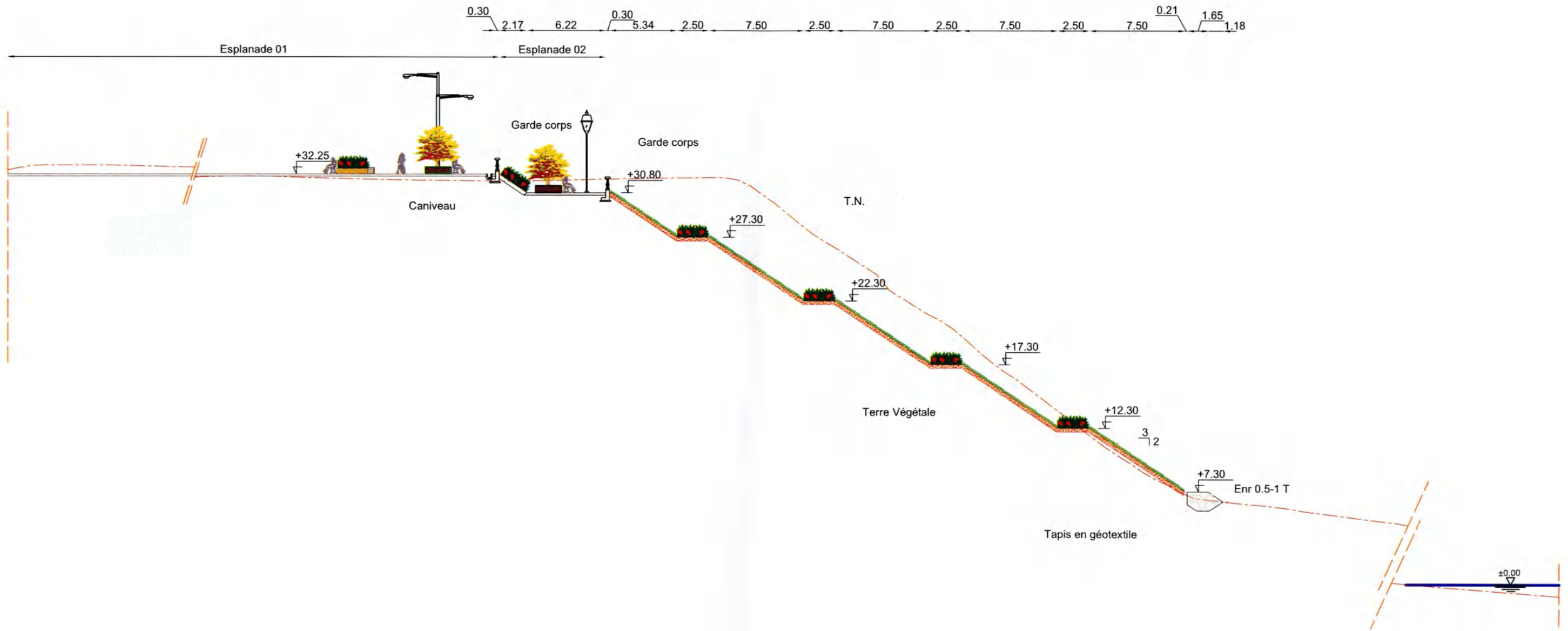
d'ampleur assez limitée en partie inférieure de falaise. Elle n'est donc pas adaptée aux instabilités en partie haute de falaise.

Les enrochements doivent être dimensionnés par rapport aux conditions de tempête. Cette méthode peut stopper les apports sédimentaires dus au recul de la falaise. Une surveillance périodique est nécessaire. L'impact paysager est relativement fort et sauf intervention limitée dans l'espace, cette technique doit être considérée comme une méthode « lourde » (discussion entre méthode « lourde » et « douce »).

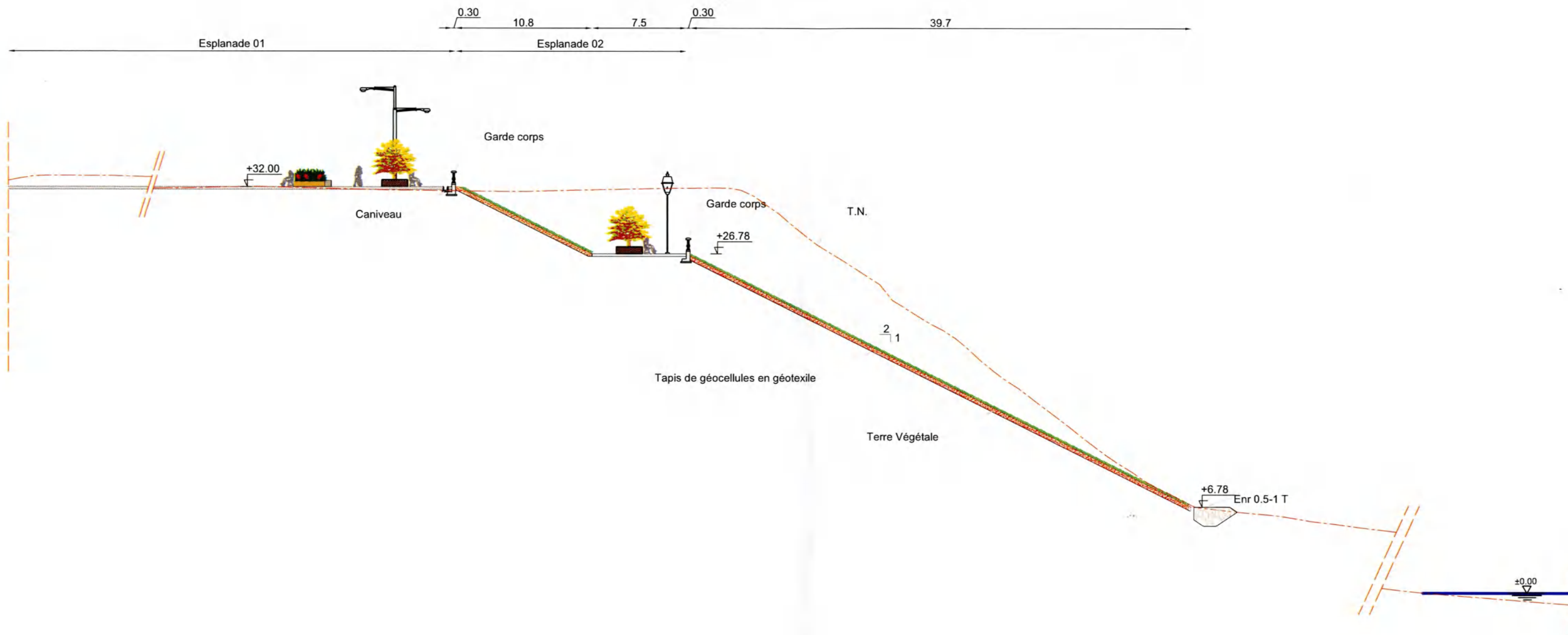
Conclusion

Les ouvrages de protection proposés pour la protection de la falaise Est de Boumerdès semblent les plus convenables pour cette protection puisqu'ils assurent une meilleure assistance et une durabilité garantie et aussi ils préservent la nature de la falaise et celle de la plage.

PROFIL TYPE
Variante 01

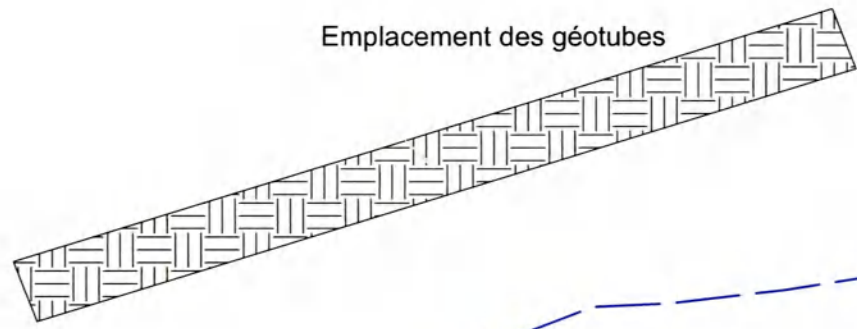


PROFIL TYPE Variante 02

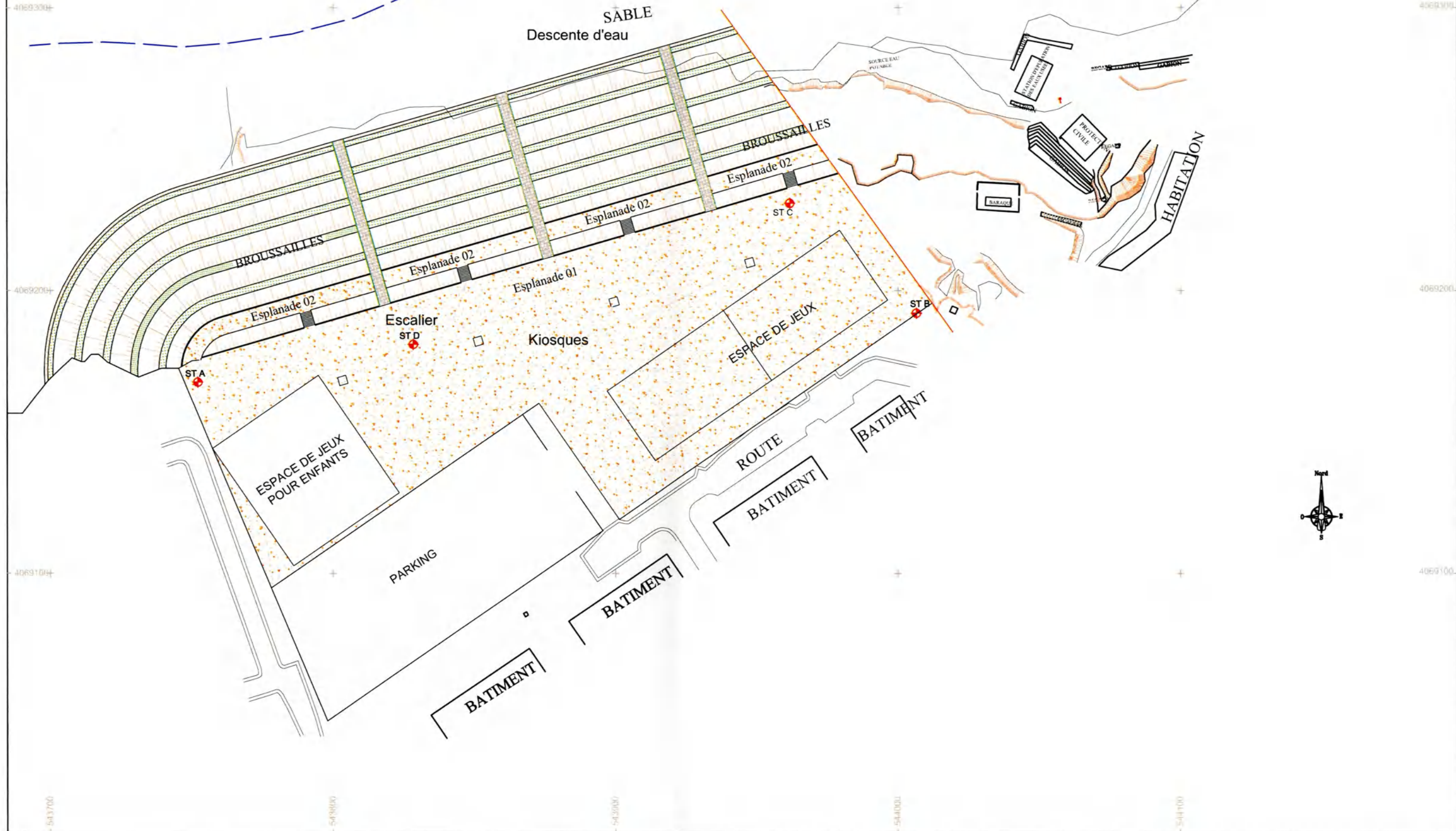


PLAN DE MASSE
Variante 01

Emplacement des géotubes



SABLE
Descente d'eau

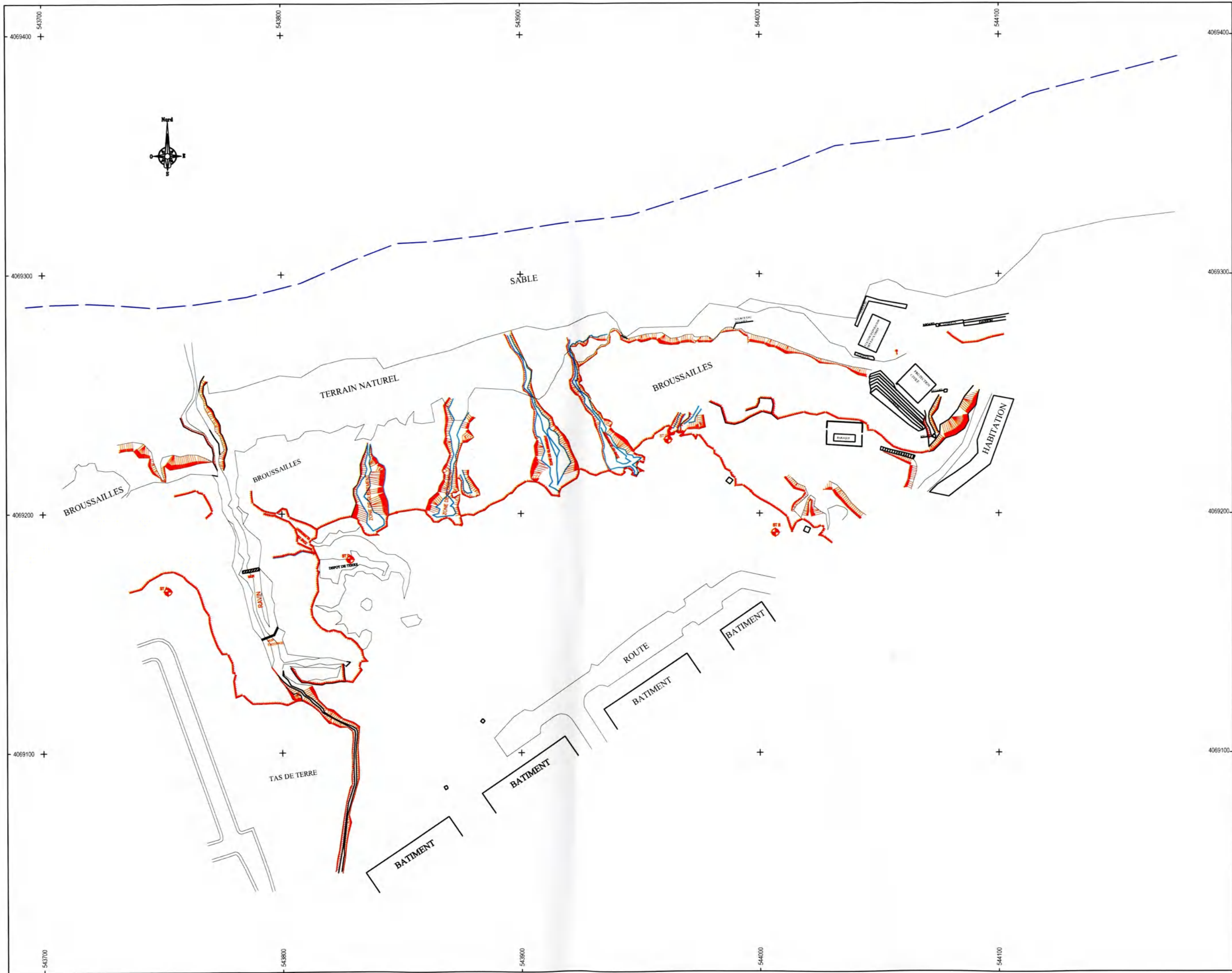


SOURCE EAU POTABLE



HABITATION





Conclusion Générale

La falaise de Boumerdès a connu dans un passé récent une soudaine érosion où plusieurs causes sont exposées. Notre travail a consisté à faire un diagnostic sur notre zone, en évaluant les paramètres physiques, hydrodynamiques et anthropiques dans un premier temps, ensuite de proposer des solutions pour la protection de cette falaise dans un deuxième temps.

Ce projet initié par le LEM, nous a permis en nous associant à leur équipe de comprendre la gestion et le suivi d'un projet d'une telle envergure.

La diversité des facteurs à l'origine de l'érosion de la falaise fait aboutir à une diversité de moyens de protection qui ne s'opposent pas forcément les uns aux autres, mais sont souvent complémentaires.

D'après les études qui ont été faites précédemment on peut constater que l'érosion de notre zone d'étude résulte en effet d'une combinaison de plusieurs facteurs, à la fois d'origine naturel et humaine, opérant à plusieurs échelles de temps et d'espace. Ce sont les constructions faites sur la falaise, ainsi que les eaux de ruissellement qui ont donné naissance à des petites fissures qui se transforment par la suite en ravins qui causent l'effondrement de la falaise, et qui perturbent la morphologie et l'écologie de cette dernière, et elle continue à aggraver la situation..

L'étude bathymétrique notamment la géomorphologie sous-marine indique que la participation de la mer à l'érosion de cette falaise est vraiment faible puisqu'on n'a pas remarqué un changement dans la partie sous-marine de notre zone.

La répartition spatiale des sédiments a dévoilé qu'une distribution de sable moyens est plus dominante ce qui témoigne que l'origine des sédiments n'est pas vraiment la falaise mais ces derniers sont issus de la plage ce qui a donné un rétrécissement de la plage, donc on peut conclure que la mer a participé à cette érosion avec un petit pourcentage.

La modélisation numérique de la réfraction de la houle démontre que notre zone d'étude est touchée beaucoup plus par les houles du secteur Nord-Ouest et que leur propagation sur notre zone d'étude se fait d'une façon frontale mais elle n'arrive pas vraiment à toucher le pied de la falaise sauf dans les grandes tempêtes, ce qui nous rassure une autre fois que la mer n'est pas vraiment la source de notre problématique.

La modélisation du transport sédimentaire a démontré que le déplacement des sédiments se fait de l'Ouest vers l'Est. En effet, cette dérive est due à une prédominance des vents de secteurs Nord-Ouest, elle induit par conséquent des courants de retour qui arrache les sédiments de la plage et les déposent vers le large et que l'influence de ces vents dans la dégradation de notre falaise est moins importante.

D'après tous ces résultats on constate que la source principale de notre problématique est bien la construction de la cité des 800 logements faites sur notre falaise et que cette construction a donné naissance à plusieurs problèmes tel que le transfert du mode d'infiltration vers le mode de ruissellement, la dégradation de la végétation, pollution.....etc.

La décision de protection de notre site et le choix du type de défense ou de protection qu'on a pris résultent d'une triple analyse se fondant sur :

- la justification de l'opportunité de la protection envisagée par rapport à la valeur des biens dommageables.
- la connaissance de l'évolution du milieu littoral, souvent influencé par des actions anthropiques.
- l'appréciation des contraintes économiques qui pondèrent la mise en place des dispositifs de protection par rapport au fonctionnement du milieu physique, notamment du point de vue environnemental.

Les ouvrages proposés présentent chacun des avantages et des inconvénients. Toutefois, nous favorisons le choix de l'ouvrage le plus convenable ou les ouvrages les plus convenants qui assurent une meilleure protection pour notre falaise.

Bibliographie

- AL sid chikh. S. ; 2011.** Etude de protection de la plage de palm Beach- azur contre l'érosion recours à la modélisation numérique et physique. Thèse Magister, ENNSMAL p10-161
- Alixé, S. ; 2002.** Evolution morpho dynamique d'une plage macro tidale à barres : Omaha Beach, Thèse de doctorat(BasseNormandie).
- Amari, S et Guessab, R. ;2005.** Travaux de protection de complexe touristique de ZERALDA. Mémoire d'ingénieur, ENSSMAL, P25-35.
- Assassi. C, et Otmani.H. ; 2010.** Etude de protection de la zone de club des pains.Mémoire d'ingénieur, ENSSMAL, P22-89.
- Bairi, A., 2005.** Dégradation de la falaise de Ain Taya causes et solutions de protection. Mémoire d'ingénieur, ENSSMAL, P40-48.
- Belkassa, R. ; 1978.** Etude de la dynamique sédimentaire de Mazefran (Thèse de 3eme cycle). ENSSMAL
- Bennamani, H. ; 2008.** Caractéristiques géologiques et géotechniques de BOUMERDES. Mémoire d'ingénieur, ENSSMAL.
- Bonfille, R., 1980.** Cours d'hydraulique maritime 3^{ème} édition. Edition Masson.
- Brière, C. ; 2003.** Etude de la dynamique de la zone côtière anthropisée : l'embouchure de l'Adour et les plages adjacentes d'Anglet. Université de Pau et des pays de l'Adour.
- Berkenoun, N et Sallay, M. ; 2012.** Etude de protection du rivage du complexe culturel de Chenoua, Mémoire d'ingénieur, ENSSMAL.
- Chamley. H., 1987.** Base de sédimentologie. 2ème Ed DUNOD, paris, 178p
- Caplain, C. ; 2011.** Etude expérimentale de l'érosion d'un massif de sable par une houle monochromatique.
- Duval. M. ; 2007.** Etude de déferlement d'une onde de stokes et du la dissipation associée par simulation direct, thèse de doctorat, université de Toulouse.

Djemaa.F. ; 1997. Etude morpho-sédimentaire et perspectives d'aménagement de la plage Ouest de Mazefran (Colonel Abbas). ENSSMAL, p45.

Francis, P. ; 1990. La protection du littoral, ED Mb Formation, p46

Florent.G. ; 2009. Modélisation physique et la dynamique hydro- sédimentaire des plages. Thèse de doctorat, université de Joseph Fourier - Grenoble I, P17, p18.

Jean.F. ; 2001. Protection du littoral.

Jean Chapon ; 1984-Travaux Maritimes, Tome I, p200, 209-211, 262.

D'ingénieur, ENSSMAL.

Jeanson. M. ; 2004. Morpho-dynamique du littoral de Mayotte, thèse de doctorat de géophysique, université du littoral côte d'opale.

Ouacif, D.; 1995. Evolution et prospective de la falaise de BOUMERDES. Mémoire d'ingénieur, ENNSMAL

Larid, M. ; 2013. Cours Aménagement du littoral, 4eme année Aménagement du littoral, ENNSMAL.

Mezouar, K. ; 2009. Etude comparative entre les méthodes de protection des deux littoraux Algérien et Roumain. Thèse de doctorat, Université Technique de Construction de Bucarest.

Mouhoubi, N et Ouael, K. ; 2012. Etude d'une protection pour la plage de Sidi-Giles Mémoire d'ingénieur, ENNSMAL.

Paskoff. R. ; 1992. Les littoraux, impact des aménagements sur leur évolution. 2ème Ed Masson, Paris, 256p ;

Pierre. H. ; 2001. 2_ courants, vagues et marées, mouvement de l'eau, Ed Agence de l'eau seine Normandie.

Regnauld. H. ; 1999. Les littoraux. Ed ARMAND COLIN, 95p.

SOAZIG. P.; 2010. Analyse multiscalaire et l'évolution et du comportement des systèmes côtiers, thèse université Renne 2 haute Bretagne.

Bibliographie

SSMO, 1970.Summary of Synoptic Meteorological Observations. U.S Naval Weather Service Command. Mediterranean marine, Volume 2, October 1970, 632p.

Les listes

Liste des abréviations

ONM : Office National de la Météorologie.

ANRH : Agence National des Ressources Hydrauliques.

CTS : Centre de Travaux sur Site.

°C : Degré Celsius.

µm : Micro mètre.

Cm : Centimètre.

m : Mètre.

ml : Mètre linéaire.

LEM : Laboratoire d'étude maritime.

S₀ : sorting de trask.

SK : skenwness de trask

S.S.M.O: Summary of Synoptic Météorological Observations.

Figure I.1 : Relation spatio-temporelle des systèmes morpho-dynamique côtier (Stepanian, 2002).....	3
Figure I.2 : composant d'un système morpho-dynamique côtier.....	4
Figure I.3: Présentation d'une falaise littorale.....	5
Figure I.4 : Méga-falaises de 1005 mètres à "Umilehi Point" à Hawaï.....	6
Figure. I.5: Falaise peu consolidée formée de sable et d'argile qui représente notre zone d'étude.....	7
Figure I.6 : différents types de falaises.....	7
Figure II.1 : Situation géographique de la wilaya de Boumerdés(Google Earth, 2014).....	11
Figure II.2 : Situation géographique de la zone d'étude « falaise de Boumerdes » (GoogleEarth,2014).....	12
Figure II.3 : Coupe lithologie de la falaise de Boumerdés(LEM, 2014).....	15
Figure II.4 : Température mensuelles en (°C) de la wilaya d'Alger,(O.N.M, Dar El Bieda 1996-2005).....	16
Figure II.5 : Profil de variation des températures moyennes de la wilaya d'Alger,(ONM, Dar El Bieda 1996-2005).....	17
Figure II.6 : Moyennes mensuelles des précipitations de 1985 à 2008 dans la région de Boumerdes (A.N.R.H, 2014).....	18
Figure II.7 : Carte hydrologique de la wilaya de Boumerdes, (Google Earth, 2014).....	19
Figure II.8 : Rose des vents (MEDATLAS, région centre 31N, in LEM).....	20
Figure II.9: Rose des houles (S.S.M.O, région centre 31N, 1963- 1970).....	21
Figure II.10: Fréquence annuelle d'observation de la houle par direction au large (source S.S.M.O, région centre 31N, 1963-1970).....	22
Figure II.11 : Evolution du trait de côte de la plage sablière de Boumerdes (Google earth, 2014).....	26
Figure.II.12: Les mécanismes de l'érosion pluviale.....	27

Figure.II.13: Dépôt de colluvion au pied du talus et au niveau de la plage.....	28
Figure.II.14 : Formes d'érosion pluviale observées.....	29
Figure.II.15: Etat de surface de la falaise.....	30
Figure.II.16 : Géométrie d'un talus érodés.....	30
Figure III.1 : Levé topographique de la falaise de Boumerdés(Google Earth, 2014).....	33
Figure III.2 : levé bathymétrique de la plage sablière de Boumerdés(Google Earth, 2014).....	35
Figure III.3 : carte bathymétrique de la sablière de Boumerdés en 2D.....	38
Figure III.4 : Carte bathymétrique en 3D de la partie sous-marine et partie aérienne de Boumerdés	39
Figure III.5 : Carte bathymétrique interpolée et localisation des profils transversaux de la plage sablière de Boumerdés.....	40
Figure III.6 : Profil sous- marin n°1.....	41
Figure III.7 : situation des stations de prélèvementsde la plage sablière de Boumerdés(Google Earth, 2014).....	42
Figure III.8 : Répartition des médianes (Q50) dans la plage sablière de Boumerdés.....	44
Figure III.9: La répartition des déciles supérieurs (D90) dans la plage sablière de Boumerdés.....	45
Figure III.10 : Variation de l'indice de classement et la médiane (So).....	46
Figure III.11 : Variation du coefficient d'asymétrie et la médiane (Sk).....	47
Figure III.12 : choix des directions défavorable au site d'étude (Google Earth, 2014).....	50
Figure III.13 : Organisme du déroulement des étapes de la réalisation de la réfraction.....	51

Figure III.14 : Réfraction de la houle pour une direction N360° et une période de 12,92s.....	52
Figure III.15: Réfraction de la houle pour une direction N45° et une période de 12,73s.....	53
Figure III.16 : Réfraction de la houle pour une direction N315° et une période de 11,9s.....	54
Figure III.17 : Littoraux à falaises, plage adossées.....	56
Figure III.18: Les trois modes de transport sédimentaire (Camenen, 2002): transport par charriage, transport par suspension, transport par saltation.....	57
Figure III.19 : Schéma probable de la dynamique sédimentaire.....	58
Figure IV.1 Installation d'un géotube, (expérience à El Kala 2008).....	63
Figure IV.2 : emplacement des géotubes.....	66
Figure IV.3 : schéma montrant le reprofilage d'une falaise.....	68
Figure IV.4 : Engins utilisés pour le reprofilage d'une falaise meuble.....	68
Figure IV.5 : Schéma représentatif du reprofilage en banquettes.....	69
Figure IV.6: Schéma représentatif du reprofilage à pente douce.....	69
Figure IV.7: schéma montrant l'encrochement naturel au pied de la falaise	70

Tableau n°1: Fréquences mensuelles de la houle du large par direction (S.S.M.O, 1963-1970).....	32
Tableau n°2: Amplitudes des houles en fonction des directions et leurs périodes de retour (SSMO, 1963-1970).....	32
Tableau n°3 : Répartition des états de mer par période (SSMO, 1963-1970).....	33
Tableau n°4: La relation entre la pente d'une falaise et sa difficulté à lutter contre l'érosion.....	41
Tableau n°5 : Hauteurs des houles annuelles retenues par secteur de provenance au large...	60
Tableau n°6 : Les moyennes des résultats obtenus par direction et par période de la houle vingtennale à -10.00m.....	63
Tableau n° 7 : Les moyennes des résultats obtenus par direction et par période.....	71
Tableau n°8 : Récapitulatif de la fréquence d'observation et de la durée d'action de la houle.....	72
Tableau n°9 : Récapitulatif du bilan d'énergie annuel par direction et par période.....	72
Tableau n°10: Récapitulatif du calcul de l'angle « α » et de la fonction $f(\alpha)$	72
Tableau n°11 : Récapitulatif du transit sédimentaire par période et par direction.....	73

Annexe

Les données climatiques

Station: Boumerdes

X : 569, 15m **Y :** 384,4 m **Z :** 56m

Précipitations : précipitation mensuelles et annuelles exprimées en millimètres (mm).

Station : ALGER DAR EL BEIDA

	Sept	Oct	Nov	Dec	Janv	Fev	Mars	Avril	Mai	Juin	juil	Aout	Annuel
1986	17,4	58,4	72,7	203,8	84,5	148	18,5	1,7	11,8	28,7	0	0	645,5
1987	0	35,5	106,7	71,5	36,3	39,9	47,8	32,8	23,5	40,4	0	0	434,3
1988	40,2	2,9	83,3	183,2	51,4	22,5	30	82,2	10,2	5,6	0	5,1	516,6
1989	22,4	44,4	30,2	44,6	101,2	0	34,9	91,9	40,6	3,6	0	0	413,8
1990	19,2	61,4	40,9	123,8	95,7	110,3	47,8	35,9	20,5	6,4	0	0	394,2
1991	5,8	125,6	10,8	3,8	154,1	19,9	64	51,5	47,6	7,9	0,9	0	491,9
1992	-999	-999	-999	-999	-999	-999	30,2	68,7	31,9	0	0	0	130,4
1993	19,4	39,9	61,5	201,4	-999	-999	0,4	53,6	0	0	0	0	376,2
1994	-999	67,3	52,2	94,7	124,7	49	99,9	27,6	0	18,5	0	18	547,2
1995	16,3	50	25,3	34,7	84,3	157,9	47,8	142,2	33	32	4,2	1,2	634,9
1996	16,5	17,5	30	21 ?6	20 ?2	18,7	8,5	85,9	19	6,6	1,8	2,2	302,5
1997	31,9	76,4	119,7	102,7	34,4	70,3	43	57,8	165,5	0	0	0	701,6
1998	27,2	68,5	119,6	65,5	118,7	120,5	71,3	24,3	1,8	3,6	0	4,2	625,2
1999	17,1	28,5	207,4	184,3	9,1	1,8	21,1	12,3	70,7	0	0,8	0	553,1
2000	9,5	48,6	89,5	57,6	146,2	58,3	0	33,3	19,4	0	0	0	462,4
2001	21,9	12	68,5	65	64,5	4,7	31,2	19 ,4	18,1	0	0	15,3	320,7
2002	25,7	72,2	232,3	173,2	226,9	113,8	28,1	112,5	19,5	0	0	0,8	1005
2003	31,2	43,4	44,6	99,5	102	44,7	75,2	62,2	177,1	0,2	27,3	0	707,4
2004	10,5	51,1	86,9	101,3	116,5	101,9	47,8	21,9	1,6	0	0	0	539,6
2005	51,3	57,1	83,4	95,1	141,4	119,1	28,8	2,8	165,4	0	0	4,8	749,2
2006	23,8	12,8	9,3	323,9	9,9	52,2	151,5	109,2	14,8	11,6	0	1,9	730,9
2007	52,2	101,9	116,4	100,5	11,9	18,8	99,2	21,2	93,7	4,1	6,5	0	626,4
2008	29,9	35,3	171,1	130,4	133,5	21,7	776,6	-999	2,3	0	0	0	597,5

Altitude : 25m - Latitude : 36° 41 N - Longitude : 03° 13E.

Températures : Températures maximales moyennes exprimées en degrés Celsius (C°)

	Janv	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec	Annuel
1996	19,1	15,6	18,9	20,4	23,3	26,7	30,8	31,1	27,2	23,1	21,2	19,2	23,1
1997	18,2	18,8	19,7	22,1	25	29,1	28,8	31,5	29,8	26,9	21	18,4	24,2
1998	17,9	18,8	19,7	21,5	23	27,9	31,5	32	30,5	24,7	20,4	17,1	23,8
1999	16,9	14,4	19,4	22,5	26	29	32,1	33,3	30,3	28	18,8	16,9	24,2
2000	16,2	19,1	20,3	23	25,8	28,4	32,2	33,9	29,4	24,9	21,7	19,9	24,6
2001	18,8	17,8	24,1	22,8	24,7	32,1	32,3	33,2	29,7	29,7	19,4	16,5	25,1
2002	17,8	18,6	21,3	22,1	26,6	29,7	30,6	30,8	29,7	29,7	21,6	19,4	24,6
2003	15,5	15,7	20,1	21,6	24,6	32,2	34	43,8	29,9	29,9	21,6	17	24,5
2004	17,4	18,4	18,4	21,3	21,9	28,9	31,1	34,7	31,7	30,7	19,8	17,5	24,1
2005	14,9	14,3	18,5	21,5	26	30	32,6	32,3	29,3	29,3	20	16,8	23,7

Températures : Températures minimales moyennes exprimées en degrés Celsius (C°) dans la région de Boumerdes.

	Janv	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec	Annuel
1996	9,5	7	7,8	9,9	11,4	15,3	18,2	20,2	15,9	11,2	9,5	8	12
1997	8,5	5	4	8,9	14,4	16,8	18,18	20	18,8	15,5	11,5	8,1	12,6
1998	6,2	6	5,8	9,2	12,7	15,4	18,1	19,4	18,8	11,2	9,6	5,3	11,5
1999	6,4	4,8	8,3	7,9	14,2	17,6	18,8	19,3	19,9	16,9	9,2	7,3	12,8
2000	2,1	4,1	6,8	9,9	14,9	16,2	19,6	20,2	17,4	12,9	10,1	7,4	11,7
2001	5,7	4,2	9,2	7,3	11,5	15,5	18,4	19,5	17,6	16,1	9,2	3,7	11,6
2002	4,7	3,5	6,9	8,4	10,9	16,1	18,6	22,2	16,5	13,2	10,5	8,5	11,5
2003	6,3	5,1	7,2	9,6	12,3	18,5	20,6	20,2	18,4	15,7	10,9	6,9	12,9
2004	5,7	6,6	7,9	8,4	11	15,5	18,4	20,9	17,9	15,3	7,7	7,6	11,9
2005	1,6	3,3	7,6	9,4	12,7	16,9	19,2	18,4	16	14	8,7	6,1	11,2

Les coordonnées géographiques des stations de prélèvements, plage sablière Boumerdes, 2014.

➤ **Levé topographique de la falaise de Boumerdes :**

Points délimitant la zone d'étude pour lever topographique :	X	Y
A	543678.08 m E	4069275.76 m N
B	544069.38 m E	4069352.65 m N
C	543809.20 m E	4069038.23 m N
D	544038.50 m E	4069187.01 m N

➤ **Levé bathymétrique de la plage sablière de Boumerdes :**

Points délimitant la zone d'étude pour lever bathymétrique :	X	Y
Départ	543565.59 m E	4069263.47 m N
F	543413.28 m E	4070256.47 m N
E	543991.23 m E	4070375.29 m N
Arrivée	544154.27 m E	4069380.51 m N

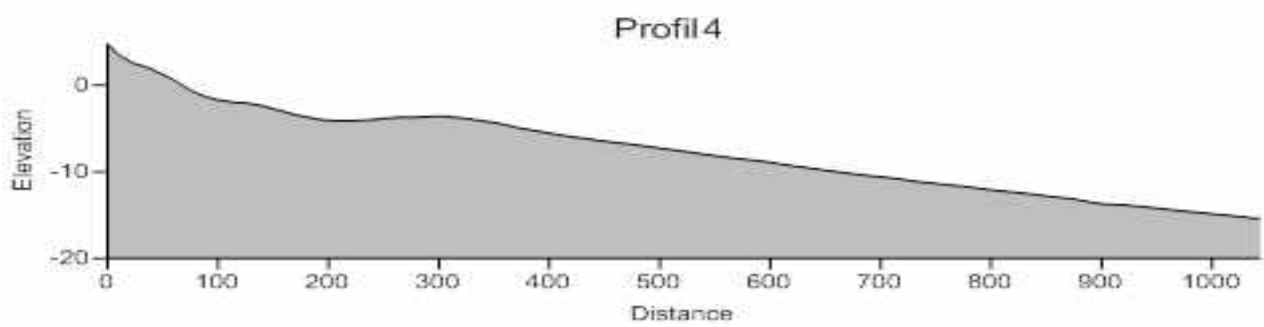
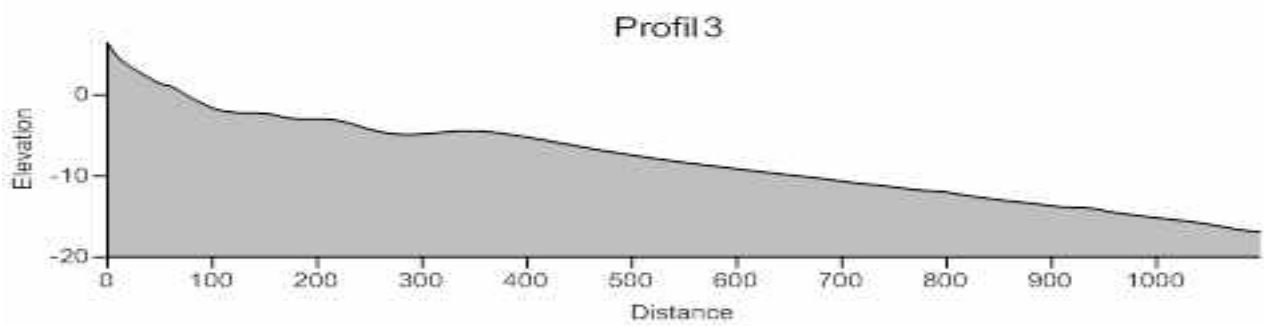
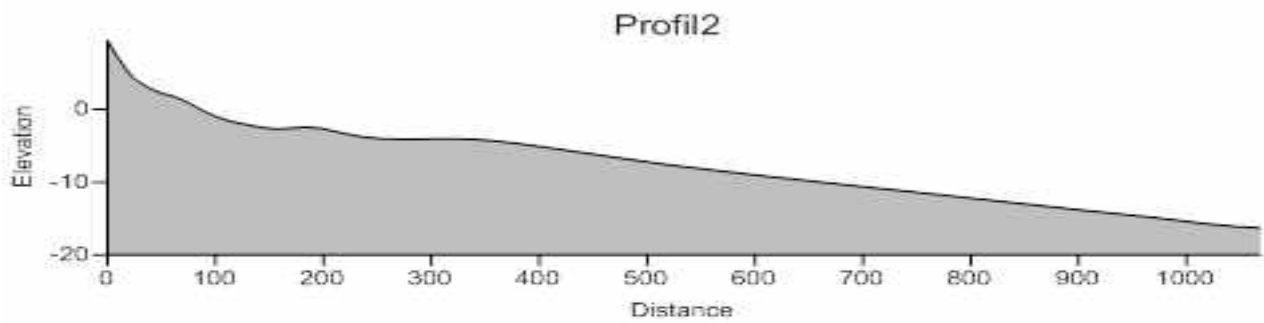
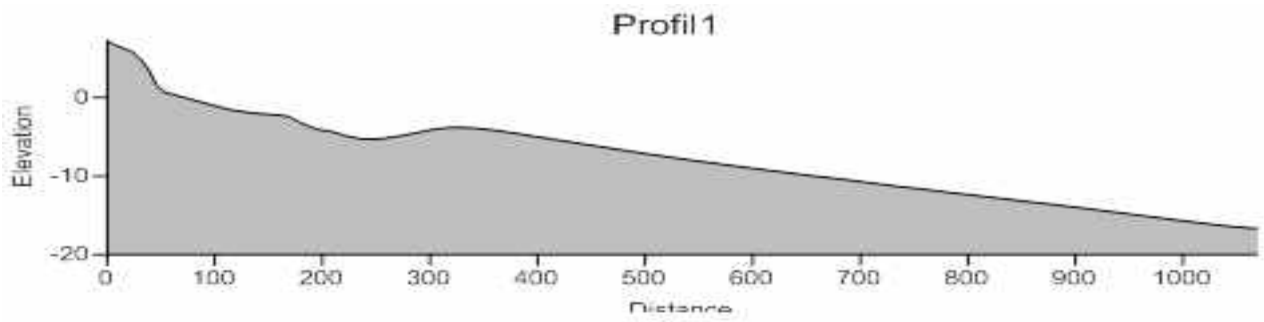
➤ **Positionnement des stations de prélèvements dans la plage sablière de Boumerdes :**

STATIONS DE PRELEVEMENT	X	Y
S0	543559.00 m E	4069275.00 m N
S1	543552.94 m E	4069313.02 m N
S2	543545.49 m E	4069364.13 m N
S3	543538.55 m E	4069412.48 m N
S4	543531.36 m E	4069460.51 m N
S5	543522.93 m E	4069510.08 m N
S6	543513.96 m E	4069567.97 m N
S7	543565.00 m E	4069574.00 m N
S8	543573.00 m E	4069517.00 m N
S9	543580.00 m E	4069466.00 m N
S10	543588.00 m E	4069418.00 m N
S11	543595.00 m E	4069371.00 m N
S12	543603.00 m E	4069320.00 m N
S13	543609.00 m E	4069280.00 m N
S14	543658.00 m E	4069289.00 m N
S15	543652.00 m E	4069328.00 m N
S16	543644.00 m E	4069377.00 m N
S17	543637.00 m E	4069425.00 m N
S18	543630.00 m E	4069473.00 m N

Annexe 2

STATIONS DE PRELEVEMENT	X	Y
S19	543622.00 m E	4069527.00 m N
S20	543614.00 m E	4069586.00 m N
S21	543663.00 m E	4069593.00 m N
S22	543671.00 m E	4069535.00 m N
S23	543679.00 m E	4069480.00 m N
S24	543686.00 m E	4069432.00 m N
S25	543694.00 m E	4069381.00 m N
S26	543701.00 m E	4069335.00 m N
S27	543706.00 m E	4069297.00 m N
S28	543754.00 m E	4069308.00 m N
S29	543749.00 m E	4069346.00 m N
S30	543743.00 m E	4069392.00 m N
S31	543735.00 m E	4069443.00 m N
S32	543728.00 m E	4069493.00 m N
S33	543719.00 m E	4069549.00 m N
S34	543711.00 m E	4069603.00 m N
S35	543761.00 m E	4069609.00 m N
S36	543769.00 m E	4069557.00 m N
S37	543778.00 m E	4069500.00 m N
S38	543785.00 m E	4069451.00 m N
S39	543792.00 m E	4069400.00 m N
S40	543800.00 m E	4069353.00 m N
S41	543805.00 m E	4069315.00 m N
S42	543854.00 m E	4069327.00 m N
S43	543849.00 m E	4069363.00 m N
S44	543841.00 m E	4069409.00 m N
S45	543833.00 m E	4069461.00 m N
S46	543826.00 m E	4069509.00 m N

➤ **Les profils bathymétriques de la plage sablière de Boumerdes:**



Données de houle au large :**Fréquence d'apparition (%) de la houle au large :**

Périodes (s)	classes	Hs	Nord	Nord- Est	Ouest	Nord- Ouest	Est	Sud	Total
6	0	ind	0	0	0	0	0		0
	0,5	0 à 0,5	179	236	255	97	353	0,35	767
	1	0,5 à 1	263	615	546	182	818	0,79	1606
	1,5	1 à 1,5	148	462	607	147	574	1,27	1364
	2	1,5 à 2	77	197	363	81	226	1,77	718
8	2,5	2 à 2,5	41	69	224	41	49	2,26	375
	3	2,5 à 3	25	25	107	19	25	2,76	176
	3,5	3 à 3,5	14	8	53	7	6	3,26	82
	4	3,5 à 4	3	5	31	5	1	3,76	44
10	5	4 à 5	5	5	24	3	0	4,53	37
	6	5 à 6	3	5	5	0	0	5,52	13
	7	6 à 7	0	0	6	0	1	6,52	6
	9	7 à 9	0	0	3	0	0	8,06	3
	11	9 à 11	0	0	1	0	0	10,05	1
	13,5	11 à 13,5	0	0	0	0	0	12,31	0

Résultats de la réfraction de la houle :

Résultats de la réfraction du secteur N 45°, Tp= 6s et Hs = 1,09m.

Caractéristiques de la houle au large Dir: °N 45 Tp=6 s H= 1.09m							
N ° point	X(utm)	Y(utm)	Hs	Tp	Kr	Angle d'arrivé°	Prof.(m)
1	542997	4070406	0,96877	5,67	0,89	39,98	-20,0
2	543496	4070359	0,91656	5,67	0,84	37,73	-19,5
3	544056	4070665	0,91926	5,67	0,84	37,82	-19,8
4	544609	4070846	0,87914	5,67	0,81	36,41	-18,5
5	545150	4071206	0,91177	5,67	0,84	36,79	-18,7
6	543279	4070228	0,90069	5,67	0,83	37,38	-15,7
7	543766	4070243	0,85716	5,67	0,79	34,39	-15,4
8	544149	4070552	0,87347	5,67	0,80	36,10	-16,0
9	544790	4070657	0,77277	5,67	0,71	29,95	-13,8
10	544829	4070421	0,71861	5,67	0,66	24,15	-11,1
11	544338	4070263	0,73899	5,67	0,68	30,62	-11,4
12	543608	4070100	0,83173	5,67	0,76	33,34	-12,1
13	543047	4070038	0,87472	5,67	0,80	35,60	-11,9
14	543337	4069973	0,82317	5,67	0,76	32,63	-9,9
15	544153	4070073	0,72948	6,23	0,67	28,97	-9,5
16	544736	4070208	0,66967	6,23	0,61	22,21	-9,0
17	545200	4071530	0,9849	5,67	0,90	40,22	-22,9
18	544667	4071128	0,95098	5,67	0,87	39,20	-22,3
19	544160	4070800	0,94039	5,67	0,86	38,65	-22,1
20	543700	4070494	0,92693	5,67	0,85	37,94	-21,5
21	542916	4070471	0,98773	6,23	0,91	40,64	-22,4
22	542641	4070386	0,98938	6,23	0,91	40,47	-20,8

Résultats de la réfraction du secteur N 45°, Tp= 8s et Hs = 2,56m.

Caractéristiques de la houle au large Dir: °N 45 Tp=8 s H= 2.56m							
N ° point	X(utm)	Y(utm)	Hs	Tp	Kr	Angle d'arrivé °	Prof.(m)
1	542997	4070406	2,01	7,84	0,79	35,3	-20,0
2	543496	4070359	1,85	7,84	0,72	31,3	-19,5
3	544056	4070665	1,89	7,84	0,74	31,0	-19,8
4	544609	4070846	1,81	7,84	0,71	29,0	-18,5
5	545150	4071206	1,90	7,84	0,74	28,8	-18,7
6	543279	4070228	1,83	7,84	0,72	31,3	-15,7
7	543766	4070243	1,77	7,84	0,69	26,0	-15,4
8	544149	4070552	1,81	7,84	0,71	28,6	-16,0
9	544790	4070657	1,61	7,84	0,63	20,2	-13,8
10	544829	4070421	1,53	7,84	0,60	13,4	-11,1
11	544338	4070263	1,58	7,84	0,62	21,9	-11,4
12	543608	4070100	1,72	7,84	0,67	25,2	-12,1
13	543047	4070038	1,82	7,84	0,71	29,0	-11,9
14	543337	4069973	1,71	7,84	0,67	25,0	-9,9
15	544153	4070073	1,61	7,84	0,63	19,7	-9,5
16	544736	4070208	1,44	7,84	0,56	11,8	-9,0
17	545200	4071530	2,07	7,84	0,81	34,0	-22,9
18	544667	4071128	1,96	7,84	0,77	32,9	-22,3
19	544160	4070800	1,93	7,84	0,75	32,2	-22,1
20	543700	4070494	1,89	7,84	0,74	31,3	-21,5
21	542916	4070471	2,07	7,84	0,81	36,4	-22,4
22	542641	4070386	2,09	7,84	0,82	35,8	-20,8

Résultats de la réfraction du secteur N 45°, Tp= 10s et Hs = 5,05.

Caractéristiques de la houle au large Dir: °N 45 Tp=10 s H= 5.05m							
N ° point	X(utm)	Y(utm)	Hs	Tp	Kr	Angle d'arrivé°	Prof.(m)
1	542997	4070406	3,23	10	0,64	32,25	-20,0
2	543496	4070359	3,17	10	0,63	32,30	-19,5
3	544056	4070665	3,33	10	0,66	31,78	-19,8
4	544609	4070846	3,37	10	0,67	31,72	-18,5
5	545150	4071206	3,41	10	0,68	31,69	-18,7
6	543279	4070228	3,19	10	0,63	32,56	-15,7
7	543766	4070243	3,08	10	0,61	32,29	-15,4
8	544149	4070552	3,30	10	0,65	31,88	-16,0
9	544790	4070657	3,34	10	0,66	31,81	-13,8
10	544829	4070421	3,28	10	0,65	31,91	-11,1
11	544338	4070263	3,29	10	0,65	32,15	-11,4
12	543608	4070100	3,07	10	0,61	32,73	-12,1
13	543047	4070038	3,20	10	0,63	32,66	-11,9
14	543337	4069973	3,22	10	0,64	33,03	-9,9
15	544153	4070073	3,06	10	0,61	32,30	-9,5
16	544736	4070208	3,23	10	0,64	32,22	-9,0
17	545200	4071530	3,43	10	0,68	31,67	-22,9
18	544667	4071128	3,41	10	0,68	31,65	-22,3
19	544160	4070800	3,38	10	0,67	31,72	-22,1
20	543700	4070494	3,23	10	0,64	31,96	-21,5
21	542916	4070471	3,27	10	0,65	32,14	-22,4
22	542641	4070386	3,25	10	0,64	32,25	-20,8

Résultats de la réfraction du secteur N 315°, Tp= 6s et H_s= 1,10m

Caractéristiques de la houle au large Dir: °N 315 Tp=6s H= 1,10m							
N ° point	X(utm)	Y(utm)	Hs	Tp	Kr	Angle d'arrivé°	Prof.(m)
1	542997	4070406	1,06	6,23	0,96	316,6	-20,0
2	543496	4070359	1,05	6,23	0,96	317,0	-19,5
3	544056	4070665	1,07	6,23	0,97	315,5	-19,8
4	544609	4070846	1,07	6,23	0,97	315,4	-18,5
5	545150	4071206	1,07	6,23	0,97	315,3	-18,7
6	543279	4070228	1,04	6,23	0,94	318,1	-15,7
7	543766	4070243	1,03	6,23	0,93	317,7	-15,4
8	544149	4070552	1,05	6,23	0,96	316,0	-16,0
9	544790	4070657	1,04	6,23	0,95	315,9	-13,8
10	544829	4070421	1,02	6,23	0,93	316,4	-11,1
11	544338	4070263	1,03	6,23	0,93	317,5	-11,4
12	543608	4070100	1,00	6,23	0,91	319,8	-12,1
13	543047	4070038	1,01	6,23	0,92	319,1	-11,9
14	543337	4069973	1,00	6,23	0,91	321,2	-9,9
15	544153	4070073	0,98	6,23	0,90	319,0	-9,5
16	544736	4070208	1,01	6,23	0,91	318,3	-9,0
17	545200	4071530	1,08	6,23	0,98	315,2	-22,9
18	544667	4071128	1,08	6,23	0,98	315,2	-22,3
19	544160	4070800	1,08	6,23	0,98	315,3	-22,1
20	543700	4070494	1,07	6,23	0,97	316,0	-21,5
21	542916	4070471	1,07	6,23	0,97	316,2	-22,4
22	542641	4070386	1,07	6,23	0,97	316,5	-20,8

Résultats de la réfraction du secteur N315°, T= 8s et H_s= 2,64m

Caractéristiques de la houle au large Dir: °N 315 Tp=8s H= 2,64m							
N ° point	X(utm)	Y(utm)	Hs	Tp	Kr	Angle d'arrivé	Prof.(m)
1	542997	4070406	2,37	7,84	0,90	320,5	-20,0
2	543496	4070359	2,34	7,84	0,89	321,0	-19,5
3	544056	4070665	2,43	7,84	0,92	317,0	-19,8
4	544609	4070846	2,45	7,84	0,93	316,6	-18,5
5	545150	4071206	2,47	7,84	0,93	316,3	-18,7
6	543279	4070228	2,33	7,84	0,88	323,3	-15,7
7	543766	4070243	2,27	7,84	0,86	321,4	-15,4
8	544149	4070552	2,40	7,84	0,91	317,9	-16,0
9	544790	4070657	2,41	7,84	0,91	317,4	-13,8
10	544829	4070421	2,36	7,84	0,90	318,3	-11,1
11	544338	4070263	2,37	7,84	0,90	320,4	-11,4
12	543608	4070100	2,25	7,84	0,85	325,2	-12,1
13	543047	4070038	2,32	7,84	0,88	324,4	-11,9
14	543337	4069973	2,33	7,84	0,88	327,7	-9,9
15	544153	4070073	2,24	7,84	0,85	322,0	-9,5
16	544736	4070208	2,36	7,84	0,89	321,2	-9,0
17	545200	4071530	2,49	7,84	0,94	316,1	-22,9
18	544667	4071128	2,48	7,84	0,94	316,0	-22,3
19	544160	4070800	2,46	7,84	0,93	316,5	-22,1
20	543700	4070494	2,38	7,84	0,90	318,3	-21,5
21	542916	4070471	2,40	7,84	0,91	319,5	-22,4
22	542641	4070386	2,39	7,84	0,91	320,4	-20,8

Résultats de la réfraction du secteur N 315°, Tp= 10s et H_s= 4,53m

Caractéristiques de la houle au large Dir: °N 315 Tp=10s H= 4,53m							
N ° point	X(utm)	Y(utm)	Hs	Tp	Kr	Angle d'arrivé	Prof.(m)
1	542997	4070406	3,92	10,28	0,86	325,02	-20,0
2	543496	4070359	3,81	10,28	0,84	325,32	-19,5
3	544056	4070665	4,02	10,28	0,89	318,90	-19,8
4	544609	4070846	4,12	10,28	0,91	318,06	-18,5
5	545150	4071206	4,20	10,28	0,93	317,85	-18,7
6	543279	4070228	3,89	10,28	0,86	328,49	-15,7
7	543766	4070243	3,69	10,28	0,82	324,79	-15,4
8	544149	4070552	4,02	10,28	0,89	319,94	-16,0
9	544790	4070657	4,13	10,28	0,91	319,04	-13,8
10	544829	4070421	4,00	10,28	0,88	320,10	-11,1
11	544338	4070263	4,01	10,28	0,88	322,79	-11,4
12	543608	4070100	3,69	10,28	0,81	329,64	-12,1
13	543047	4070038	3,94	10,28	0,87	329,33	-11,9
14	543337	4069973	3,91	10,28	0,86	333,13	-9,9
15	544153	4070073	3,65	10,28	0,81	324,00	-9,5
16	544736	4070208	3,84	10,28	0,85	323,34	-9,0
17	545200	4071530	4,20	10,28	0,93	317,62	-22,9
18	544667	4071128	4,16	10,28	0,92	317,31	-22,3
19	544160	4070800	4,08	10,28	0,90	318,18	-22,1
20	543700	4070494	3,86	10,28	0,85	321,16	-21,5
21	542916	4070471	3,94	10,28	0,87	323,77	-22,4
22	542641	4070386	3,94	10,28	0,87	325,13	-20,8

Résultats de la réfraction du secteur N 360°, $T_p= 6s$ et $H_s= 1,00m$.

Caractéristiques de la houle au large Dir: °N 360 $T_p=6s$ $H= 1,00m$							
N ° point	X(utm)	Y(utm)	Hs	T_p	Kr	Angle d'arrivé	Prof.(m)
1	542997	4070406	0,97	6	0,97	360	-20,0
2	543496	4070359	0,97	6	0,97	360	-19,5
3	544056	4070665	0,97	6	0,97	359	-19,8
4	544609	4070846	0,96	6	0,96	359	-18,5
5	545150	4071206	0,96	6	0,96	358	-18,7
6	543279	4070228	0,96	6	0,96	360	-15,7
7	543766	4070243	0,95	6	0,95	359	-15,4
8	544149	4070552	0,96	6	0,96	359	-16,0
9	544790	4070657	0,92	6	0,92	356	-13,8
10	544829	4070421	0,89	6	0,89	354	-11,1
11	544338	4070263	0,93	6	0,93	357	-11,4
12	543608	4070100	0,93	6	0,93	359	-12,1
13	543047	4070038	0,94	6	0,94	359	-11,9
14	543337	4069973	0,93	6	0,93	359	-9,9
15	544153	4070073	0,92	6	0,92	357	-9,5
16	544736	4070208	0,87	6	0,87	354	-9,0
17	545200	4071530	0,98	6	0,98	359	-22,9
18	544667	4071128	0,98	6	0,98	359	-22,3
19	544160	4070800	0,98	6	0,98	359	-22,1
20	543700	4070494	0,97	6	0,97	359	-21,5
21	542916	4070471	0,98	6	0,98	360	-22,4
22	542641	4070386	0,98	6	0,98	360	-20,8

Résultats de la réfraction du secteur N 360°, Tp= 8s et H_s= 2,67m.

Caractéristiques de la houle au large Dir: °N 360 Tp=8s H= 2,67m							
N ° point	X(utm)	Y(utm)	Hs	Tp	Kr	Angle d'arrivé	Prof.(m)
1	542997	4070406	2,50	6,5	0,94	359,7	-20,0
2	543496	4070359	2,43	6,5	0,91	358,5	-19,5
3	544056	4070665	2,46	6,5	0,92	356,7	-19,8
4	544609	4070846	2,43	6,5	0,91	355,7	-18,5
5	545150	4071206	2,43	6,5	0,91	355,5	-18,7
6	543279	4070228	2,44	6,5	0,91	359,3	-15,7
7	543766	4070243	2,39	6,5	0,89	356,3	-15,4
8	544149	4070552	2,44	6,5	0,91	355,9	-16,0
9	544790	4070657	2,35	6,5	0,88	352,3	-13,8
10	544829	4070421	2,28	6,5	0,85	349,5	-11,1
11	544338	4070263	2,43	6,6	0,91	354,0	-11,4
12	543608	4070100	2,35	6,5	0,88	357,3	-12,1
13	543047	4070038	2,48	6,6	0,93	358,5	-11,9
14	543337	4069973	2,43	6,6	0,91	358,3	-9,9
15	544153	4070073	2,42	6,6	0,91	353,5	-9,5
16	544736	4070208	2,27	6,5	0,85	349,9	-9,0
17	545200	4071530	2,49	6,5	0,93	357,4	-22,9
18	544667	4071128	2,48	6,5	0,93	357,1	-22,3
19	544160	4070800	2,48	6,5	0,93	357,2	-22,1
20	543700	4070494	2,46	6,5	0,92	357,4	-21,5
21	542916	4070471	2,51	6,5	0,94	359,7	-22,4
22	542641	4070386	2,51	6,5	0,94	359,6	-20,8

Résultats de la réfraction du secteur N 360°, $T_p = 10s$ et $H_s = 4,92m$.

Caractéristiques de la houle au large Dir: °N 360 $T_p=10s$ $H= 4,92m$							
N ° point	X(utm)	Y(utm)	Hs	T_p	Kr	Angle d'arrivé	Prof.(m)
1	542997	4070406	4,50	10,28	0,91	359,2	-20,0
2	543496	4070359	4,31	10,28	0,88	357,1	-19,5
3	544056	4070665	4,43	10,28	0,90	353,5	-19,8
4	544609	4070846	4,41	10,28	0,90	352,3	-18,5
5	545150	4071206	4,40	10,28	0,89	352,2	-18,7
6	543279	4070228	4,41	10,28	0,90	358,6	-15,7
7	543766	4070243	4,27	10,28	0,87	353,9	-15,4
8	544149	4070552	4,45	10,28	0,90	352,5	-16,0
9	544790	4070657	4,34	10,28	0,88	348,6	-13,8
10	544829	4070421	4,15	10,28	0,84	345,9	-11,1
11	544338	4070263	4,44	10,28	0,90	350,7	-11,4
12	543608	4070100	4,14	10,28	0,84	355,7	-12,1
13	543047	4070038	4,49	10,28	0,91	357,7	-11,9
14	543337	4069973	4,26	10,28	0,87	357,6	-9,9
15	544153	4070073	4,17	10,28	0,85	349,9	-9,5
16	544736	4070208	3,98	10,28	0,81	346,9	-9,0
17	545200	4071530	4,45	10,28	0,90	354,7	-22,9
18	544667	4071128	4,45	10,28	0,90	354,1	-22,3
19	544160	4070800	4,45	10,28	0,90	354,1	-22,1
20	543700	4070494	4,35	10,28	0,88	355,0	-21,5
21	542916	4070471	4,51	10,28	0,92	359,3	-22,4
22	542641	4070386	4,53	10,28	0,92	359,3	-20,8

