

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

المدرسة الوطنية العليا لعلوم البحر و تهيئة الساحل

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



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

OPTION : AMENAGEMENT DU LITTORAL

***La protection du littoral urbain d'Azeffoun  
par des atténuateurs en géosynthétique***

Préparé par :

**DELMI Nesrine**

**KLIOUI Hakim**

Soutenu le 02/07 /12 devant le jury suivant :

Mme Bachari-Houma. F

Mr Belkessa. R

Mr Ammari. S

Mr Hemdane.Y

Mr Bachouche. S

Maître de conférences A (ENSSMAL) Présidente

Maître de conférences A (ENSSMAL) Promoteur

Ingénieur chef projet (LEM) Co-promoteur

Maître de conférences A (ENSSMAL) Examineur

Chercheur permanent (CNRDPA) Examineur

**Session : Juillet 2012**

## **Remerciements**

*Nous adressons nos très vifs remerciements et exprimons toute notre reconnaissance à notre promoteur le Docteur Rabeh BALKESSA, pour sa confiance, son soutien amical, et ses encouragements, sa perspicacité en s'intéressant vivement à notre recherche. Il nous a dirigé avec compétence et bienveillance en manifestant son souci de développer nos propositions de recherche. Il nous a permis de consolider notre savoir et d'effectuer notre travail avec une qualité inestimable dans les meilleures conditions possibles d'accompagnement et d'aide à la recherche.*

*Nous remercions aussi Mme BACHARI Fouzia d'avoir accepté de présider le jury, d'avoir déployé autant de dynamisme pour le suivi de notre travail, d'être là à chaque requête, chaque questionnement, à chaque angoisse ressenti et surtout d'avoir le voile de l'ignorance à chaque rendez vous tout au long de notre cursus universitaire.*

*Nous adressons nos sincères compliments à Mr AMARI Soufiane notre co promoteur pour sa disponibilité , son aide précieuse et exigeante, son attention délicate son respect sa tolérance vis-à-vis de nous.*

*Nous témoignons une reconnaissance à l'endroit Mr HMADANE Yacine et Mr BACHOUCHE Samir pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre travail de recherche, nous ne cessons jamais de les remercions d'avoir accepté de participer au jury de ce mémoire en qualité d'examineur.*

*Nous remercions le personnel de la Subdivision des Travaux Publics d'Azeffoun en l'occurrence Monsieur le subdivisionnaire YOUSAIDANE Nacer ainsi que l'ensemble de ses collaborateurs (Chérif, Rabah, ...) qui n'ont ménagé aucun effort pour nous apporter leur assistance permanente en nous expliquant jusqu'au moindre détail la réalité pratique du déroulement du projet et pour nous avoir permis l'obtention de toutes les informations nécessaires pour notre recherche.*

## ***Dédicaces***

*Aux deux grandes femmes qui m'ont toujours encouragé à étudier et qui prônaient l'émancipation de la femme, mes deux grands mère (Hadjouja et Titisse) que Dieu ait leurs âmes.*

*A mon grand père lah irahmou Djedou El Amri qui me manque tant après toutes ses années.*

*A mes parents tant chérie ABDERRAHMEN et DEHBIA qui m'ont offert tous les moyens possible pour réussir dans mes études, le soutien moral ainsi que l'amour sans faille. Vous vous êtes tellement consacrés pour moi sans compter. En reconnaissance de tous vos sacrifices je ne vous remercierai jamais assez sauf avec ma persévérance dans la volonté de toujours de m'élever un peu plus loin et de convoquer la fierté à chaque fois que les conditions sont propices.*

*A mon adorable époux ADEL qui a eu plus de patience que n'importe qui envers moi durant cette année où il a du me partager, avec sa gentillesse, sa générosité et son soutien indéterminé.*

*A mes frères adorés Walid et Karim mes deux premiers amours.*

*A ma belle famille HADROU.*

*A mes cousins et cousines, mes tantes et oncles de Constantine et de Yakouren.*

*Toute mon affection et la reconnaissance à mes amis pour le soutien en me conseillant dans les moments difficiles de contribution à ma formation et en m'apportant toute l'attention requise.*

*A mon Directeur Général Mr BEGHOURA Abdelaâli ainsi que Monsieur GRIMES Samir Directeur National de Projet pour leurs conseils si judicieux ainsi qu'à tous mes collègues du Commissariat National du Littoral C.N.L.*

*A mes camarades de l'ENSSMAL leurs souhaitant une bonne continuation dans leur vie.*

*Je dédie ce travail.*

***Nesrine***

## Sommaire

### Chapitre I : Cadre général d'évolution et diagnostic

Introduction.....	1
<b>I-1 Situation géographique :.....</b>	<b>2</b>
I-1-1 Baie d'Azeffoun : .....	2
I-1-2 Site d'étude :.....	2
<b>I-2 Situation géologique et géomorphologique :.....</b>	<b>3</b>
<b>I-3 Cadre climatologique et hydrologique: .....</b>	<b>5</b>
I-3-1 Cadre climatique:.....	5
I-3-2 Précipitations : .....	5
I-3-3 Températures : .....	5
I-3-4 Synthèse climatologique :.....	6
I-3-5 Cadre hydrologique : .....	6
I-3-5-1 Apports fluviatiles : .....	6
I-3-5-2 Caractéristiques de l'Oued Tifrest et l'Oued M'Tlata:.....	7
<b>I-4 Facteurs Hydrodynamiques :.....</b>	<b>8</b>
I-4-1 Le vent : .....	8
I-4-2 Régimes des houles : .....	9
I-4-3 Notions de courantologie :.....	10
<b>I-5 Aspect et évolution du trait de cote : .....</b>	<b>10</b>
I-5-1 Introduction : .....	10
I-5-2 Interprétation : .....	11
Conclusion :.....	12
<b>I-6 Les causes de l'érosion marine : .....</b>	<b>12</b>
I-6-1 Facteurs Naturels : .....	13
I-6-1-1 Courants marins :.....	13
I-6-1-2 Houle : .....	13
I-6-1-3 Vent : .....	13
I-6-1-4 Variation de la température : .....	13
I-6-2 Facteurs d'origine anthropique : .....	13
I-6-2-1 Déstabilisation des dunes :.....	14
I-6-2-2 Les grands travaux portuaires et ouvrages de protection : .....	14
I-6-2-3 Les aménagements de front de mer : .....	14

I-6-2-4 La mauvaise conception des ouvrages de défense :.....	15
1-6-2-5 La dégradation des herbiers de phanérogames marines (Posidonies et Cymodocées) : .....	16
I-6-3 Facteurs intervenants sur la zone d'étude :.....	16
<b>Chapitre II : Matériels et méthodes</b>	
<b>II-1 Etude bathymétrique :.....</b>	<b>19</b>
II-1-1 Mode du levé bathymétrique :.....	19
II-1-2 Mode du levé au sonar latéral : .....	19
<b>II-2 Etude sédimentaire :.....</b>	<b>20</b>
II-2-1 Etude granulométrique : .....	20
II-2-1-1 Introduction : .....	20
II-2-1-2 Principe de la méthode :.....	20
II-2-1-3 Analyse granulométrique: .....	21
<b>II-3 Transport sédimentaire : GSTA.....</b>	<b>22</b>
II-3-1 Introduction .....	22
II-3-2 Principe du Modèle de « Gao et Collins »: .....	22
II-3-3 Procédure analytique: Gao et Collins (1991) :.....	24
II-3-4 Limites de calcul des tendances de transport sédimentaire :.....	25
II-3-5 Application du modèle dans la zone d'Azeffoun :.....	25
II-3-5-1 Calcul des paramètres granulométriques :.....	25
II-3-5-2 L'exploitation des données de sortie :.....	25
<b>II-4 Etude de la réfraction :.....</b>	<b>25</b>
II-4-1 Principe de calcul de la réfraction de la houle : .....	25
II-4-2 Données de base : .....	26
II-4-2-1 Données bathymétriques : .....	26
II-4-2-2 Données de la houle au large :.....	26
II-4-2-3 Déroulement des étapes de la réalisation de la réfraction : .....	27
<b>Chapitre III : Expression des résultats et discussion</b>	
<b>III-1 Résultats et interprétation de la bathymétrie :.....</b>	<b>28</b>
III-1-1 Résultats de la bathymétrie : .....	28
III-1-2 Interprétation de la bathymétrie .....	29
III-1-2-1 La morphologie sous marine.....	29
III-1-2-2 Profils bathymétriques : Analyse cross-shore.....	29

Conclusion :	31
<b>III-2 Résultats et interprétation de l'analyse granulométrique :</b>	<b>31</b>
III-2-1 Fraction fine :	31
III-2-1-1 Résultats de la fraction fine :	<b>Erreur ! Signet non défini.</b> 31
III-2-1-2 Interprétation des résultats de l'analyse de la fraction péltique :	31
III-2-2 Fraction grossière :	32
III-2-2-1 Les courbes granulométriques :	32
III-2-2-2 Résultat des paramètres granulométriques :	35
<b>III-3 Résultats et interprétation de la modélisation de transport tendanciel par le GSTA :</b>	<b>38</b>
III-3-1 Résultat de la modélisation de transport tendanciel par le GSTA :	38
III-3-2 Interprétation de la modélisation de transport tendanciel par le GSTA :	38
<b>III-4 Résultats et interprétation de l'étude de la réfraction de la houle :</b>	<b>39</b>
III-4-1 Résultats de l'étude de la réfraction de la houle :	39
III-4-2 Interprétation des résultats de l'étude de la réfraction :	40
<b>III-5 Etude courantologique :</b>	<b>41</b>
<b>Chapitre IV : Travaux de protection et d'aménagement</b>	
<b>IV-1 Situation et problème :</b>	<b>43</b>
<b>IV-2 Objectifs de l'aménagement :</b>	<b>44</b>
<b>IV-3 La solution proposée (brises lames immergés en Géotube) :</b>	<b>44</b>
IV-3-1 Généralités :	44
A. Introduction :	44
B. Définition :	44
IV-3-2 Les types de géotextiles :	45
IV-3-4 Géotextiles utilisés et leurs caractéristiques :	47
A. Géotextile pour les boudins (Géotubes) GT1000M:	47
B. Filtre S61 pour doublage :	47
C. Géotextile pour le tapis anti-affouillement Geolon PP80L :	48
IV-3-5 L'emplacement et dimensionnement de l'ouvrage de protection :	49
A. Profondeur d'implantation «d»:	50
B. La distance «lc»:	50
C. L'espacement «E» :	51
D. La longueur «l» :	51

E. La largeur berme B : .....	52
F. La stabilité des géotubes : .....	53
G. Le nombre de géotube : .....	54
IV-3-6 La technique de mise en oeuvre : .....	57
A. Introduction : .....	57
B. Les matériaux de confinement : .....	58
C. La pose et le remplissage des géotubes : .....	59
D. Mise en place et positionnement des brise-lames : .....	59
<b>Conclusion .....</b>	<b>61</b>

## **Bibliographie**

## **Annexes**

### Liste des symboles

**B** : Largeur de la berme  
**C<sub>t</sub>** : Coefficient de transmission  
**D 50**: Diamètre moyen des sédiments  
**D**: Epaisseur du géotube  
**d**: Profondeur d'implantation  
**DCR** : Distance critique  
**E** : Espacement entre les brises lames  
**g** : Accélération de la gravité  
**G.P.S** : Global positioning system.  
**G.S.T.A** : Grain Size Trend Analysis.  
**Hi** : Hauteur incidente  
**H<sub>s</sub>**: Hauteur significative (houle de projet)  
**Kr** : Coefficient de réfraction  
**l** : Longueur de l'ouvrage  
**lc** : Distance entre l'ouvrage et le trait de côte  
**Lo** : Longueur d'onde de la houle au large  
**Mz** : Taille moyenne des sédiments  
**P** : Pente de la plage  
**R** : Vecteur résultant  
**r(x, y)** : Vecteur tendance  
**R.T.K**: Real Time Kinematic  
**R<sub>c</sub>** : Côte d'arase  
**Sk** : Indice de symétrie de la distribution  
**So** : Indice de tri  
**S<sub>o</sub>** : Cambrure  
**T** : Période  
**T**: Période de la houle  
**γs**: Masse volumique du sable  
**γw** : Masse volumique de l'eau de mer  
**ζ<sub>p</sub>**: Paramètre de déferlement.

### Liste des abréviations

**ANRH**: Agence Nationale des Ressources Hydrologiques  
**C.E.R.C**: Coastal Engineering Research Center  
**L.C.H.F** : Laboratoire Central Hydraulique de France  
**LEM**: Laboratoire d'Etude Maritime  
**MATE** : Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement  
**O.N.M** : Office Nationale de Météorologie  
**STMA** : Subdivision des Travaux Maritimes d'Azeffoun  
**USSMO**: US Naval Weather Service Command.  
**SWAN** :Simulating waves Nearshore

### Liste des figures :

<b>Figure n°1 :</b>	Situation de la zone d'étude (Azeffoun)	1
<b>Figure n°2:</b>	La zone d'intervention « le littoral urbain d'Azeffoun »	2
<b>Figure n°3:</b>	Carte géologique de la région d'Azeffoun, tirée de la carte géologique Azeffoun et Azazga	3
<b>Figure n°4 :</b>	Le diagramme Ombrothérmiq ue de Bagnouls et Gaus sen de la région de Tizi-Ouzou (ONM, Tizi-Ouzou, 1994-2004)	5
<b>Figure n°5 :</b>	Le bassin versant d'Azeffoun	6
<b>Figure n°6 :</b>	Rose annuelles des vents au large des côtes algériennes (données relatives) (USSMO, 1974).	7
<b>Figure n°7 :</b>	Evolution du trait de côte du littoral d'Azeffoun 1980- 2011	10
<b>Figure n°8:</b>	Plage d'Azeffoun durant les années 2005, 2007, 2010, 2011	11
<b>Figure n°9:</b>	Les terres pleines et le port d'Azeffoun	13
<b>Figure n°10 :</b>	Front de mer de la ville D'Azeffoun 2010	14
<b>Figure n°11:</b>	Influence des terres pleines de port d'Azeffoun sur l'évolution de la plage centre	14
<b>Figure n°12:</b>	Aménagements sur littoral urbain d'Azeffoun	15
<b>Figure n°13:</b>	La plage à gravelets sous forme de croissant de la plage centre d'Azeffoun	16
<b>Figure n°14:</b>	Evolution du littoral de la plage centre d'Azeffoun entre 1980 et 2011	17
<b>Figure n°15:</b>	Organigramme du déroulement des étapes de la réalisation de la réfraction	27
<b>Figure n°16:</b>	Bathymétrie de la plage centre d'Azeffoun	28
<b>Figure n°17:</b>	Bathymétrie en 3D de la zone d'étude.	28
<b>Figure n°18 :</b>	Profils sur la carte bathymétrique de la zone d'étude (Azeffoun)	29
<b>Figure n°19:</b>	Profils de plage de centre d'Azeffoun	30
<b>Figure n°20:</b>	Répartition spatiale des teneurs en pélites	32
<b>Figure n°21:</b>	Courbes cumulatives des échantillons 0 m et -3m de profondeur	32
<b>Figure n°22:</b>	Courbes cumulatives des échantillons -5 m et -7m de profondeur	33
<b>Figure n°23:</b>	Courbes cumulatives des échantillons -10 m de profondeur	33
<b>Figure n°24:</b>	Répartition de D50 dans la région de littoral urbain d'Azeffoun	35

<b>Figure n°25:</b>	Répartition des Q90 dans la région de littoral urbain d’Azeffoun	36
<b>Figure n°26:</b>	Distribution spatiale de l’indice de tri $S_o$	36
<b>Figure n°27:</b>	Distribution spatiale de l’indice d’asymétrie $S_k$	37
<b>Figure n°28:</b>	Vecteurs tendanciels obtenus l’aide de model GSTA	37
<b>Figure n°29:</b>	Réfraction de la houle au large d’Azeffoun de secteur $340^\circ N$	38
<b>Figure n°30 :</b>	Courant de retour obtenu à l’aide de logiciel MIKE 21	40
<b>Figure n°31 :</b>	Enjeux à protéger : la plage et la RN 24	42
<b>Figure n°32 :</b>	Géotextiles de types non tissé , S61 et F80	45
<b>Figure n°33 :</b>	Géotextile de type tissé	46
<b>Figure n°34 :</b>	Géotextile système GT1000M	47
<b>Figure n°35 :</b>	Géotextile pour le tapis anti affouillement de type PP80L	49
<b>Figure n°36 :</b>	Modélisation de courant retour avec les brises lames immergées	50
<b>Figure n°37 :</b>	Répartition des boudins par tronçons	51
<b>Figure n°38 :</b>	Essais en modèle réduit : canal à houle	54
<b>Figure n°39 :</b>	Plan du tronçon du boudin	56
<b>Figure n°40 :</b>	Coupe A-A de brise lame en géotube	56
<b>Figure n°41 :</b>	Technique de mise en œuvre	57
<b>Figure n°42 :</b>	Stock de sable	58
<b>Figure n°43 :</b>	Balises de positionnement	59
<b>Figure n°44 :</b>	Phases d’exécution des travaux	60

## Liste des tableaux :

<b>Tableau n°1 :</b>	Débits et apports moyens annuels de l'Oued M'Tlata (ANRH, 1997-2000)	7
<b>Tableau n°2:</b>	Fréquences mensuelles des houles au large par direction (données relatives) (USSMO, 1963-1974)	9
<b>Tableau n°3:</b>	Diamètres des grains et appellations selon l'échelle de <a href="#">Wentworth (1922)</a>	21
<b>Tableau n°4 :</b>	Relations entre les paramètres granulométriques (en unité de phi) de deux stations 1 et 2, pour un transport sédimentaire de 1 vers 2, de type FB- et CB+.	23
<b>Tableau n°5 :</b>	Conditions de houles retenues dans le cadre de cette étude (LEM, 2009)	26
<b>Tableau n°6 :</b>	Résultats de l'étude de la réfraction (2010)	46
<b>Tableau n°7 :</b>	Caractéristiques minimales recommandées pour le géotextile des géotubes	47
<b>Tableau n°8 :</b>	Caractéristiques minimales recommandées pour le géotextile de tapis anti affouillement	48
<b>Tableau n°9 :</b>	Dimensions d'un boudin à un remplissage de 70 %	54
<b>Tableau n°10:</b>	Nombre de boudin à mettre en place	55
<b>Tableau n°11:</b>	Nombre d'unités de system GT1000M avec les nouvelles dimensions	58
<b>Tableau n°12:</b>	Résultats des essais granulométriques	58

# **Introduction Générale**

## Introduction générale

Depuis l'antiquité, le littoral en Algérie a été particulièrement convoité. L'ouverture sur la Méditerranée qui est devenue un lieu d'échange commercial et culturel. Son climat et sa position géographique ont favorisé l'implantation des établissements et des activités humaines.

Cette tendance a été renforcée pendant l'occupation française par le caractère extraverti de l'économie coloniale. Après l'indépendance, cette pratique s'est perpétuée à travers d'importants investissements industriels, rendant cette partie du territoire encore plus attractive.

Le littoral algérien a une façade maritime d'une longueur de 1600 km linéaire alterne rivages rocheux, plages sablonneuses et zones humides. Toutefois, il est caractérisé par une concentration de la population et des activités industrielle et touristiques et il apparait le réceptacle de toutes pressions d'origines anthropiques, entraînent par la suite des modifications considérables dans le fonctionnement des transferts sédimentaires entre les plages et leurs compartiments (**dune, avant plage, haut plage**) ce qui entraîne l'érosion et fait appelle à la sauvegarde et la protection de ces dernières contre ce phénomène.

Dans le cadre de notre mémoire de fin d'étude, le choix est porté sur le littoral **d'Azeffoun** (wilaya de Tizi-Ouzou) comme zone d'étude, plus précisément le rivage urbain **d'Azeffoun**. Ce choix n'a pas été fortuit car suite aux interventions humaines intensives, qui présentent des risques pour les différents équipements implantés sur le rivage côtier (routes, hôtels ...), en 2005 des inondations ont provoqué la perturbation du trafic routier entre les deux wilayas côtières Tizi-Ouzou et Bejaïa (RN 24). Pour faire face aux conséquences néfastes de l'érosion, des travaux protection seront réalisés.

L'objectif de notre étude est d'apporter des éléments de réponses au problème d'érosion que subit le littoral dans ce secteur, et de donner des explications sur les nouveaux procédés à mettre en place pour remédier à ce problème.

Dans notre cas les géotextiles ont été proposés comme solution douce regroupant de nombreux avantages, économiques, écologiques et esthétiques.

Pour répondre à cette problématique, une synthèse bibliographique est nécessaire avant tout. Ce travail englobe quatre chapitres qui les sont suivant :

- Chapitre I : Cadre générale d'évolution et diagnostic.
- Chapitre II : Matériel et méthodes.
- Chapitre III : Expression des résultats et discussion.
- Chapitre IV : Les travaux de protection et d'aménagement.

# **Chapitre I**

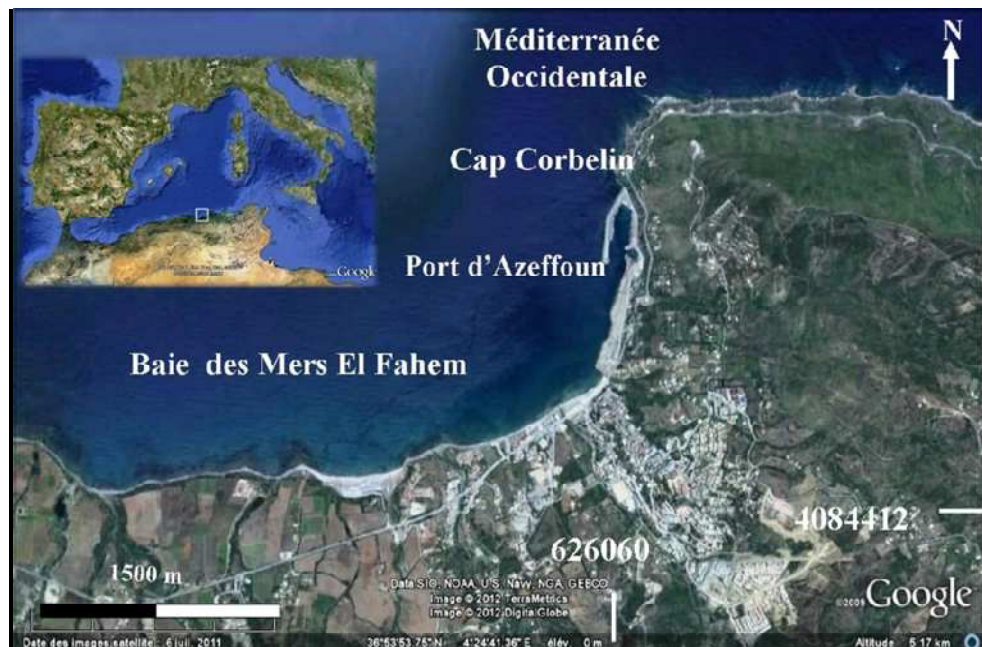
## **Cadre général d'évolution et diagnostic**

## I-1 Situation géographique :

### I-1-1 Baie d'Azeffoun :

La baie de Mers El Fahem se situe à une soixantaine de km à l'Est de la wilaya de Tizi-Ouzou dans la commune d'Azeffoun qui est la plus grande commune littorale de la wilaya, la commune représente: 27,47 km en linéaire côtier, 47,37 km<sup>2</sup> en surface du domaine littoral soit 80 % du linéaire de la bande côtière de la Daïra d'Azeffoun, la baie est relativement ouverte, limitée à l'Est par le Cap Corbelin (Sidi Corchi, nomination actuel) et à l'Ouest par la Pointe Ait Raouna offrant ainsi une large bordure littorale, dont le rivage est orienté selon un axe Nord-Ouest, et ses coordonnées Lambert sont :

- Latitude (**Nord**) : 36°54'4" et 36°53'28"
- Longitude (**Est**) : 4°24'59" et 4°23'53"



**Fig.01:** Situation de la zone d'étude (Azeffoun)

### I-1-2 Site d'étude :

Le site choisi est le rivage urbain d'Azeffoun, cela en vue de le protéger contre l'érosion, (voir fig.02), il représente un linéaire de 500ml et d'une largeur d'environ 2 à 3m. « La plage centre d'Azeffoun » est limitée :

- Au Nord par la mer Méditerranée.
- Au Sud par la RN°24.
- A l'Est par les terres pleines du port d'Azeffoun (cordon d'enrochement naturel).
- A l'Ouest par Oued Tifrest



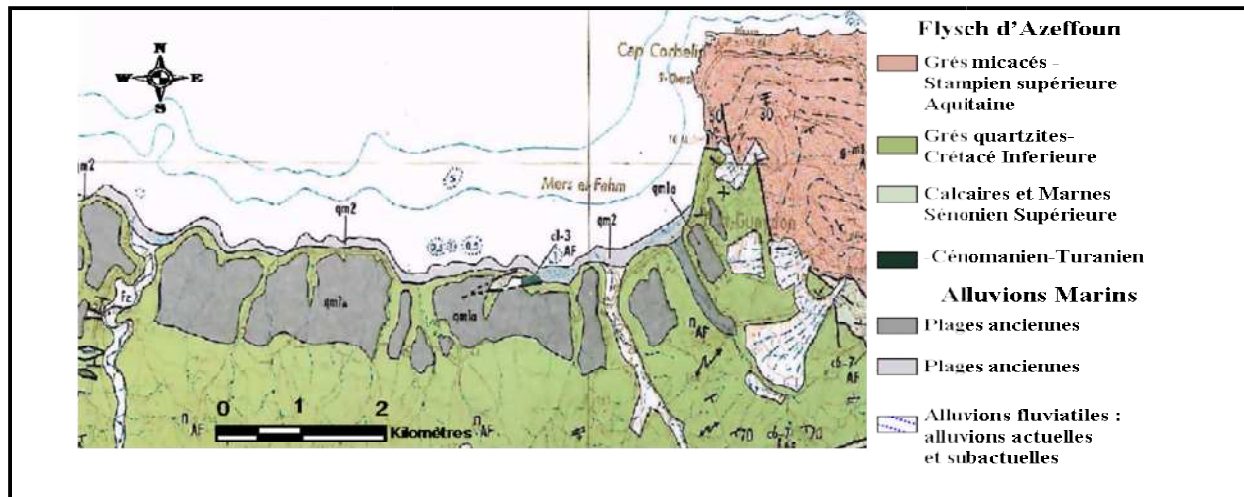
**Fig.02:** La zone d'intervention «le littoral urbain d'Azeffoun» Carte de Google earth

### I-2 Situation géologique et géomorphologique :

La connaissance de la géologie et la géomorphologie de notre zone d'étude permet de définir sa sensibilité face aux phénomènes d'érosions et aux altérations des structures superficielles qui contrôlent d'une manière ou d'une autre les quantités sédimentaires rejetées en mer.

En effet, l'aspect géologique et géomorphologique est désormais nécessaire pour comprendre et apporter des éléments de réponse sur les différents phénomènes d'érosion susceptibles d'être observés sur le site.

La structure géologique de la région d'étude est composée essentiellement de formation sédimentologiques Flyschoides et d'Alluvions marins et fluviales (fig.03).



**Fig.03:** Carte géologique de la région d'Azeffoun; tirée de la carte géologique Azeffoun et Azazga ([Office National de Recherche Géologique et Minière, 1997](#))

*Les faciès sédimentaires* affleurent sur la majeure partie de la zone d'étude (région du port Gueydon) sont représentés par des :

- a- *Flyschoides de grès micacés*: Ces formations apparaissent dans la partie Est de la région de port de Gueydon formant ainsi les principaux sommets du Cap Corbelin qui se date de Stampien supérieure à Aquitaine.
- b- *Flyschoides de grès quartzites et pélites*: Affleurent dans le secteur Ouest et Sud de site de l'âge de Crétacé Inférieure.
- c- *Flyschoides de calcaires et de marnes* : Apparaissent en très petites surfaces dans la région datée de Sénonien Supérieure et de Cénomaniens-Turaniens.

*Les alluvions marines* sont représentées par des plages anciennes en petites surfaces sur le littoral d'Azeffoun et par des plages actuelles et des cordons dunaires tout au long de la baie de Mers El Fahem.

La géologie et la géomorphologie de la zone étudiée classe le site comme très vulnérable, sans aucune protection et face aux violentes tempêtes; la plage du centre d'Azeffoun subit des érosions et des submersions très importantes du à son exposition à l'action frontale des vagues, causant des pertes dans le profil et menaçant ainsi les équipements implantés sur le rivage mais aussi une forte atteinte à la pérennité des infrastructures tels que la route nationale N°24.

### **I-3 Cadre climatologique et hydrologique:**

#### **I-3-1 Cadre climatique:**

La caractérisation climatologique est très importante pour mieux apprécier les régimes hydrodynamiques qui agissent sur notre zone d'étude et qui sont responsables de toute transformation morpho-sédimentaire sur la frange côtière ainsi qu'en amont du bassin versant. Les données du climat local sont fournies par l'Office National de la Météo (O.N.M) de 1994 jusqu'à 2004 pour la station de Tizi-Ouzou, altitude : 188 m; latitude : 36°42 N; longitude : 04°03 E.

#### **I-3-2 Précipitations :**

Les précipitations qui tombent en Algérie sont d'origines orographiques et torrentielles. Elles varient selon l'altitude (Seltzer, 1946). La situation géographique, l'éloignement de la mer et l'existence de barrières montagneuses conditionnent dans une large mesure la pluviométrie à travers la densité et sont irrégularité. Généralement les pluies sont moyennement abondantes et peu violente combinée avec l'aire.

Les variations des quantités pluviométriques de la station de Tizi-Ouzou enregistrées durant la période considérée sont soumise à l'influence du climat méditerranéen par une forte chute de pluies durant la période humide avec un maximum au mois de Janvier 142.4mm, puis une diminution jusqu'au mois de Juillet le mois le plus sec avec 1.4 mm de pluie.

L'analyse pluviométrique pour la région de Tizi-Ouzou montre que les précipitations sont abondantes en Hiver à l'inverse de l'été qui est la saison la plus sèche de l'année, elle est caractérisée par un minimum de pluie.

L'existence de la période de sécheresse estivale l'un des facteurs essentiel permettant d'expliquer les variations des débits liquides et solides des cours d'eau existant sur le site d'étude.

#### **I-3-3 Températures :**

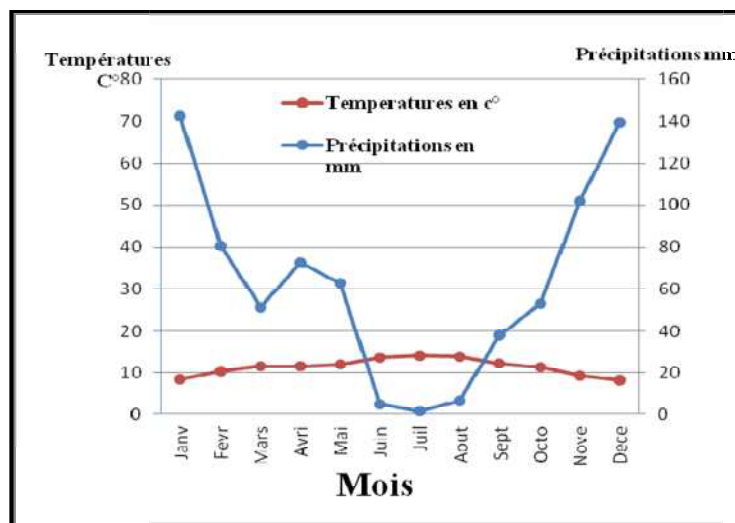
La température moyenne maximale la plus élevée pour la station de Tizi-Ouzou (1994-2004) est de 14.2 C° au mois de Juillet (mois le plus chaud). La température moyenne minimale la plus faible est de 8.5 C° au mois de janvier (mois le plus froid).

Nous constatons ainsi qu'il règne un climat doux en hiver pas moins de 0°C à l'inverse des étés qui sont souvent très chaud avec un max 39°.

### I-3-4 Synthèse climatologique :

L'établissement d'une synthèse des facteurs climatiques à savoir la pluviométrie et la température fait appel à l'étude du diagramme **Ombrothermique de Bagnouls et Gaussen** qui a pour utilité de déterminer les saisons sèches et humides d'une région donnée. (Bagnouls et Gaussen, 1953)

Pour la détermination de climat de la région d'Azeffoun nous avons retenu les données climatiques relevées au niveau de la station Tizi-Ouzou, ainsi en se basant sur l'équation  $P=2T$ , nous avons obtenu le diagramme Ombrothermique de la région de Tizi-Ouzou. (fig..04)



**Fig. 04** : Diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gaussen de la région de Tizi-Ouzou (ONM, Tizi-Ouzou, 1994-2004)

L'analyse du diagramme (fig. 06) montre que la période sèche est d'environ 03 mois. Elle s'étend de la fin Mai au début du moi de Septembre, tandis que la période humide, s'étend de la fin Septembre au début du moi de Juin.

### I-3-5 Cadre hydrologique :

#### I-3-5-1 Apports fluviaux :

Afin de comprendre les processus affectant un linéaire côtier, il est nécessaire de quantifier les apports sédimentaires, leurs origines et les lieux de dépôts de ces stocks.

Les principaux apports alimentant la baie « Mers el Fahem » ont comme origine :

- L'Oued Tifrest à l'Est
- L'Oued M'Tlata à l'Ouest

Les deux Oueds prennent source du même bassin versant, et divergent en amont avant qu'ils se déversent en mer.

### I-3-5-2 Caractéristiques de l'Oued Tifrest et l'Oued M'Tlata:

#### a) Bassin versant :

Le bassin versant des deux oueds occupe une superficie de 44.3 km<sup>2</sup> (A.N.R.H 1978), caractérisé par un relief montagneux qui présente des dénivellations très abrupts et des terrains en pentes plus au moins légères de 1/10 à 1/20 vers la mer, il se trouve à une altitude moyenne de 800 m. Caractérisé par un couvert végétal dense. Ces oueds drainent les eaux pluviales vers la mer sur une longueur qui peut atteindre 7 km pour M'tlata et 4 km pour Tifrest.



**Fig.05** : Le bassin versant d'Azeffoun

#### b) Débits liquides et apports solides :

La série de mesures relevées provient de la station hydrométrique d'Azeffoun M'tlata (02.08.08) des services de l'A.N.R.H contrôlant 34.3km<sup>2</sup> soit 77% du bassin versant. Les valeurs des débits et des apports annuels collectés les plus significatifs entre 1990 et 2001, sont reportées dans le tab.01.

**Tab.01** : Débits et apports moyens annuels de l'Oued M'Tlata (ANRH, 1997-2000)

Année	Débit liquide (m <sup>3</sup> /s)	Apport solide (hm <sup>3</sup> )
1997 – 1998	0,942943	29,81523
1998 – 1999	0,521239	15,97074
1999 – 2000	0,313172	10,01842

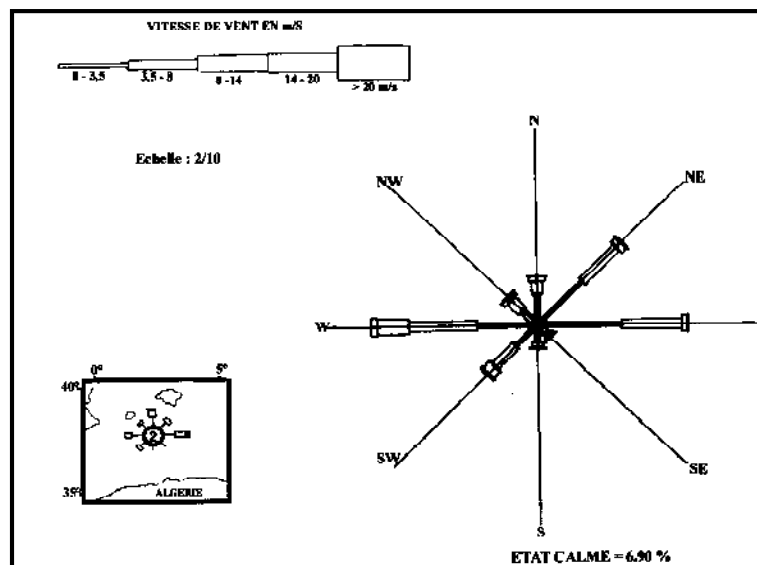
Les résultats obtenus montrent que les valeurs des débits liquides et des apports solides sont faibles. Le débit moyen annuel de l'Oued M'tleta est de  $0,592451 \text{ m}^3/\text{s}$ ; les apports solides annuels sont évalués à  $18,60146 \text{ hm}^3$ , sachant que les débits solides sont estimés à partir des débits liquides et des teneurs en suspension. Selon certains auteurs le transport par charriage est estimé à environ 25% du transport par suspension (Larfi et Remini, 2006), ce qui donne un transport solide total d'environ  $23.25 \text{ hm}^3/\text{an}$ , ainsi, compte tenue de la distance qui sépare le lieu de mesure et l'embouchure, on estime que les apports qui arrivent en mer sont sous estimés.

#### I-4 Facteurs Hydrodynamiques :

##### I-4-1 Le vent :

C'est le générateur principal de vagues et de courants superficiels agissant sur les transferts sédimentaires de façon directe sur la partie aérienne et par différents agents hydrodynamiques sur la partie immergée (Moulin, 1978).

Les données recueillies par l'U.S.S.M.O (1974) au large des côtes algériennes sont représentées sous forme d'une rose de vent (fig.06)



**Fig.06** : Rose annuelle des vents au large des côtes algériennes (USSMO, 1974).

La rose annuelle fait apparaître trois directions essentielles des vents dominants, Ouest, Est et Nord-Est avec des fréquences d'apparition respectives de 21.9% , 18.9%, 16.18%. Ils ont une intensité comprise entre 2,5 et 8 m/s. En revanche, lors des tempêtes, les vents d'Ouest peuvent atteindre une vitesse de 20 m/s.

### I-4-2 Régimes des houles :

Les côtes évoluent par les processus d'érosion et de sédimentation engendrés par les mouvements de la mer dû aux perturbations atmosphériques (dépression) qui se traduisent par la formation des houles et des vagues; ces dernières sont plus ou moins forts et rapides et peuvent être même violente c'est ce qui est à l'origine d'une part, de la remise en suspension des sédiments et leurs déplacement, d'autre part, lorsqu'elles sont obliques au rivage, elles engendrent un courant de dérive qui transporte des matériaux.

L'analyse de la houle au large, des côtes algériennes située en longitude Est entre 2° et 5° et en latitude Nord entre 36° 50' et 38° est basée sur des observations (tab.02) faites par l'USSMO, s'étalant sur une période de 8 ans de 1963 à 1970 regroupant 45000 observations.

**Tab.02 :** Fréquences mensuelles des houles au large par direction (USSMO, 1963-1974)

<b>Direction Période</b>	<b>Nord</b>	<b>Nord- Est</b>	<b>Est</b>	<b>Sud-Est</b>	<b>Sud</b>	<b>Sud- Ouest</b>	<b>Ouest</b>	<b>Nord- Ouest</b>
<b>Janvier</b>	8.10	12.90	18.20	5.00	6.50	13.20	28.80	7.30
<b>Février</b>	8.80	13.30	12.60	4.00	6.00	16.90	35.60	5.80
<b>Mars</b>	11.30	12.60	15.80	3.60	4.50	13.30	30.50	9.20
<b>Avril</b>	11.70	15.30	16.00	2.00	4.40	13.70	26.60	10.20
<b>Mai</b>	8.40	26.30	31.90	3.00	3.30	17.20	13.90	6.20
<b>Juin</b>	9.20	29.10	29.80	1.80	1.40	18.20	16.30	2.00
<b>Juillet</b>	5.90	32.50	35.10	1.40	0.90	5.90	16.20	2.00
<b>Août</b>	8.90	27.70	37.40	1.90	1.10	5.00	13.40	4.90
<b>Septembre</b>	6.70	26.40	40.50	2.20	2.30	4.50	14.80	2.50
<b>Octobre</b>	7.80	14.10	20.30	3.20	4.30	14.80	28.80	6.90
<b>Novembre</b>	5.40	5.70	10.00	5.10	8.00	15.90	40.40	9.40
<b>Décembre</b>	10.20	6.20	9.30	4.60	7.40	15.00	37.10	1.00
<b>Total</b>	8.53	18.51	23.08	3.15	4.18	12.80	25.20	5.62

A travers la lecture de ces données, nous notons que les houles les plus fréquentes sont de secteur Ouest, Est et Nord-Est avec des fréquences d'apparitions respectives de 25,20% 23,08% et 18,51%. En période hivernale, les houles d'Ouest prédominent, à l'encontre de la période estivale, où se sont les houles d'Est et Nord-Est qui le sont.

### **I-4- 3 Notions de courantologie :**

Les courants jouent un rôle très important dans le transport sédimentaire et l'état dynamique des matériaux, ils participent dans l'évolution de la morphologie côtière en conduisant à des ensablements, des envasements et des érosions..

#### **A. Le courant de retour :**

Le courant de retour participe activement à l'érosion côtière, c'est le courant compensateur sur le fond qui s'effectue en direction du large résultant du retour des masses d'eau déployées par la houle sur la côte. Leur effet est remarquable surtout par mauvais temps généralement en hiver.

#### **B. Les courants de la dérive littorale :**

Lorsque la houle arrive à la côte avec une incidence oblique, elle donne naissance à un courant de dérive littorale, la vitesse de celui-ci est maximale pour un angle d'incidence de 50° à 60°. Ce courant parallèle au rivage, qui se manifeste dans la zone de déferlement des vagues, joue un rôle essentiel dans le déplacement des sédiments le long de la côte et dans l'alimentation des plages en sable et en galets.

### **I-5 Aspect et évolution du trait de cote :**

#### **I-5-1 Introduction :**

Le littoral d'Azeffoun a connu une dynamique côtière particulière sous l'influence des processus naturels et anthropiques.

Pour dresser un état des lieux de la morpho-dynamique littorale et déterminer les tendances d'évolution de la frange littorale d'Azeffoun, nous nous sommes appuyés sur la superposition des images satellitaires récentes ([Google Earth, 2004 et 2011](#)) ainsi que des photographies aériennes des missions de 1987 et de 1999.

Une méthode a été mise au point à partir du logiciel MapInfo pour la cartographie du trait de côte avec des erreurs acceptables dans la mesure où les évolutions constatées sont importantes. Le trait de côte est assimilé à la ligne de rivage de pleine mer, facilement identifiable sur les photographies aériennes, par la différence radiométrique entre les parties sèches et humides de l'estran ([Dolan et al, 1978](#) ; [Douglas et al, 2000](#)).



**Fig.07:** Evolution du trait de côte du littoral d'Azeffoun 1980- 2011

### I-5-2 Interprétation :

Le recours à la quantification de l'érosion par l'approche spatiale et temporelle s'impose comme une démarche pertinente quant à l'appréciation de l'évolution de la côte.

L'étude des photographies aériennes (1980; 1999) et des images satellitaires (2004 ; 2011) du littoral d'Azeffoun, nous a permis de mieux cerner l'évolution de toute la zone étudiée. Sur l'ensemble de la période étudiée, les valeurs d'évolution mesurées sont très significatives (fig.07)

La plage subit un recul continu du trait de côte qui se manifeste par la formation de croissants de plage et l'apparition de cordons de galets de disposition perpendiculaire à la côte, c'est un indice morphologique indiquant une mobilité des sédiments perpendiculaires au trait de côte dû aux courants d'entraînement. Ce recul est estimé de 20 à 25 m pendant 25 ans, soit un taux de démaigrissement compris entre 0.80 et 1 m/an.



**Fig.08** : Plage d'Azeffoun (2005, 2007, 2010, 2011).

### **Conclusion :**

Cette étude a pour principal objectif de faire un état des lieux et d'évaluer l'évolution du trait de côte. La superposition des photos aériennes (1980, 1999) et des images satellitaires (2004, 2011) nous a permis de faire une analyse multi datée pour mettre en évidence les états successifs du trait de côte et pour analyser son évolution entre 1980 et 2011. Les résultats ont démontré des changements très significatifs qui ont atteint le littoral d'Azeffoun.

### **1-6 Les causes de l'érosion marine :**

L'érosion côtière est un cycle naturel de déplacement des sédiments causé par l'action combinée de la mer et des facteurs climatiques tels que les niveaux d'eau, les glaciers, les tempêtes les précipitations et le gel-dégel. L'homme y est aussi pour quelque chose car son action anthropique favorise largement ce phénomène. Dans notre zone d'étude, ce phénomène semble s'accroître depuis quelques années, ce qui représente une menace pour les activités et les infrastructures de transport situées près des côtes (route). Cette intensification de l'érosion côtière a été bien expliquée dans l'aspect évolution du trait de côte.

L'érosion du littoral englobe à la fois des facteurs naturels induits par les forces marines et d'autres générés ou accélérés par l'homme, particulièrement sur les côtes sableuses (sur fréquentation des cordons dunaires qui détruit la végétation et expose le sable à l'action du vent, extraction de matériaux et ouvrages côtiers qui modifient les échanges sédimentaire, ...), (MATE, 1997)

Ces facteurs agissent différemment selon les caractéristiques du substrat et les caractéristiques du milieu. Tous les facteurs doivent être pris en considération lors de l'étude de l'érosion côtière.

#### **I-6-1 Facteurs Naturels :**

Le littoral est un milieu géologique particulier en constante évolution. Il suit un cycle sédimentaire, naturel et bien déterminé, d'accumulation-érosion. L'érosion est favorisée par les facteurs naturels suivants :

##### **I-6-1-1 Courants marins :**

Un courant marin est un déplacement d'eau de mer qui tend à rééquilibrer thermiquement la répartition inégale de l'énergie apportée par les rayons du Soleil.

Les vents aussi sont les facteurs principaux qui génèrent, des courants de surface. Les courants de profondeur, eux sont créés par une différence de densité, due à des niveaux de salinité différente, eux-mêmes dus, aux différences de température engendrées par ce déséquilibre (Ifremer, 2009).

##### **I-6-1-2 Houle :**

La houle est un mouvement ondulatoire formé à la surface de la mer par un champ de vent lointain. Elle n'a pas de relation avec le vent local et est à peine sensible en pleine mer.

Celle-ci s'amplifie au voisinage de la côte et au niveau des hauts fonds, lorsque la profondeur diminue, elle peut alors atteindre plusieurs mètres et déferler.

##### **I-6-1-3 Vent :**

Les roches les plus meubles seront les plus faciles à éroder, de ce fait les dunes y sont très sensibles. Plus le vent est fort et régulier, plus l'érosion sera efficace, ce qui est le cas sur les plages. Le transport se fait par saltation dans le cas des grains les plus grossiers, comme les sables ou cailloutis et par suspension pour les particules les plus fines, comme les limons.

##### **I-6-1-4 Variation de la température :**

L'amplitude thermique peut être à l'origine de la désagrégation de la roche.

#### **I-6-2 Facteurs d'origine anthropique :**

Le littoral est depuis toujours un lieu convoité par les hommes car il permet le développement du commerce, de l'industrie et du tourisme. Le rivage et les écosystèmes littoraux subissent de profondes perturbations, liées à ces pressions humaines. Ces perturbations agissent conjointement et placent les plages dans une situation précaire. A titre d'exemple, on peut citer:

**I-6-2-1 Déstabilisation des dunes :**

Ces dunes bordières constituent une réserve importante en sédiments qui peut être mobilisée par les vagues lors des tempêtes.

Leur déstabilisation peut être liée tout simplement à la fréquentation touristique, L'extraction de matériaux, tels les granulats, pour les besoins de constructions, crée des dommages importants pour les dunes, qui en sont fragilisées.

Certains moyens de transport, comme les tracteurs, empruntent souvent le même chemin, ce qui à force, crée un chenal et donc une érosion et une déstabilisation de la plage.

**I-6-2-2 Les grands travaux portuaires et ouvrages de protection :**

Ils sont initialement créés pour protéger les habitations et autres constructions urbaines, les épis et digues risquent de perturber gravement le transit des matériaux et de modifier l'évolution du rivage.

Les épis concentrent les sédiments en contrebas de l'édifice mais avec la houle, les secteurs situés au-delà de ces obstacles démaigrissent et reculent car ils sont privés d'apports sédimentaires. L'érosion n'est que déplacée.



**Fig.09** : Les terres pleins et le port d'Azeffoun

**I-6-2-3 Les aménagements de front de mer :**

Les villas, promenades, routes, ou parkings, construits sur l'emplacement de dunes voire sur le haut des plages réduisent la largeur de l'estran. Toutes ces constructions sont par conséquent directement menacées des risques d'inondations ou de destruction par la mer, en plus de diminuer le pouvoir de dissipation de l'énergie des vagues par les dunes. Autre conséquence; la nature des sédiments des plages s'en trouve modifiée.



**Fig.10** : Front de mer de la ville D'Azeffoun 2010

#### **I-6-2-4 La mauvaise conception des ouvrages de défense :**

La mauvaise conception des ouvrages de défense est responsable des modifications dans le transport côtier. Ces interventions, si elles parviennent parfois à résoudre localement le problème, finissent souvent par le déplacer sur les plages adjacentes.



**Fig.11** : Influence des terres pleines du port d'Azeffoun sur l'évolution de la plage centre.

### **1-6-2-5 La dégradation des herbiers de phanérogames marines (Posidonies et Cymodocées) :**

Capables d'amortir l'érosion de la côte, par leurs fonctions stabilisatrice des fonds et dissipatrice de l'énergie de la houle. Ce phénomène est dû à la pollution, à la turbidité de l'eau, à la pêche au chalut et aux mouillages sauvages.

### **I-6-3 Facteurs intervenants sur la zone d'étude :**

L'urbanisation et les activités économiques dont l'interférence croissante dans la zone côtière a transformé l'érosion côtière, processus initialement naturel, en un problème d'intensité croissante.

Le littoral d'Azeffoun connaît un développement tant au niveau de l'aménagement des infrastructures portuaires (élargissement du port d'Azeffoun et de ses terres pleins), qu'au niveau des installations urbaines (habitats, hôtels...) au détriment de cordon dunaire. Ces modifications peuvent être l'origine de cette évolution néfaste de ce littoral. A ce stade de l'étude, une description des phénomènes qui ont engendré la situation géomorphologique actuelle est abordée.

#### **I-6-3-1 Aménagements portuaires :**

Un aménagement sur le littoral, modifiera le transit littoral et provoquera donc des phénomènes d'érosion. L'élargissement de port d'Azeffoun ainsi de ses terres pleins ont induit une dynamique rapide du trait de côte qui s'est traduit par une érosion importante de la plage centre ayant déjà nécessité la mise en place de mesures de sauvegarde dont un mur de garde en année 2007.



**Fig.12 :** Aménagements sur le littoral urbain d'Azeffoun.

Cette érosion est due au fait que la configuration géomorphologique de la zone ait été modifiée, en conséquence la modification de direction de la houle et le transfert de son énergie, en créant un courant d'entraînement qui transporte des quantités importantes des sédiments vers le large. On remarque aussi la présence des sédiments grossiers (graviers) sur la haute plage qui indique une forte virulence de la houle à cette endroit (fig.13)



**Fig.13** : La plage à gravelets sous forme de croissant de la plage centre d'Azeffoun

#### **1-6-3-2 Les constructions sur le cordon dunaire littoral :**

Les complexes touristiques et les habitations implantés sur les dunes bordières contribuent considérablement à la fragilisation de ces dunes. Ils empêchent celle-ci de jouer convenablement son rôle de réserve sédimentaire nécessaire à l'équilibre saisonnier et dynamique de la plage ( fig.14)



**Fig.14** : Evolution du littoral de la plage centre d'Azeffoun entre 1980 et 2011.

# **Chapitre II**

## **Matériels et méthodes**

## **II-1 Etude bathymétrique :**

### **II-1-1 Mode du levé bathymétrique :**

Le levé bathymétrique consiste à déterminer les coordonnées tridimensionnelles des points du fond marin dans le système géodésique WGS84 à l'aide d'un récepteur GPS et d'un échosondeur.

Les profondeurs d'eau sont mesurées d'une manière continue par un éch-sondeur de précision installée sur une embarcation pneumatique. La précision est de l'ordre de 0.5% de la profondeur indiquée.

Le récepteur GPS cinématique en temps réel (RTK ; Real Time Kinematic) permet de mesurer un point à une précision inférieure à cinq centimètres (<5 cm). Cette précision verticale permet de déterminer les corrections du niveau de l'eau (corrections des marées).

Pour la réalisation de cette tâche par GPS, il a été procédé à la mise en place du système suivant :

L'embarcation est équipée d'une caisse métallique et d'un support vertical fixé sur le côté, qui maintient à la base le transducteur de l'échosondeur et en tête l'antenne GPS

L'échosondeur calcule la profondeur à partir des mesures effectuées par le transducteur, le résultat de ces deux opérations aboutit à la connaissance des coordonnées du point bathymétrique mesuré.

Ces données fournies par le LEM ont été exploitées à l'aide du logiciel Surfer pour la réalisation d'une carte d'isobathes et une carte en 3D de la bathymétrie

### **II-1-2 Mode du levé au sonar latéral :**

Des levés ont été exécutés suivant des profils parallèles réalisés avec un maillage de 20X20 mètres à l'ouest et le centre et de 40X40 mètres à l'est du port.

Un levé topographique, sur la bande côtière de 500 mètres de longueur et 50 mètres de largeur environ (soit 03 ha environ)

Un levé bathymétrique, reproduisant le relief des fonds marins et couvrant le site d'étude sur 300m en emprise à la cote en recouvrant à des levés de profils perpendiculaires au rivage d'une longueur unitaire de 500m environ jusqu'aux profondeurs de -15m.

Les levés ont été faits par le LEM à l'aide du sonar C-MAX 2 et d'un GPS cinématique en temps (RTK) qui permet le positionnement du levé utilisant la même méthodologie que celle du levé bathymétrique.

## **II-2 Etude sédimentaire :**

Dans cette partie, nous verrons essentiellement comment le paramètre de taille des sédiments peut nous renseigner sur les mouvements sédimentaires dans notre zone d'étude, nous avons procédé à différentes analyses, souvent classiques pour ce genre d'études, on site, l'identification du fond, l'analyse granulométrique.

Les résultats de ces travaux, associés à d'autres données concernant le plan des houles et la fréquence et amplitudes des vents, nous permettront d'obtenir des informations capitales sur la provenance et l'origine des sédiments, ainsi, on pourra prévoir préalablement les zones d'engraissement en sédiments des parcelles infralittorales, ce qui permettra une meilleure entreprise des différents ouvrages côtiers, et autres travaux d'aménagement avant leur mise en œuvre.

Les travaux se sont déroulés au sein du Laboratoire d'Etudes Maritimes, les équipements et les ustensiles nécessaires réunis, l'étude s'est déroulée selon un ordre chronologique précis, afin de concorder les étapes les unes aux autres qui sont les suivantes :

### **II-2-1 Etude granulométrique :**

#### **II-2-1-1 Introduction :**

Pour pouvoir établir la carte de la répartition spatiale de sédiments, il nous faut faire le classement suivant : sables fins : 40-250 $\mu\text{m}$ , sables moyens 250-500 $\mu\text{m}$ , sables grossiers 500-1000 $\mu\text{m}$ , sables très grossiers supérieurs à 1000 $\mu\text{m}$ .

Une fois les 40 échantillons nécessaires aux déroulements des travaux obtenus, ces derniers sont traités et classés au laboratoire, déposés dans des boîtes de pétries libellées, sur lesquelles, on utilisera pour chaque analyse, la quantité de sédiments nécessaires. Il faut rappeler que le poids moyen des échantillons lors des prélèvements en mer était de 300 à 400g pour chaque station. Les échantillons sont ensuite mis dans des sacs en plastique et étiquetés.

#### **II-2-1-2 Principe de la méthode :**

Ce procédé consiste à passer l'échantillon par une série de tamis de maille décroissante et de récolter ensuite le poids partiel de chaque quantité dans le tamis.

Cependant, il existe de très nombreuses normes de tamisage, dans lesquelles les mailles varient selon une progression géométrique décroissante permettant un espacement régulier des abscisses dans l'échelle logarithmique, ainsi qu'une représentation étendue sur un graphique

Cette analyse granulométrique permet de définir, suivant leurs calibres, diverses classes de sédiments indépendamment de leur nature chimique.

**Tab.03:** Diamètres des grains et appellations selon l'échelle de [Wentworth \(1922\)](#)

Taille des diamètres (mm)	Appellation
<0.063	Vase
0.063-0.125	Sable très fin
0.125-0.250	Sable fin
0.250-0.500	Sable grossier
0.500-1	Sable très grossier
1-2	Gravelet

### II-2-1-3 Analyse granulométrique:

#### a. Traitement des données :

A partir des masses cumulées, sont calculés les pourcentages cumulés puis pondérés. Des courbes cumulatives ont été établies propres à chaque station, sur du papier semi logarithmique,

- En abscisse logarithmique les diamètres des particules du sédiment.
- En ordonnée le pourcentage pondéral des refus cumulé inférieur à une taille donnée.

Cela nous permettra de comparer les échantillons et de déterminer graphiquement les différents paramètres grâce auxquels nous calculerons les indices granulométriques.

#### b. Les paramètres granulométriques :

L'analyse des paramètres granulométriques fournit des informations importantes sur la provenance, l'historique du déplacement et les conditions de dépôt des particules sédimentaires ([Bui et al., 1990 in Cordier, 2007](#)). Les trois paramètres granulométriques usuels utilisés en sédimentologie sont : la taille moyenne des sédiments (Mz), l'indice de tri (So), l'indice de symétrie de la distribution (Sk).

Les méthodes de calcul de ces paramètres ont été obtenues par les formules de Folk et Ward (1957) qui nécessite l'élimination de la fraction coquillière de l'échantillon:

- **Indice central (diamètre moyen) :** permet de positionner globalement l'échantillon sur l'échelle des dimensions des grains. Il traduit la puissance moyenne des paléoécoulement ([Losson et Corbonnois 2006](#)).

$$Mz = \frac{\phi_{16} + \phi_{50} + \phi_{84}}{3} \dots\dots\dots(1)$$

Où  $\phi = -\log_2(D)$  ; D en millimètre

- **Le tri** : il donne une idée sur l'étalement de la courbe au tour de son grain moyen, et il nous renseigne sur la croissance du tri lors du transport et de la sédimentation (Chamley, 1987)

$$So = \frac{\phi_{84} - \phi_{16}}{4} + \frac{\phi_{95} - \phi_5}{6.6} \dots\dots\dots(2)$$

- **Indice d'asymétrie (Skewness)** : ce paramètre indique sur l'enrichissement en particules grossières (asymétrie négative), l'enrichissement en particules fines (asymétrie positive) ou s'il y'a symétrie. Il exprime le milieu de dépôt, plutôt que les conditions du transport (Losson et Corbonnois 2006).

$$Sk = \frac{\phi_{16} + \phi_{84} + 2(\phi_{50})}{2(\phi_{95} - \phi_5)} + \frac{\phi_5 + \phi_{95} - 2(\phi_{50})}{2(\phi_{95} - \phi_5)} \dots\dots\dots(3)$$

## II-3 Transport sédimentaire : GSTA

### II-3-1 Introduction

La détermination du sens et la direction de transport des sédiments est de première importance dans l'étude du sédiment marin (Poizot, 2009). Avec l'objectif d'étudier la dynamique des sédiments à l'interface eau-sédiment et de simuler les tendances de transports par le modèle de GSTA (Grain Size Trend Analysis), nous avons focalisé notre attention sur l'utilisation des paramètres granulométriques de sable du littoral d'Azeffoun.

Ce modèle permet d'obtenir une carte de représentation des directions de transport sédimentaire préférentielle, dans laquelle la probabilité de transport entre deux points d'échantillonnage est proportionnelle à la longueur du vecteur résiduel (Bertier, 2009)

### II-3-2 Principe du Modèle de « Gao et Collins »:

Le modèle se base sur une approche initiée par McLaren (1981) puis fondée sur des observations empiriques (McLaren et Bowles, 1985) qui proposent de définir les directions privilégiées de transit des sédiments par l'étude de l'évolution de trois paramètres sédimentologiques la taille moyenne «Mz», le tri «So» et la symétrie de la distribution sédimentaire «Sk» qui expriment les changements des caractéristiques granulaires au cours des processus d'érosion, de transport, de dépôt (McLaren, 1981; in Akouango, 2009)

A partir de la comparaison de ces (3) paramètre des échantillons voisins, 2<sup>3</sup> cas possibles peuvent apparaitre, McLaren détermine les directions privilégiées de transport de sédiment.

$$1) Mz_1 \geq Mz_2 ; So_1 \geq So_2 ; Sk_1 \leq Sk_2$$

- 2 )  $Mz1 \leq Mz2$  ;  $So1 \geq So2$  ;  $Sk1 \geq Sk2$
- 3 )  $Mz1 \geq Mz2$  ;  $So1 \geq So2$  ;  $Sk1 \geq Sk2$
- 4 )  $Mz1 \leq Mz2$  ;  $So1 \geq So2$  ;  $Sk1 \leq Sk2$
- 5 )  $Mz1 \geq Mz2$  ;  $So1 \leq So2$  ;  $Sk1 \leq Sk2$
- 6 )  $Mz1 \leq Mz2$  ;  $So1 \leq So2$  ;  $Sk1 \geq Sk2$
- 7 )  $Mz1 \geq Mz2$  ;  $So1 \leq So2$  ;  $Sk1 \geq Sk2$
- 8 )  $Mz1 \leq Mz2$  ;  $So1 \leq So2$  ;  $Sk1 \leq Sk2$

Dans le modèle de McLaren et Bowles (1985), Gao et Collins (1992) distinguent deux types d'évolution des paramètres statistiques, caractérisant un transport efficace des sédiments dans un environnement naturel, les transports de type **FB-** et **CB+** (Poizot, 2009)

Deux cas de transport présentent les relations requises par les paramètres granulométriques, exprimés en unité phi ( $\phi$ ), pour un transport allant d'une station 1 vers une station 2 (fig.04).

**Tab.04:** Relations entre les paramètres granulométriques (en unité de phi) de deux stations 1 et 2, pour un transport sédimentaire de 1 vers 2, de type FB- et CB+.

Cas	Définition	Relations
<b>FB-</b>	Le sédiment est érodé à sa source, transporté puis totalement déposé. Le sédiment résultant du dépôt est plus fin, mieux trié et présente une asymétrie vers les particules grossières (asymétrie $< 0$ en unité $\phi$ ).	$Mz1 \leq Mz2$ $So1 \geq So2$ $Sk1 \geq Sk2$
<b>CB+</b>	Le sédiment érodé à sa source est transporté et subit un dépôt sélectif le long du trajet de son transport du fait d'une diminution de l'énergie de l'agent de transport. Le sédiment qui résulte de ce transport est plus grossier, mieux trié avec une asymétrie vers les particules fines (asymétrie $> 0$ en unité $\phi$ ).	$Mz1 \geq Mz2$ $So1 \geq So2$ $Sk1 \leq Sk2$

- Cas FB- (*finer, better sorted, more negatively skewed*): la finesse des sédiments augmente avec l'éloignement de la source et de la diminution de l'hydrodynamisme,
- Cas CB+ (*coarser, better sorted, more positively skewed*): les sédiments s'enrichissent en particules plus grossières et deviennent mieux classés et d'asymétrie plus positive.

### II-3-3 Procédure analytique: Gao et Collins (1991) :

En premier, les paramètres d'un échantillon sont comparés avec ceux des sites environnants : la distance entre les deux points soit inférieure ou égale à une Distance Critique l'échantillonnage (**Dcr**) qui correspond à la distance maximum séparant deux points adjacents afin d'inclure le maximum de points dans le calcul des vecteurs de transport et pour qu'il n'aurait pas de vecteurs nuls. Il apparaît alors évident que les caractéristiques de la grille d'échantillonnage influencent fortement les résultats du modèle. C'est pour cette raison que Gao et Collins (1994) recommandent l'utilisation d'une grille d'échantillonnage uniforme. Un vecteur de grandeur unitaire ou vecteur de tendance  $\vec{r}(x,y)$  est dessiné à chaque fois que l'un des deux cas choisis ( FB-et CB+) est observé entre 2 points.

En second, si un point d'échantillonnage génère plusieurs vecteurs, une sommation finale est faite de manière à obtenir un vecteur unique résultant tel que:

$$\vec{R}(x, y) = \sum_{n=1}^n \vec{r}(x, y) \quad \dots\dots\dots(4)$$

Avec :

$n$  : nombre de vecteurs tendances ;  $\vec{r}(x, y)$  : vecteur tendance ;  $\vec{R}$ : vecteur résultant et  $(x, y)$  : coordonnées du vecteur

Enfin, une opération de filtrage est appliquée pour réduire une nouvelle fois le bruit causé par les vecteurs dont les directions sont éloignées de la direction générale du modèle.

Les vecteurs sommation de chaque point sont additionnées au vecteur des points voisins situés toujours à une distance comprise dans Dcr. Les vecteurs de transport ainsi définies, s'écrivent:

$$\vec{R}_{av}(x, y) = \frac{1}{K+1} + \left[ \vec{r}(x, y) + \sum_1^K \vec{R}_j \right] \quad \dots\dots\dots(5)$$

Avec

$\vec{r}$  : le vecteur des points sélectionnés;  $\vec{R}_j$  : les vecteurs voisins ;  $K$  : nombre total de sites voisins ayant impérativement un voisin

### II-3-4 Limites de calcul des tendances de transport sédimentaire :

La fiabilité des résultats de model de [Gao et Collins 1991](#) peut être liée à la pertinence du choix de Dcr et la méthode d'échantillonnage, une grille non uniforme peut induire des erreurs dans la définition des directions des vecteurs de transport en fonction du nombre de stations voisines comprises dans le cercle de rayon Dcr ([Le Roux, 1994a, in Poizot 2009](#)).

### II-3-5 Application du modèle dans la zone d'Azeffoun :

#### II-3-5-1 Calcul des paramètres granulométriques :

Le calcul de ces paramètres au niveau de la plage centre d'Azeffoun a été effectué à l'aide de programme **Gradistat** Version 8.0.

#### II-3-5-2 L'exploitation des données de sortie :

Les résultats sont exploités avec le logiciel surfer, l'option « *vecteur map 2* » qui permet de dessiner une carte des vecteurs modélisant le transport sédimentaire.

### II-4 Etude de la réfraction :

L'étude de la réfraction de la houle a pour objet l'exploitation des caractéristiques de la houle au large pour définir les caractéristiques de la houle à la côte (direction et hauteur).

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.

La propagation de la houle entre le large et la côte, étudiée avec le modèle numérique SWAN (Simulating Waves Nearshore développé par l'université de DELFT), est basée sur les données bathymétriques obtenues des cartes nautiques du SHOM ainsi que la bathymétrie réalisée sur terrain.

#### II-4-1 Principe de calcul de la réfraction de la houle :

La connaissance de la climatologie du large, permet d'établir une statistique de la houle qui est ensuite propagée vers la côte en utilisant des fonctions de transfert calculées suivant la bathymétrie représentée suffisamment au large, dans les fonds ou les houles ne sont pas réfractées. Le coefficient de réfraction est défini de la manière suivante :

$$K_r = H_s \text{ local} / H_s \text{ large} \dots\dots\dots(6)$$

Les calculs de la réfraction de la houle entre le large et la côte sont effectués par le modèle numérique SWAN pour différentes conditions de houle au large (hauteur, période et direction). Le logiciel modélise la propagation de la houle en prenant notamment en compte les phénomènes de :

- Réfraction, sur les fonds et autour des ouvrages.
- Frottement sur le fond.
- Déferlement.

## II-4-2 Données de base :

### II-4-2-1 Données bathymétriques :

La bathymétrie utilisée pour cette étude de réfraction est celle issue de la digitalisation de la carte SHOM de la région d’Azéffoun ainsi que celle issue de la campagne de reconnaissances sur site réalisée au mois de mai par le LEM dans le cadre de l’étude de protection du rivage urbain d’Azéffoun.

### II-4-2-2 Données de la houle au large :

Les données de la houle au large utilisées pour le calcul de la réfraction de la houle au LEM sont celles du Summary of Synoptic Meteorological Observations (SSMO consistant 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.

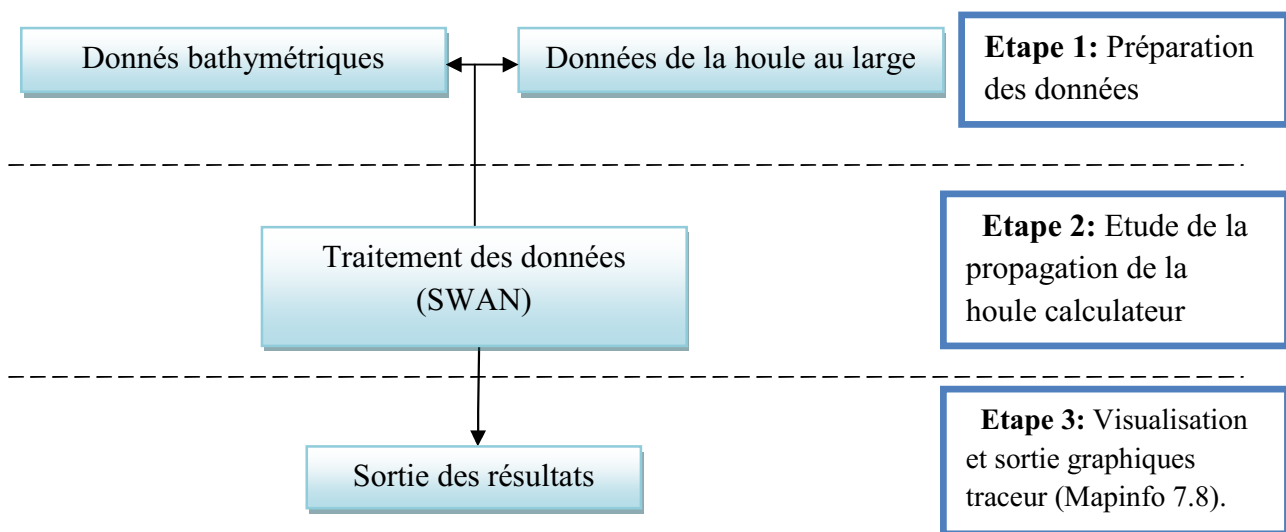
Le choix des périodes est fait en fonction de la répartition des probabilités de dépassement d’une houle d’amplitude donnée. Les houles de fortes amplitudes (>10S), ont une probabilité d’apparition relativement faible. Les périodes de houle considérées dans le cadre de cette étude sont : 6, 8 et 10 secondes pour les houles annuelles (tab.05)

**Tab.05** : Conditions de houles retenues dans le cadre de cette étude (LEM, 2009):

Période direction au large (s)	Direction de la houle au large			
	Nord	Nord est	Ouest	Nord ouest
6	Hs=4.90	Hs=4.75	Hs=7.45	Hs=4.41m
8	Hs=5.53	Hs=5.27	Hs=8.29	Hs=4.99
10	Hs=6.16	Hs=5.79	Hs=9.13	Hs=5.58
12	Hs=7	Hs=6.47	Hs=10.24	Hs=6.35

### II-4-2-3 Déroulement des étapes de la réalisation de la réfraction :

Afin de procéder à l'étude de la réfraction deux logiciels sont couplés, il s'agit du logiciel des SIG Mapinfo version 7.8 comme surface de saisie de données et d'acquisition de résultats, ainsi que le logiciel SWAN (Simulating waves Nearshore) comme calculateur. L'étude de la propagation de la houle sur un site réel comporte trois phases principales, présentées schématiquement sur l'organigramme ci-dessous:



**Fig.15 :** Organigramme du déroulement des étapes de la réalisation de la réfraction.

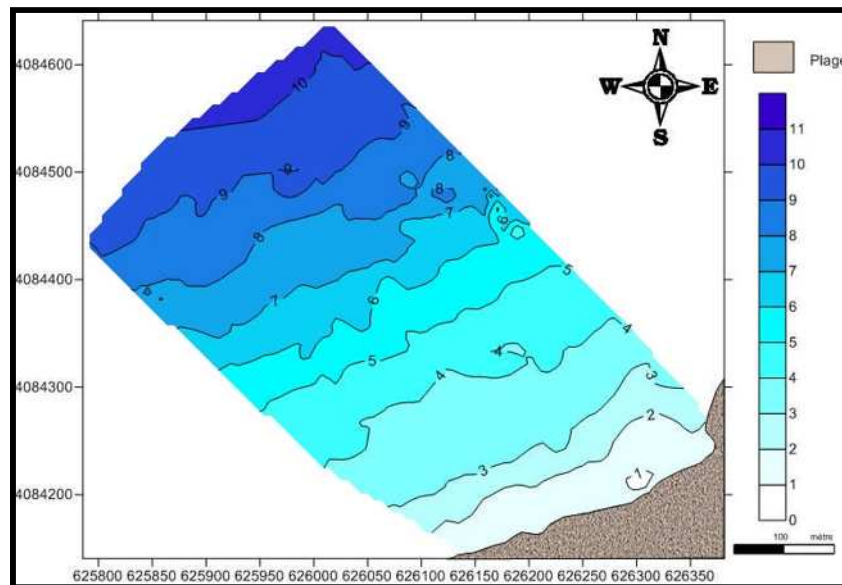
**Chapitre III**  
**Expression des résultats**  
**et discussion**

### III-1 Résultats et interprétation de la bathymétrie :

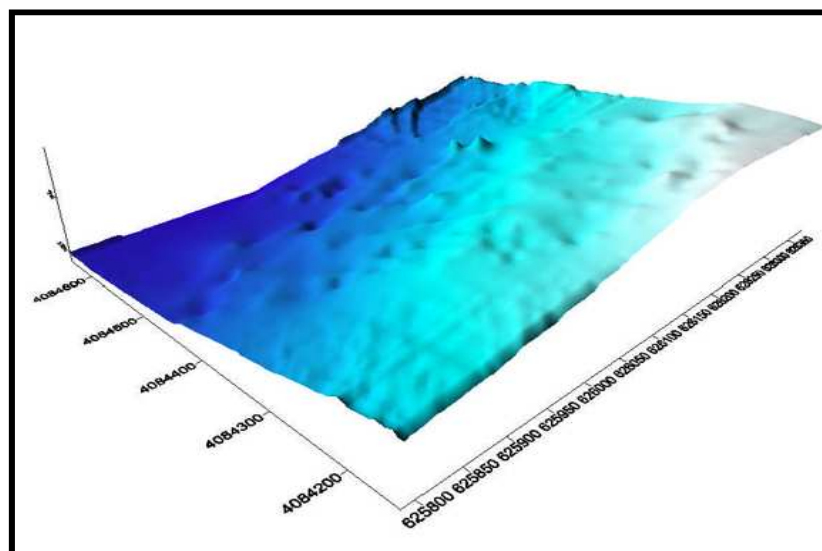
#### III-1-1 Résultats de la bathymétrie :

L'étude bathymétrique est une étape indispensable dans la modélisation de l'hydrodynamisme dans les zones côtières. Des informations si importantes, peuvent être extraites à partir d'une carte bathymétrique telle que la morphologie générale de la plage sous marine.

L'étude topo-bathymétrique peut aussi nous être utile dans le choix de l'emplacement et du type de la structure pour se protéger contre l'action érosive marine.



**Fig.16 :** Bathymétrie de la plage centre d'Azeffoun



**Fig.17 :** Bathymétrie en 3D de la zone d'étude.

### III-1-2 Interprétation de la bathymétrie

#### III-1-2-1 La morphologie sous marine

La plage sous-marine correspond à la zone côtière qui reste sous l'eau en permanence. La limite inférieure de ce domaine marque la frontière du système littoral. (Desmazes, 2007)

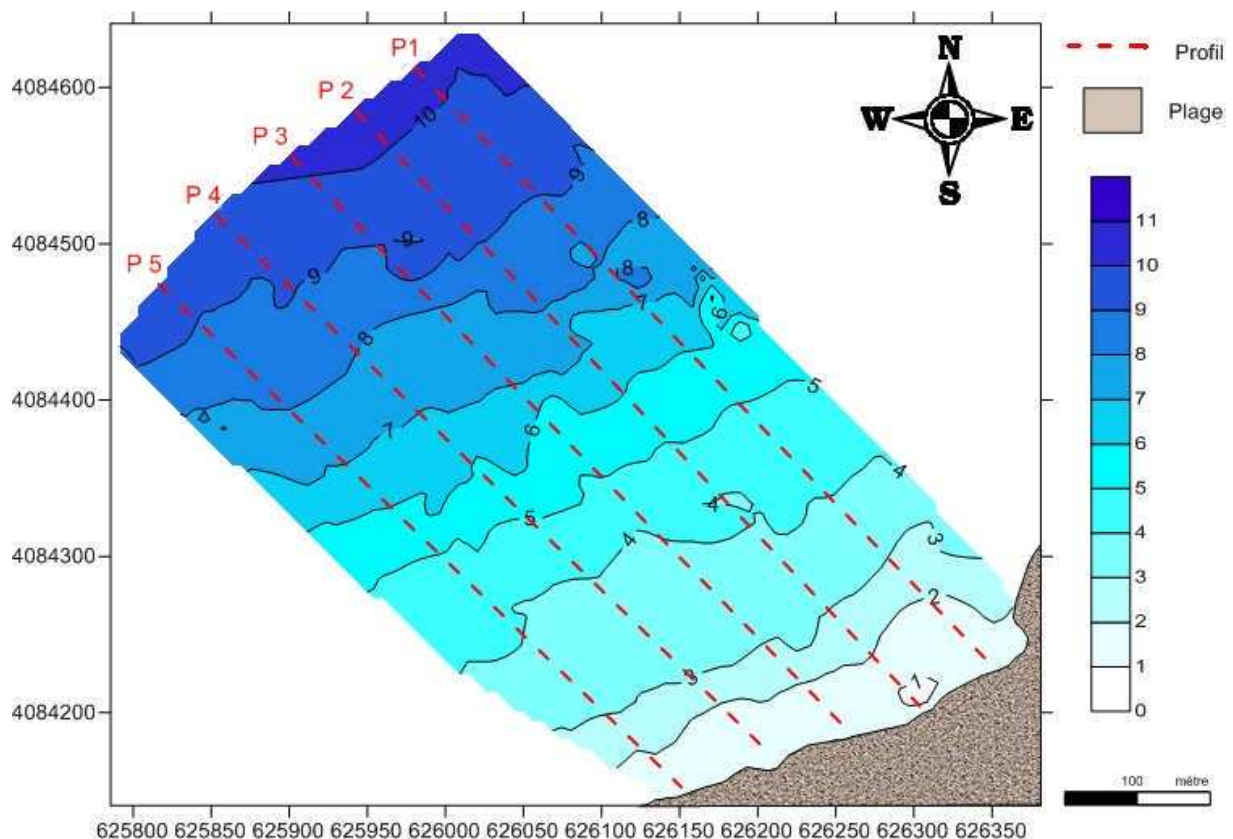
La carte bathymétrique (fig.18) montre des isobathes plus au moins réguliers, espacés et parallèles à la côte. La morphologie sous marine est homogène et montre clairement l'inexistence de système de barre sableuse.

Bien que les plages aient des caractéristiques tridimensionnelles (Castelle *et al.*, 2007), l'analyse de leur morphologies peut être, plus commodité, décomposé en étude du profil transversal.

#### III-1-2-2 Profils bathymétriques : Analyse cross-shore

L'analyse de profils bathymétriques simplifie considérablement la description du domaine sous-marin. Un certain nombre d'informations importantes peuvent être déduites de cette façon.

Même si le profil d'une plage peut présenter une grande variété de formes, la caractéristique morphologique la plus importante est la pente moyenne entre les limites côté mer et côté terre.



**Fig.18** : Profils sur la carte bathymétrique de la zone d'étude (Azeffoun)

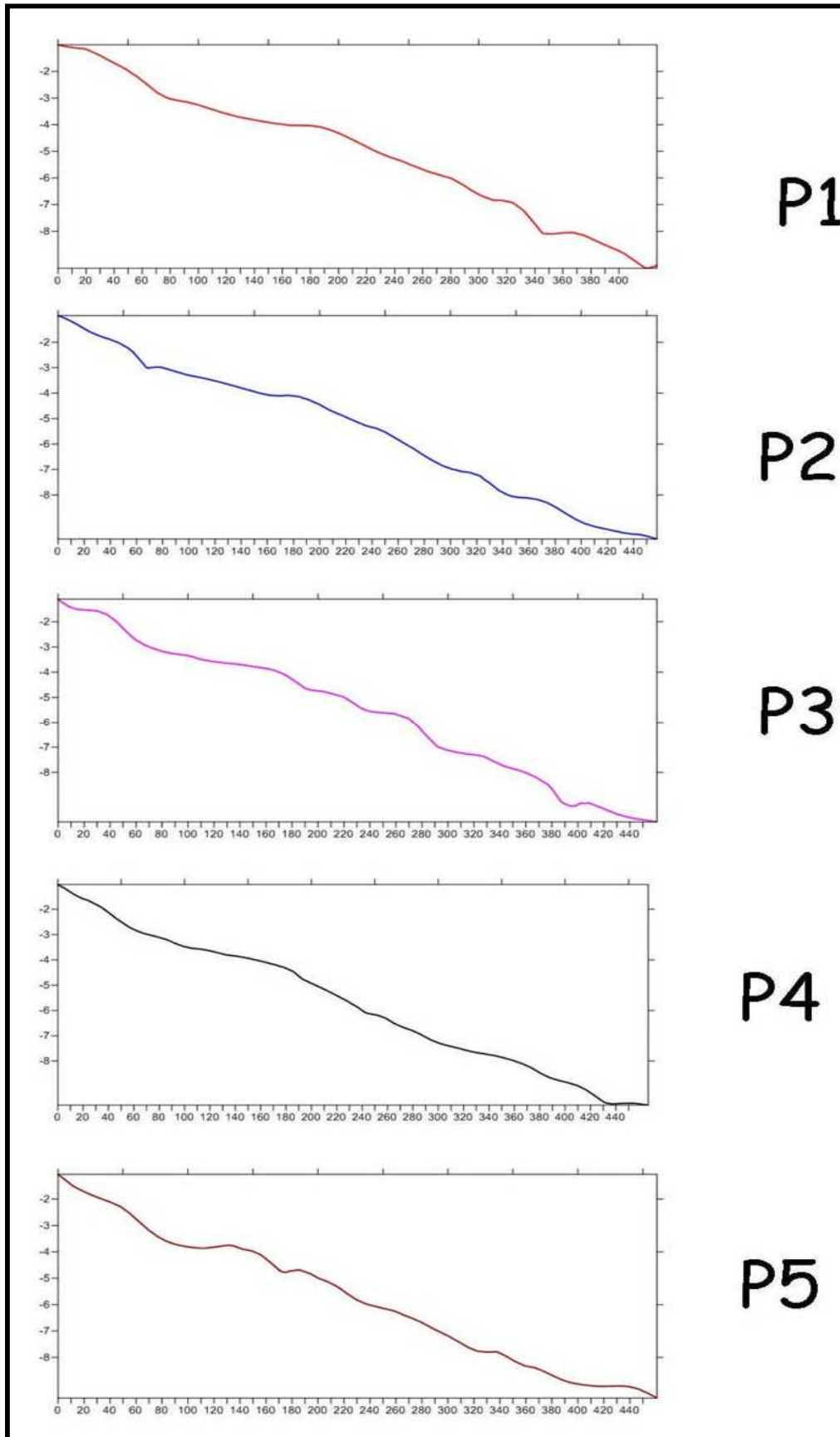


Fig.19 : Profils de plage de centre d’Azeffoun

**Interprétation des profils :**

Les profils sont extraits de la carte et plus précisément de MNT définis à l'aide du logiciel SURFER (fig.19)

Cinq profils sont tracés sur la carte bathymétrique, Les profils **1, 2, 3, 4** descendent en pente abrupte avec une moyenne générale de 02 % jusqu'à 3 mètres de profondeur, puis continue à descendre en pente douce jusqu'à -5m où il présente une première rupture de pente modérée, puis il continue à évoluer en pente plus au moins raide jusqu'à -10m de fond.

Le profil **5** descend en pente abrupte d'ordre 1.5% jusqu'à 2.5mètres de profondeur, évolue en pente douce jusqu'à -4 et continue par un replat. Puis entame une rupture de pente plus au moins modérée jusqu'a -10m

**Conclusion :**

D'une manière générale, le fond marin de notre zone d'étude se caractérise par un relief homogène. Les profils présentent une morphologie particulière caractérisée par des pentes raides près de la côte. Ces derniers illustrent la morphologie sous marine des fonds qui est affectée par le phénomène d'érosion

**III-2 Résultats et interprétation de l'analyse granulométrique :****III-2-1 Fraction fine :****III-2-1-1 Résultats de la fraction fine :**

Les résultats de l'analyse de la fraction pélitique sont mentionnés dans l'annexe.

**III-2-1-2 Interprétation des résultats de l'analyse de la fraction pélitique :**

Les résultats de l'analyse de la fraction pélitique sont mentionnés dans l'annexe.

Bien que la tendance générale du pourcentage soit très faible sur les échantillons prélevés, la carte d'isopélites montre une répartition spatiale des pélites conforme au schéma classique généralement admis, à savoir une augmentation graduelle des teneurs en pélites de la côte vers le large.

Dans la franges côtière comprise entre 0 et -5m (avec des pénétrations allant jusqu'à -6m) de profondeur, les teneurs en pélites varient tout en restant sous les 3%, une frange intermédiaire se présente entre -5 et -6m voir -10m de profondeur dont les teneurs en pélites sont comprises entre 3 à 6%, puis vont en augmentant vers le large pour atteindre des valeurs allons jusqu'à 10%.

Les faibles teneurs en éléments fins observées dans les petites profondeurs s'expliquent par l'augmentation de l'énergie de la houle (fig.20), qui favorise la remise en suspension des

sédiments et l'élimination d'une partie importante de la fraction fine vers les zones calmes permettant leur décantation.

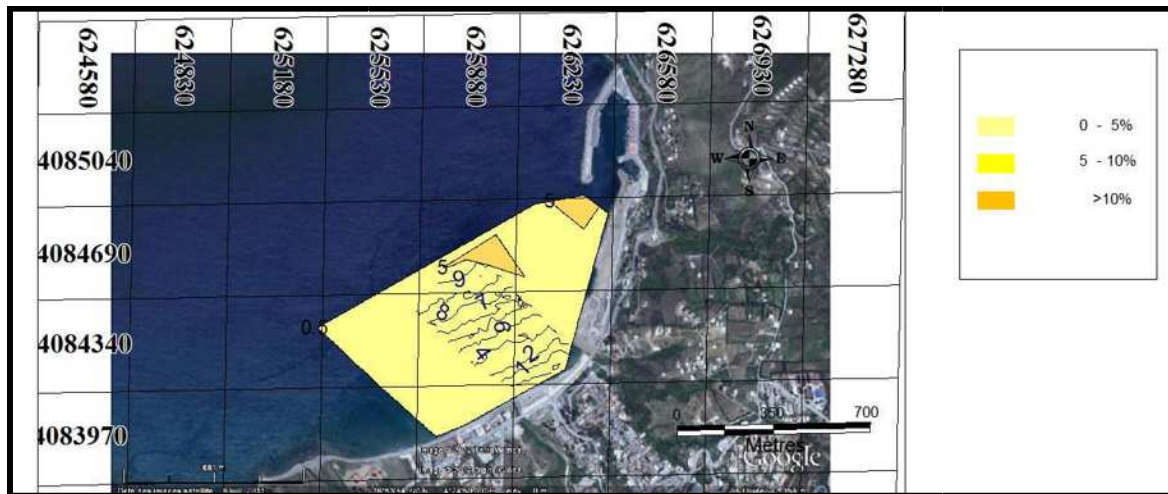


Fig.20 : Répartition spatiale des teneurs en pélites

III-2-2 Fraction grossière :

III-2-2-1 Les courbes granulométriques :

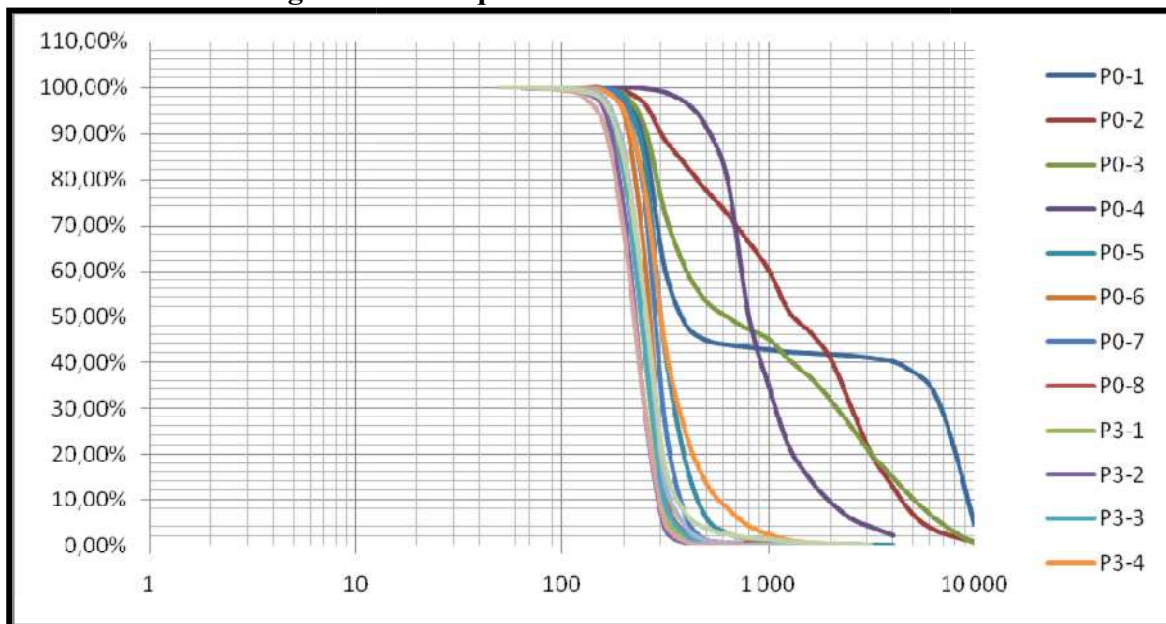
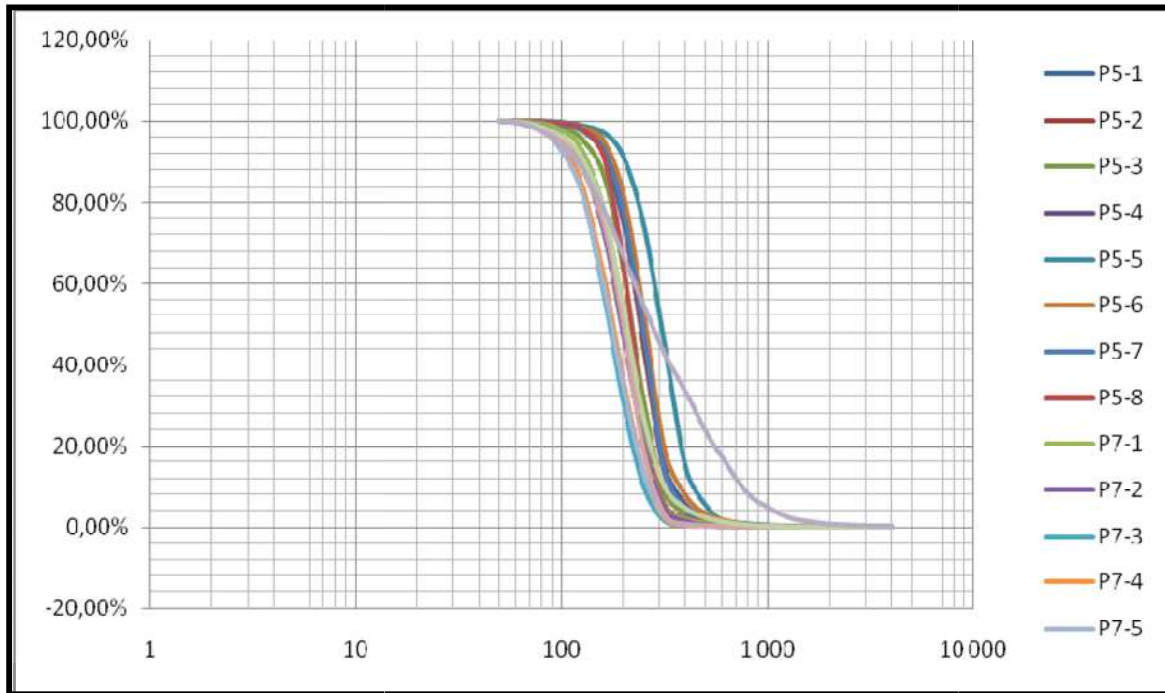
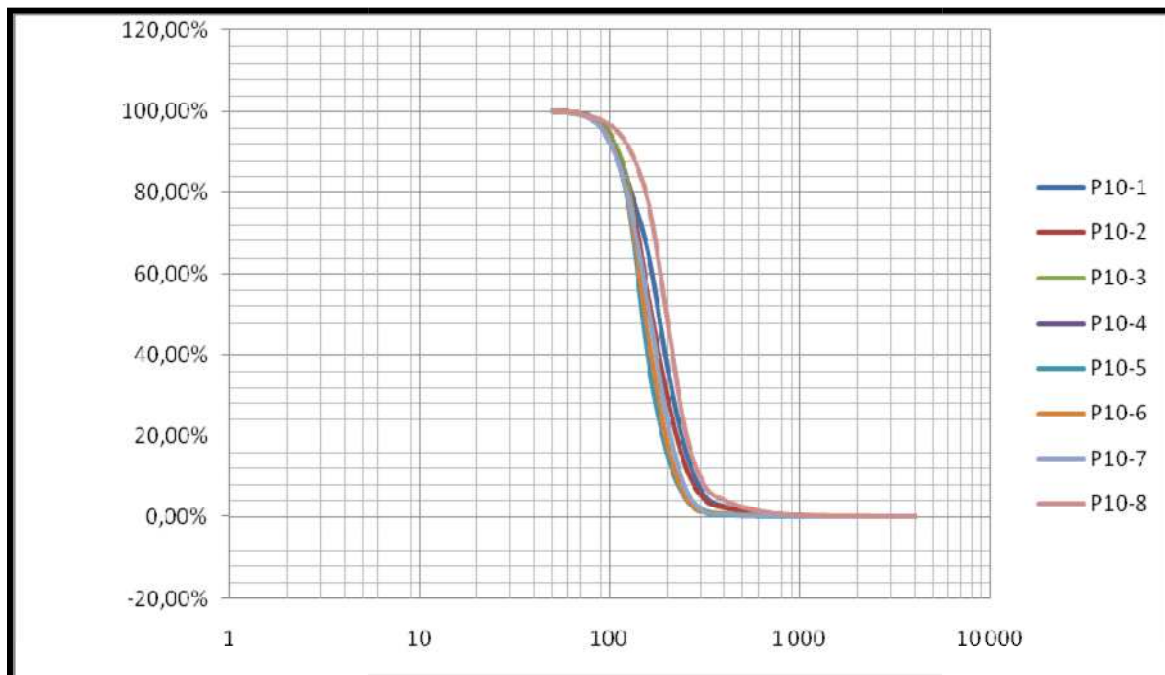


Fig.21 : Courbes cumulatives des échantillons 0 m et -3m de profondeur



**Fig.22 :** Courbes cumulatives des échantillons -5 m et -7m de profondeur



**Fig.23 :** Courbes cumulatives des échantillons -10 m de profondeur

**Interprétation des courbes granulométriques : ( fig. 21, 22 et 23)**

Nous décrivons les traits essentiels des courbes granulométriques cumulatives des 38 échantillons analysés.

Dans l'ensemble, les courbes sont généralement redressées en forme de S ce qui implique qu'il y a des sédiments homogènes. Les sables sont transportés dans un milieu plus ou moins agité avec une évacuation des particules fines vers le large par le courant de retour.

Notons que la majorité des sédiments sont mélangés à des débris de coquilles, débris végétaux en grande quantité.

Pour les sédiments qui ont une courbe granulométrique en forme parabolique, ce type de présentation est observé au niveau des sédiments prélevés dans la partie Ouest de la zone d'étude et en voisinage de l'embouchure de l'Oued Tiferst. Dans les faibles profondeurs, il indique une hétérogénéité du stock sableux témoignant d'un excès de charriage des sédiments.

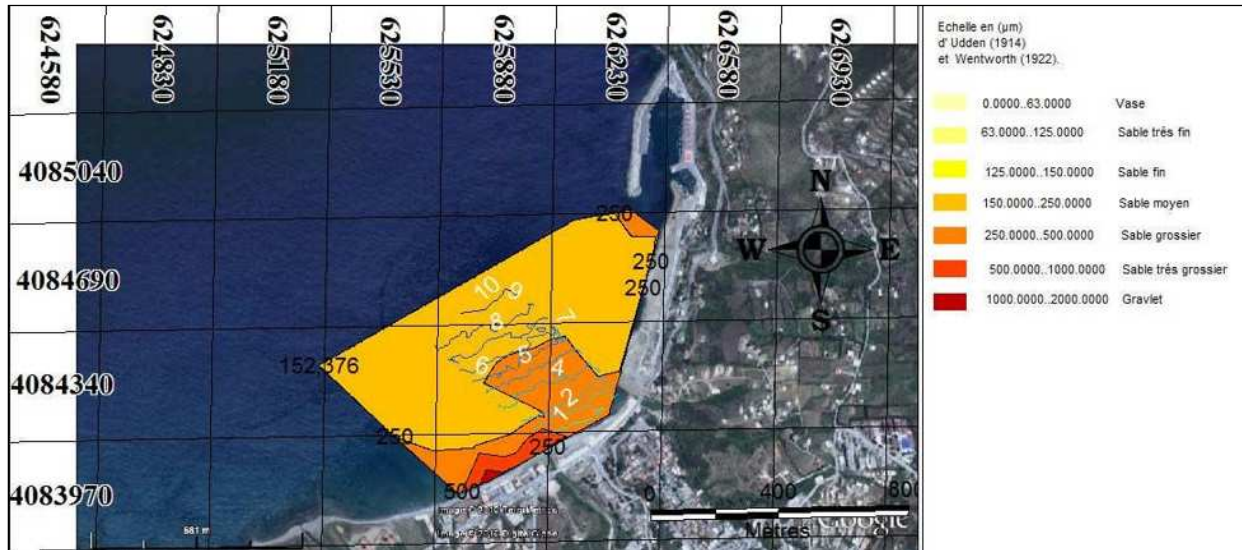
Une bonne corrélation s'explique par le fait que les sédiments forment un ensemble en équilibre avec la dynamique du milieu et ont subi un tri sélectif au cours d'un transport, ceci témoigne d'une bonne distribution

### III-2-2-2 Résultat des paramètres granulométriques :

Les résultats de l'analyse granulométrique des sédiments prélevés dans les 38 stations sont représentés dans l'annexe.

#### III-2-2-2-1 Interprétation de la distribution des paramètres granulométriques :

##### A. Médiane granulométrique D50 :



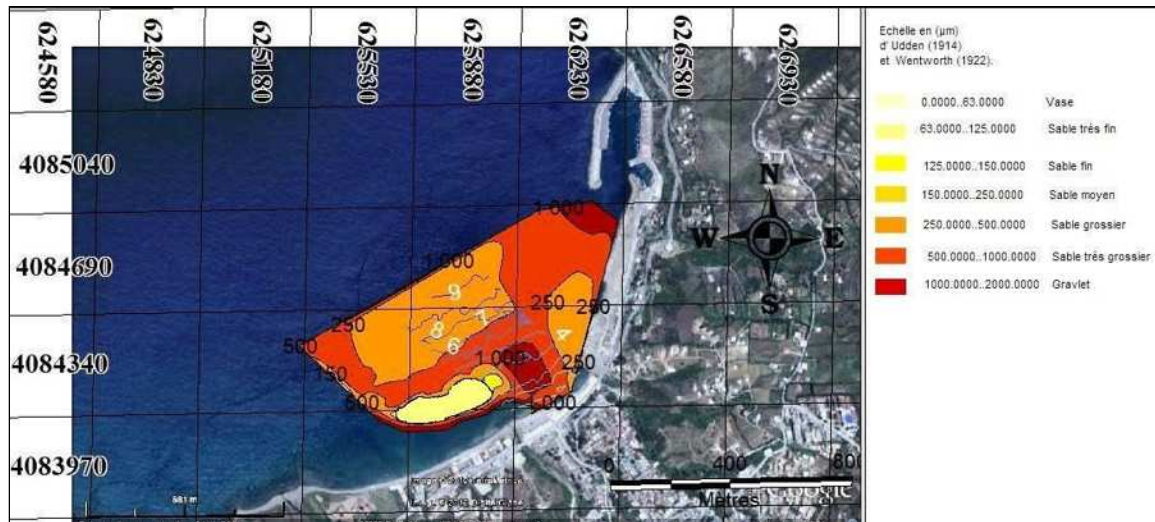
**Fig.24** : Répartition de D50 dans la région de littoral urbain d'Azeffoun.

D'une façon générale, les sédiments sont relativement homogènes et la médiane varie entre 148.2 et 1327.6µm. La moyenne de la médiane est de 280 µm, ceci montre donc que la constitution du sédiment est majoritairement du sable moyen.

Cette répartition montre une décroissance du diamètre du grain de la côte vers le large. Les sédiments fins dont le diamètre médian est compris entre (0 et 250µm), sont repartis sur la carte à partir de l'isobathe (-5m) jusqu'au large qui se présente comme étant une limite dynamique pour la répartition de ces classes de sédiment dans la zone.

La répartition spatiale de ce paramètre obéit au schéma classique de la répartition des sédiments en mer par une décroissance de la taille des particules de la côte vers le large. (fig.24)

**B. Décile supérieur D90 :**

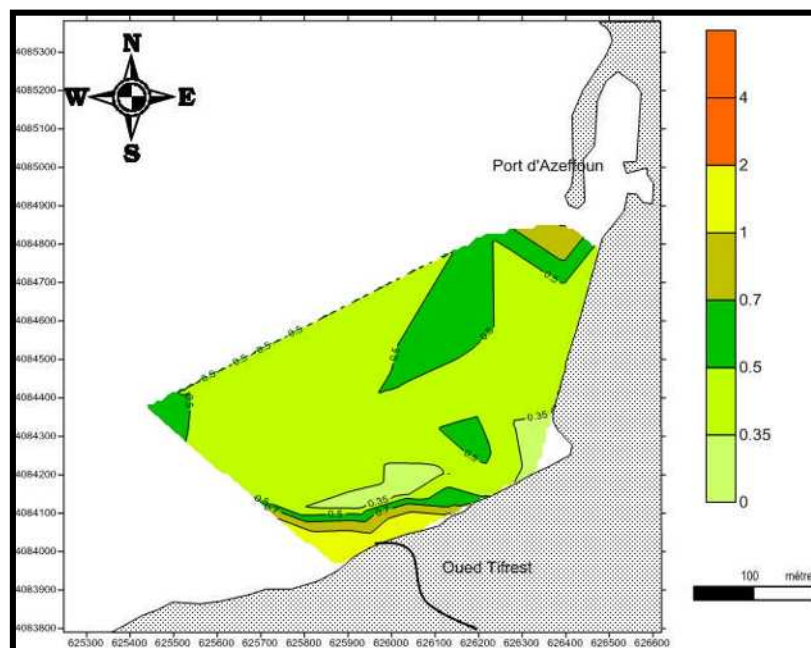


**Fig.25:** Répartition des Q90 dans la région de littoral urbain d’Azeffoun

La répartition garde l’aspect presque identique à celle de la médiane en se divisant à 2 grande facies, le premier ou le diamètre inférieur à 250 $\mu$ m qui domine vers le large à partir de la profondeur de 4m jusqu’à 10m. Un second facies apparait (diamètre entre 250et 700 $\mu$ m) et évolue tout au long de la cote vers le large sur tout le rivage de la zone (0 à -4m). Nous apercevons un troisième facies qui se trouve sur l’isobathe 4 m de profondeur celui la peut être du à l’Oued Tifrest. ( fig.25)

**III-2-2-2-2 Interprétation de résultats de la distribution des indices granulométriques :**

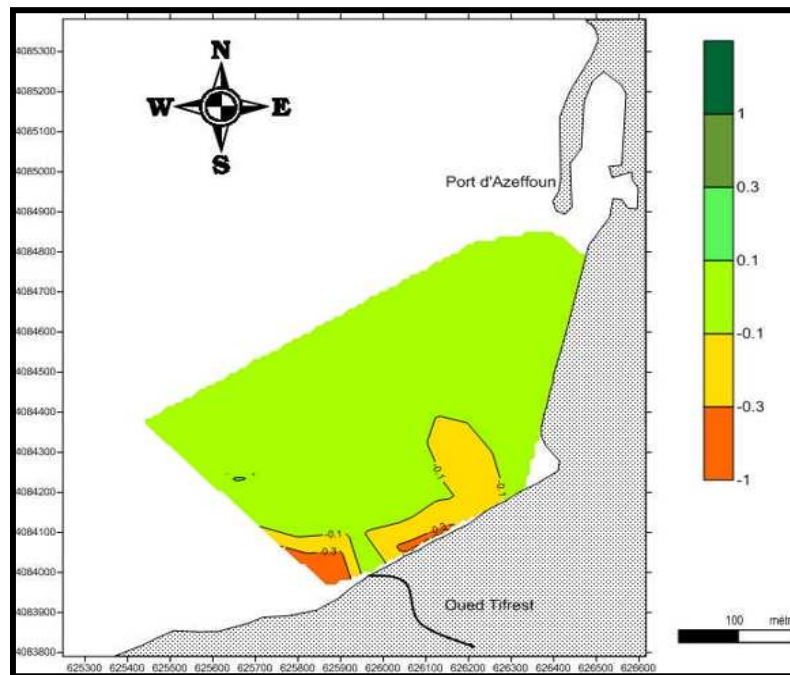
**A. L’indice de tri :**



**Fig. 26 :** Distribution spatiale de l’indice de tri So

Le calcul de cet indice montre que la majorité des valeurs sont inférieures à 1.5 ( $1 < S_o < 1.5$ ) les sédiments sont donc très bien trié selon la classification de Folk et Ward 1957.

B. L'indice d'asymétrie (skewenes)  $S_k$  :



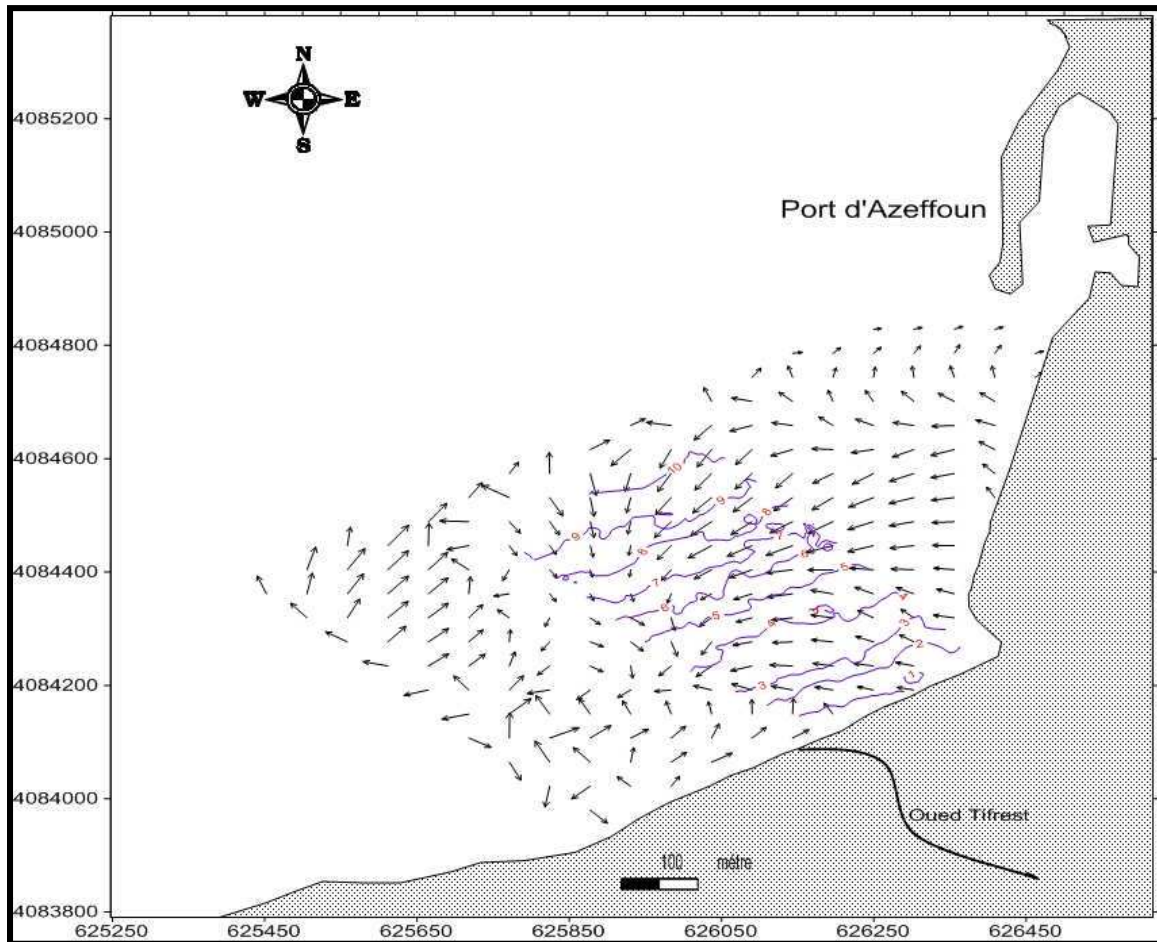
**Fig. 27:** Distribution spatiale de l'indice d'asymétrie  $S_k$

Les valeurs de cet indice sont pour la plus part voisins du 1. Les sédiments présentent un même classement aussi bien du côté fin que du côté grossier donc une répartition symétrique très positive qui correspond à un bon classement Folk et Ward 1957.

L'analyse granulométrique révèle une constitution de sable en majorité fin et moyen ( $150 < D_{50} < 500\mu\text{m}$ ) et des teneurs de pélites très faible (3-10%), ceci indique la présence d'une énergie importante mettant en perpétuel remaniement les sédiments présents dans le site.

### III-3 Résultats et interprétation de la modélisation de transport tendanciel par le GSTA :

#### III-3-1 Résultat de la modélisation de transport tendanciel par le GSTA :



**Fig.28 :** Vecteurs tendanciels obtenus l'aide de model GSTA

#### III-3-2 Interprétation de la modélisation de transport tendanciel par le GSTA :

Les vecteurs de tendances au transport sédimentaire (fig.28), montrent un déplacement des sédiments dans le profil de la côte vers le large dans la partie de la plage la plus touchée par le phénomène d'érosion. Ce déplacement de particules vers le large dans ce site est du probablement à la convergence de deux courants qui s'opposent créée par les houles frontales Nord-Nord-Ouest, qui sont responsable de la génération d'un courant de retour au niveau de ce site en mobilisant des particules vers le large.

Les résultats obtenus lors de cette étude mettent en évidence la dynamique sédimentaire active dans le sens de la côte vers le large et la forte interaction des agents hydrodynamiques et les grains des sédiments. L'application de model de GSTA dans la plage d'Azeffoun a donné des résultats approuvables, qui concordent avec les résultats obtenus au cours de l'étude qui suit celle de la réfraction de la houle.

### III-4 Résultats et interprétation de l'étude de la réfraction de la houle :

#### III-4-1 Résultats de l'étude de la réfraction de la houle :

Les résultats obtenus à partir de l'étude de la réfraction de la houle à l'aide de programme SWAN de différents secteurs angulaire :

- Une direction de 340°N perpendiculaire à la cote pour mesurer les effets d'une houle frontale
- Deux directions de 360°N 280°N à incidence oblique.

A des périodes de retour de 2 ans, 10 ans, 20 ans et 50 ans. Les résultats sont représentées dans le tableau suivant :

**Tab.06** : Résultats l'étude de la réfraction (LEM, 2010)

Direction en degré	Période de retour	Hs au large m	Hs à -1.5 m	Kr -1.5m	Hs à -3 m	Kr -3m	Hs à -5 m	Kr -5m	Hs à - 10 m	Kr- 10m
N360°	2 ans	4.90	1.44	0.29	2.02	0.41	2.94	0.60	3.84	0.78
	10 ans	6.38	1.54	0.24	2.15	0.33	3.03	0.47	4.67	0.73
	20 ans	7.02	1.59	0.22	2.21	0.31	3.35	0.47	4.91	0.70
	50 ans	7,87	1.62	0.20	2.26	0.28	3.42	0.43	5.10	0.64
N340°	2 ans	4.16	1.43	0.34	1.98	0.47	2.90	0.70	3.70	0.88
	10 ans	5.40	1.52	0.28	2.10	0.38	3.15	0.58	4.51	0.83
	20 ans	5.94	1.57	0.26	2.17	0.36	3.26	0.54	4.76	0.80
	50 ans	6.65	1.60	0.24	2.21	0.33	3.32	0.50	4.94	0.74
N280°	2 ans	7.36	1.68	0.22	2.30	0.31	3.42	0.46	5.07	0.68
	10 ans	9.22	1.73	0.18	2.34	0.25	3.48	0.38	5.20	0.56
	20 ans	10.02	1.82	0.18	2.47	0.24	3.70	0.37	5.50	0.54
	50 ans	11.08	1.84	0.16	2.50	0.22	3.72	0.33	5.55	0.50

### III-4-2 Interprétation des résultats de l'étude de la réfraction :

Nous prendrons en considération les houles de période de retour de 50 ans :

- Les houles provenant du secteur 340°N sont peu réfractées à -10m avec Kr de 0.74, ce genre de houle garde une grande partie au large.
- Les houles du secteur 280°N sont plus réfractées à -10m avec un de Kr 0.5, ces houles perdent la moitié de leur énergie au large mais garde une forte amplitude aux abords du rivage par rapport aux autres.
- Les houles du secteur 360°N sont aussi peu réfractées à -10m leur coefficient Kr en moyenne est de 0.64.

Ainsi nous pourrions dire que les houles de -10m de profondeur ne perdent que peu de leur énergie.

Si nous observons les valeurs étudiées à la profondeur -5m, nous remarquons que les houles perdent presque 60% de leur énergie initiales. A -1m elles diminuent encore plus et perdent 85% tout en s'approchant de la cote.

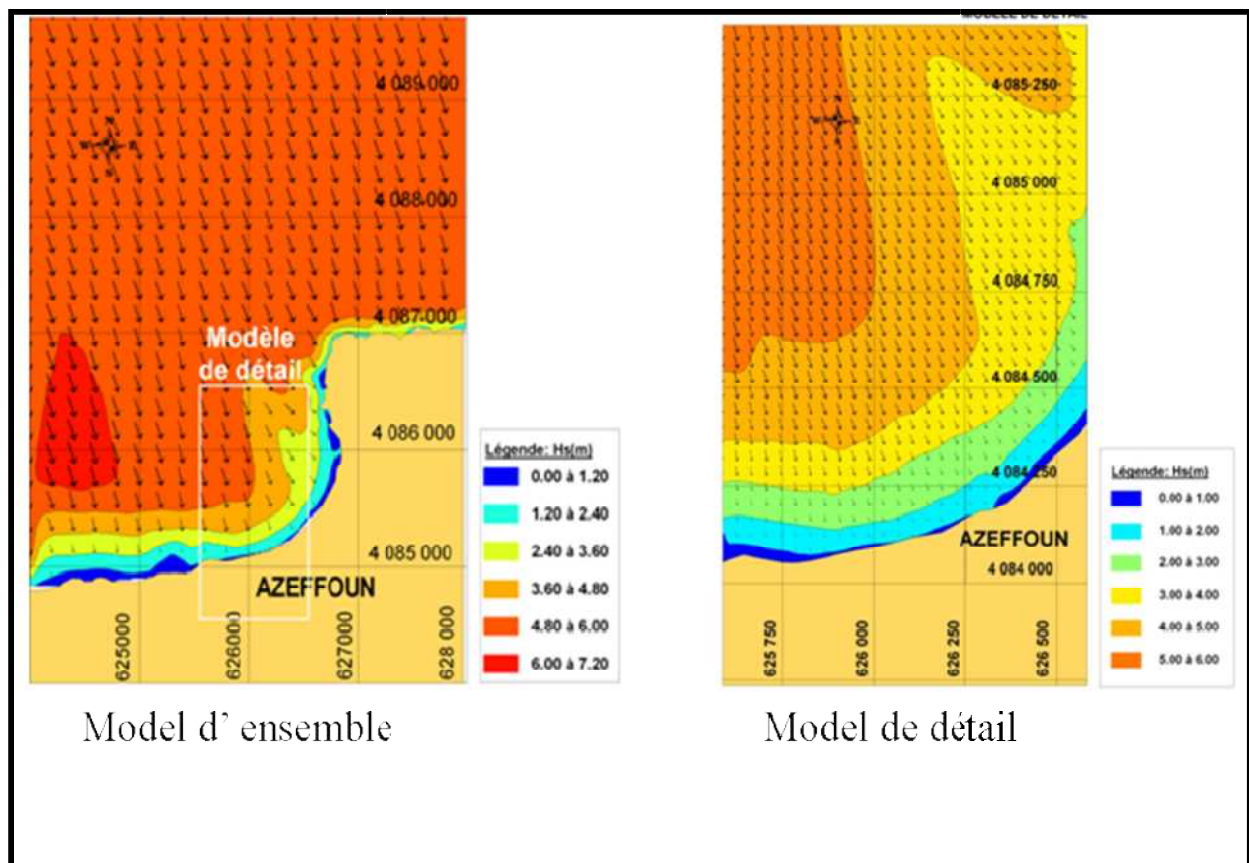


Fig.29 : Réfraction de la houle au large d'Azeffoun de secteur 340°N

Sur cette figure présentant les résultats de l'étude de la réfraction pour une houle de secteur 340°N et de période de retour de cinquante ans, la propagation se ferait de façon frontale, les orthogonales ne pivotent que légèrement à l'approche du rivage notamment à l'Est de la zone d'étude.

Les houles de 340° N atteignent notre zone frontalement, c'est cette houle qui va être utilisée dans le dimensionnement.

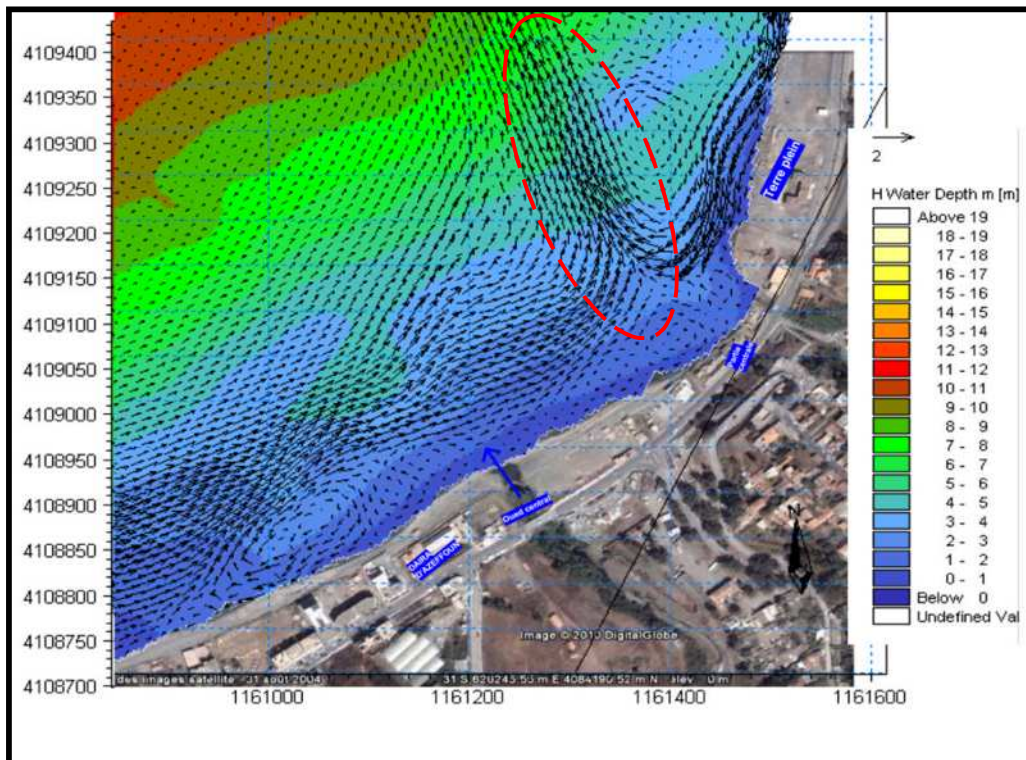
Ces houles frontales de secteur 340°N sont à l'origine de la génération d'un courant retour qui est responsable du transport sédimentaire dans le profil.

### **III-5 Etude courantologique :**

Dans la zone littorale, des quantités importantes de sable sont transportées sous l'action de la houle et des courants. Quand les vagues atteignent la côte et déferlent sur la plage, elles génèrent des courants côtiers qui interagissent avec les vagues incidentes pour transporter les sédiments (Masselink *et al.*, 2006 in Mihoubi *et al.*, 2012) et selon Dehouck (2006), les courants induits par les vagues sont les principaux agents du transport sédimentaire en zone intertidale.

Les sédiments sont remis en mouvement et transportés par les courants induits par la dissipation de l'énergie des vagues lors de déferlement.

Cette étude a pour objective de démontrer le courant qui est responsable de déplacement des sédiments vers large via une modélisation numérique par le logiciel MIKE21. Cette dernière a été effectuée au niveau de LEM.



**Fig.30** : Courant de retour obtenu à l'aide de logiciel MIKE 21

### Commentaire

La modélisation numérique nous a permis de mettre en évidence le facteur hydrodynamique qui est à l'origine de l'érosion de la plage d'Azeffoun, il est clair que ce courant de retour constitue la force motrice de déplacement des sédiments dans le profil côte-large, qui provoque l'érosion de la plage d'Azeffoun (fig.30)

# **Chapitre IV**

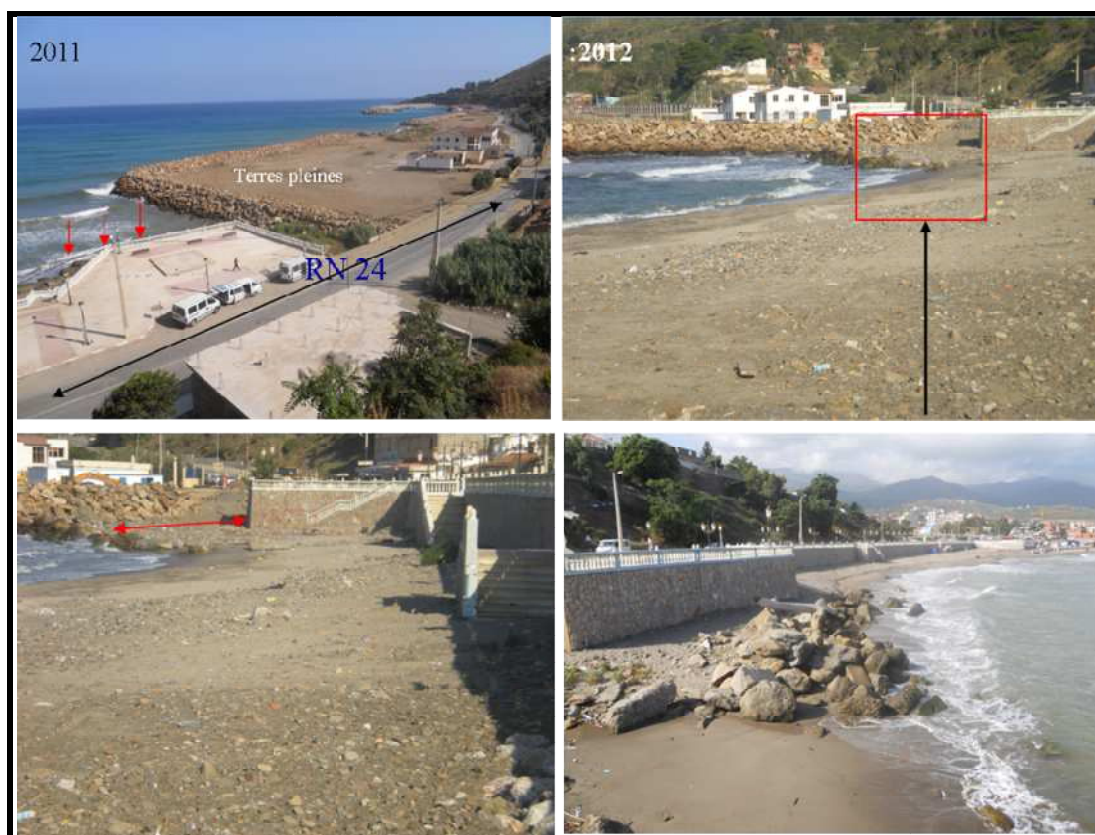
## **Travaux de protection et d'aménagement**

#### IV-1 Situation et problème :

Le littoral urbain d'Azeffoun correspond à la bordure maritime dont la plage centre constitue l'une des plus belles plages de la commune d'Azeffoun. Contribuant largement à l'attractivité touristique de cette dernière, son impact sur l'économie locale est important.

Au cours de ces dernières dizaines d'années, ce littoral a été perturbé par différents phénomènes naturels mais ou anthropiques (l'expansion des terres plaines du port d'Azeffoun), cette plage est devenue le siège d'une érosion importante qui a entraîné un recul moyen du trait de côte d'une vingtaine de mètres au cours des trente dernières années.

Ce phénomène a entraîné la disparition de la plage et a mis en péril la stabilité de la route nationale RN°24 et toute l'activité économique qui en découle.



**Fig.31** : Enjeux à protéger : la plage et la RN 24

Ces espaces présentent donc des enjeux patrimoniaux, des enjeux liés à la protection des biens (économiques, sociaux,...). Compte-tenu de ces enjeux, les acteurs de ces espaces représentés par la **Subdivision des Travaux Maritimes d'Azeffoun de la Direction des Travaux Publics** de la wilaya de **Tizi-Ouzou** ont prévu des aménagements littoraux pour lutter contre l'érosion, en fonction de leurs moyens financiers disponibles.

Le choix de la variante du projet d'aménagement s'est orienté vers une association de techniques innovantes dites "douces", **Brise lame immergé en géosynthétique «Géotube»** et **rechargement de la plage**, utilisée pour la première fois en Algérie en mer ce qui offre la

meilleure solution du point de vue économique, environnementale, touristique et par rapport à stabilité.

Dans ce chapitre nous définiront le type de géotextile utilisé et de donner les dimensions de l'ouvrage à mettre en place pour parer à ce problème d'érosion ainsi que la méthodologie de sa mise en œuvre.

#### **IV-2 Objectifs de l'aménagement :**

Cet aménagement a pour but de protéger la plage centre contre les agressions de la houle frontale, de la reconstituer comme elle été en **1980**, d'éviter la réflexion des vagues sur le mur de haut de plage en atténuant leurs énergies par la mise en place des atténuateurs en géotextiles, d'améliorer la qualité visuelle et urbanistique du front de mer, et d'assurer la protection de la route **RN 24** sans avoir d'incidences négatives sur l'équilibre sédimentaire des plages avoisinantes.

#### **IV-3 La solution proposée (brises lames immergés en Géotube) :**

##### **IV-3-1 Généralités :**

###### **A. Introduction :**

L'histoire du géotube a commencé suite a une catastrophe naturelle qui a provoqué une chute de digue et la perte de nombreuse vie humaines en hollande dans les années 50.

Pour éviter que ce désastre ne se répète, les ingénieurs hollandais en hydraulique pensèrent alors à de nouvelles méthodes et des matériaux nouveaux pour construire des futures structures de défenses côtières.

Les systèmes géotextile sont pour la plupart du temps de meilleurs marchés alternatifs pour des matériaux/systèmes plus traditionnels. Ces nouveaux systèmes ont été appliqués avec succès dans de nombreux pays et ils méritent d'être appliqués à plus grande échelle

Ten Cate répondit en développant la première génération de géotextile tissé de filtration pour faire du renforcement et pour lutter contre l'érosion dans les structures de protections côtières.

###### **B. Définition :**

Les géotextiles sont des matériaux perméables qui se présentent sous forme de nappe, habituellement fabriqués avec des matériaux à base de polymères synthétiques. Ils sont utilisés en génie hydraulique et associés à des matériaux granulaires, comme partie intégrante des ouvrages hydraulique. Les géotextiles ont une famille de matériaux en forme de nappes appelés géosynthétiques. Des fonctions de bases sont à prendre en considération: La séparation, la filtration, transmission, le renforcement et la protection.

### IV-3-2 Les types de géotextiles :

#### A. Les géotextiles non tissés :

Ce sont des structures textiles obtenues par aiguilletage, ils sont classés selon les types de fibres et la méthode de liage utilisés :



Fig 32 : Géotextiles de types non tissé , S61et F80

#### B. Les géotextiles tissés :

Ce sont des structures plates composées d'au moins deux faisceaux de fils tirées à angle droit, ils peuvent être classés selon le type de fils et la finesse du tissage :

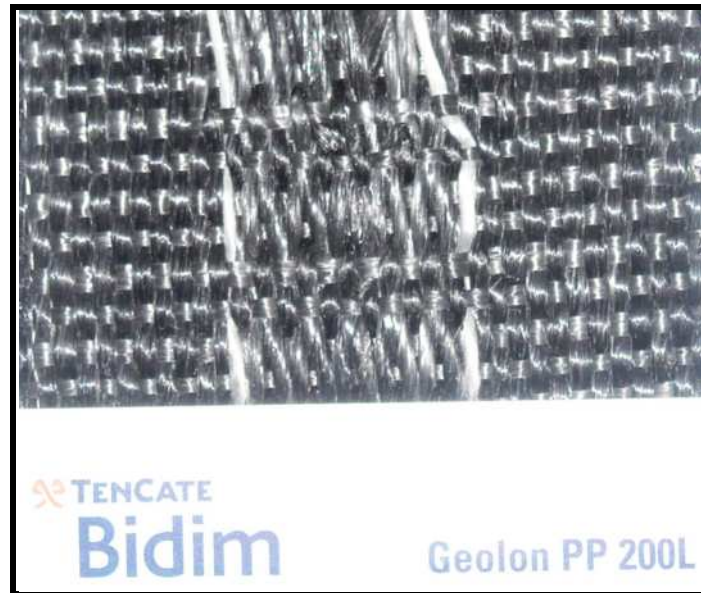


Fig.35 : Géotextile de type tissé

#### IV-3-3 Les caractéristiques et propriétés les plus importantes:

- A. **Perméabilité** : en règle générale chaque couche d'un système de filtre doit être plus perméable que celle sur laquelle elle repose. Il est important que le géotextile maintienne ou dépasse son indice de perméabilité lorsqu'il subit une charge, c'est-à-dire que le déplacement des particules fines ne doit pas réduire la perméabilité.
- B. **Filtration** : la taille caractéristique des ouvertures du géotextile doit être inférieure à la granulométrie moyenne du sol à filtrer afin d'éviter toute perte de matériaux à travers le géotextile. Les règles précisent que pour un géotextile classique, la taille d'ouverture  $Q_{90}$  du géotextile doit être inférieure au diamètre de la médiane du tamis  $D_{50}$ , du sol à filtrer.
- C. **Déformation** : le géotextile doit présenter une grande capacité de déformation pour pouvoir s'adapter à la forme des blocs ou de roches sans rompre ni perdre ses propriétés hydraulique.
- D. **Résistance au poinçonnement** : Il doit être capable de résister à des charges qui entraîneront un poinçonnement pendant la mise en place et en service. L'action de la houle ou le tassement différentiel de sous sol peuvent accroître les déformations localisées du textile.
- E. **Épaisseur** : elle doit amortir les charges de pénétration des pointes de blocs et assurer une voie de drainage latéral lorsqu'il y a obstruction par un bloc.
- F. **Durabilité** : en plus de l'effet l'oxydation et d'hydrolyse qui font diminuer la résistance globale et la résistance au poinçonnement, la durabilité peut être influencée par la température, les rayons UV et la pollution de l'eau de l'air et du sol.

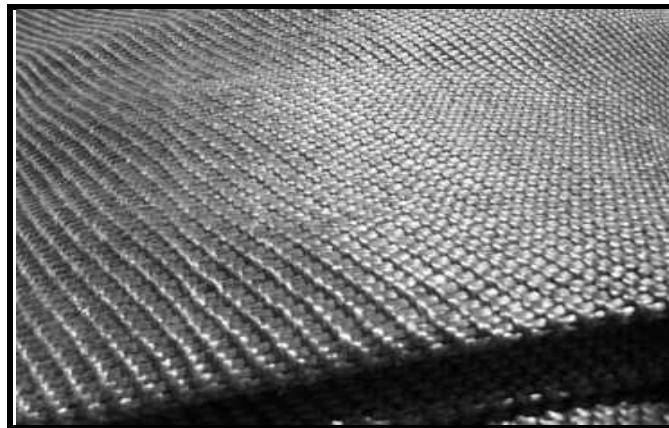
#### IV-3-4 Géotextiles utilisés et leurs caractéristiques :

##### A. Géotextile pour les boudins (Géotubes) GT1000M:

Le géotextile, constituant les boudins est un géotextile tissé de type polypropylène avec additif longue vie en milieu marin, matériau robuste et inerte par rapport aux principaux produits chimiques, il répond aux caractéristiques minimales recommandées par [TenCate](#) qui sont les suivantes :

**Tab.07:** Caractéristiques minimales recommandées pour le géotextile des géotubes ([STMA, 2010](#)) :

Critère	Valeur à satisfaire
Résistance à la traction selon ISO 10 319 en sens production	$\geq 198$ kN/m
Résistance à la traction selon ISO 10 319 en sens travers	$\geq 189$ kN/m
Allongement à la rupture selon ISO 10 319 en sens production	$\leq 15$ %
Allongement à la rupture selon ISO 10 319 en sens travers	$\leq 11$ %
Resistance a la rupture des coutures selon ISO 10321	$\geq 160$ kN/m
Résistance au poinçonnement statique CBR selon ISO 12236	$\geq 20$ Kn
Perforation dynamique selon iso 13433	$\leq 6$ mm
Resistance à la thermo- oxydation selon EN 5132	CLASS B
Résistance à la rupture des coutures réalisées en usine selon ISO 10321	$\geq 85$ kN/m
Perméabilité normale au plan ( $\Delta h = 50$ mm) selon iso 11058	$\geq 1200$ l/m <sup>2</sup> s
Resistance aux UV selon ISO 12224 ET ISO 12226	$\geq 80$ %



**Fig.34 :** Géotextile système GT1000M

##### B. Filtre S61 pour doublage :

L'ouverture de filtration selon ISO 12956 est adaptée à la granulométrie des sables exigés pour le remplissage provenant des zones d'emprunts dans le cas de valorisation de matériaux

de nature fine, il a été recommandé de doubler le géotextile du boudin avec un filtre en géotextile non tissé.

Ce filtre présente les caractéristiques suivantes :

- une ouverture de filtration caractéristique selon ISO 12959 :  $O_{90,W} \leq 95 \mu\text{m}$ , qui satisfait le critère ci-avant,
- une résistance au poinçonnement statique selon NF G 38019 :  $\geq 1.1 \text{ kN}$ ,
- Masse surfacique selon NF EN 965  $\geq 250 \text{ g/m}^2$
- Résistance à la traction selon ISO 10 319 en sens travers  $\geq 20 \text{ kN/N}$
- Résistance à la traction selon ISO 10 319 en sens production  $\geq 20 \text{ /N}$
- Perméabilité normale au plan selon NF ISO 11058  $\geq 0.07 \text{ m/s}$

Ce filtre est liaisonné au géotextile du boudin par coutures tous les 50 cm.

### C. Géotextile pour le tapis anti-affouillement Geolon PP80L :

Ce tapis assure la protection de la base du tube. La largeur du tapis dépend de la taille du tube utilisé. Le tapis est mis en œuvre avant la pose de la structure géotube et les petits tubes d'ancrage sont remplis hydrauliquement pour créer une charge en pieds. Le géotube peut être rempli hydrauliquement à terre ou dans l'eau. La structure pré fabriquée sera déroulée sur site et ancrée à sa position finale. Des points d'attache sont cousus au tube en usine pour permettre la fixation avant de le remplir.

**Tab 08:** Caractéristiques minimales recommandées pour le géotextile du tapis anti affouillement (STMA, 2010) :

Critère	Valeur à satisfaire
Résistance à la traction selon ISO 10 319 en sens travers	$\geq 80 \text{ kN/m}$
Résistance à la traction selon ISO 10 319 en sens production	$\geq 80 \text{ kN/m}$
Déformation à l'effort de traction maximale ISO 10 319 sens travers	$\leq 11 \%$
Déformation à l'effort de traction maximale ISO 10 319 sens production	$\leq 11 \%$
Résistance au poinçonnement statique CBR selon iso 12236	$\geq 10 \text{ kN}$
Perforation dynamique selon ISO 13433	$\leq 8 \text{ mm}$
Ouverture de filtration caractéristique selon ISO 12956	$O_{90,W} \leq 250 \text{ microns}$
Perméabilité normale au plan ( $\Delta h = 50\text{mm}$ ) selon iso 11058	$\geq 15 \text{ mm/s}$

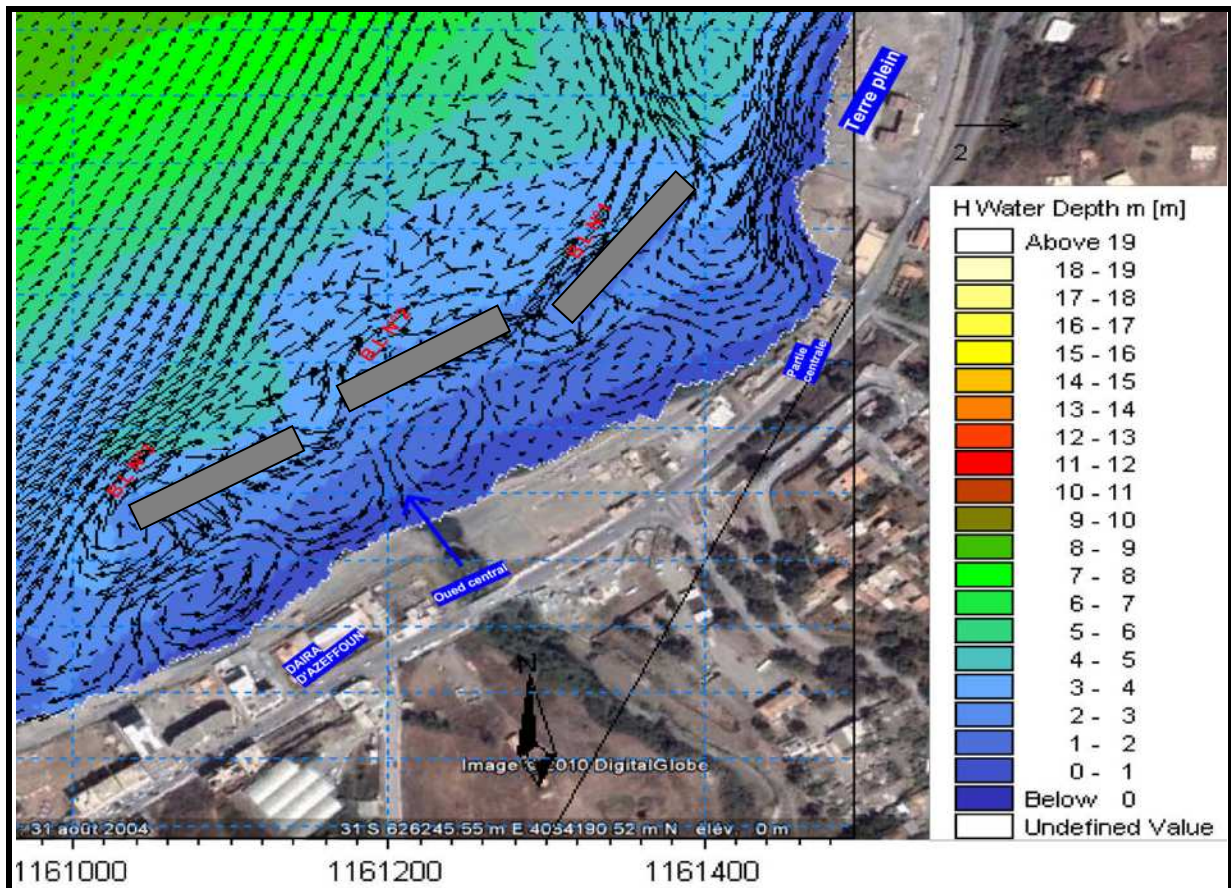


**Fig.35 :** Géotextile pour le tapis anti affouillement de type PP80L

#### **IV-3-5 L'emplacement et dimensionnement de l'ouvrage de protection :**

Il n'existe pas actuellement des règles bien définies pour fixer les caractéristiques optimales des brises lame (profondeur d'implantation, longueur et espacement). Celles-ci dépendent de la houle (hauteur, période, longueur d'onde) et de la pente de l'ouvrage.

L'étude sur modèle numérique nous a permis d'arrêter les dimensions de l'ouvrage de protection afin d'intercepter le courant de retour qui affecte la plage, des brises lames en géotube immergées (figure n°38). Ces derniers ont fait l'objet d'une validation en canal à houles afin de les affiner et d'en optimiser le prédimensionnement.



**Fig.36** : Modélisation de courant retour avec les brises lames immergées

La profondeur d'implantation, la longueur des boudins pour chaque tronçon et l'espacement entre les tronçons des brises lames ont été déterminés à partir des résultats de la modélisation numérique effectués par un logiciel approprié MIKE21 et que nous avons vérifié par les formules de LCHF et de CERC pour le bon fonctionnement des brises lames, qui sont présentés ci-après :

#### **A. Profondeur d'implantation «d»:**

Le brise lame doit être situé approximativement au début de la zone de déferlement. (CIRIA et CUR, 1991) la houle déferle lorsque le rapport entre ses hauteurs et la profondeur atteint  $H/d = 0,78$ . (Miche 1944 in Duval) dans notre cas, la zone de déferlement débute à des profondeurs de 3 m.

$$H_s = 2.8 \text{ m} \quad \text{et} \quad d = 3 \text{ m} \quad H_s/d = 0.73$$

Donc la profondeur d'implantation **d=3m**

#### **B. La distance «lc»:**

Pour qu'un brise lame fonctionne bien, la distance à la côte doit être prise égale en moyenne à la moitié de la longueur d'onde de la houle au large (LCHF), Sachant que  $T=12\text{s}$

$$L_0 = 1.56T^2 \quad L_0=225\text{m.}$$

La distance à la côte en moyenne **lc=115m**

### C. L'espacement «E» :

Compte tenu de la présence des embouchures des Oueds et de la présence du port, l'espacement est nécessaire entre les extrémités des brises lames. La batterie sera constituée par des tronçons présentés dans la figure 40.

Le **CERC** recommande un espacement égal à deux fois la longueur d'onde de la houle à la profondeur d'implantation ( $2L$ ), à l'isobathe de -3 m,  $L=25.1\text{m}$  obtenu à partir de l'étude de la réfraction. Les espacements entre les tronçons sont donnés comme suivant :

- Espacement de **11 m** entre l'extrémité Est du brise lame du tronçon 1 et la limite des terres pleins.
- Espacement de **50 m** entre les extrémités du brise lame du tronçon 1 et le brise lame du tronçon N°2.
- Espacement de **51.5 m** entre les extrémités du brise lame du tronçon 2 et le brise lame du tronçon N°3.

### D. La longueur «l» :

Afin de protéger toute la partie centrale de la plage d'Azeffoun qui atteindra 500m de longueur, et en prenant en compte la totalité des espacements entre les tronçons, la somme des longueurs des atténuateurs à mettre en place est de 340m. À partir des résultats de la modélisation numérique, les brises lames sont réparties en trois tronçons comme suit :

- 1<sup>er</sup> tronçon 120m.
- 2<sup>ème</sup> tronçon 100m.
- 3<sup>ème</sup> tronçon 120m.



Fig. 37 : Répartition des boudins par tronçons

**E. La largeur berme B :**

Pour dimensionner la largeur de la berme (B) il faut tout d'abord tenir compte de la dissipation de l'énergie souhaitée. Autrement dit, la transmission des vagues  $C_t$ . Pour cela on a opté pour la formule des ouvrages lisses à crête abaissée proposée par (Briganti *et al*, 2004) qui ont calibré la relation élaborée par d'Angremond *et al*, 1997).

La relation utilisé est celle relative aux ouvrages étroits :  $B/H_i < 10$

$$C_t = -0.4 \frac{R_c}{H_s} + 0.64 \left( \frac{B}{H_s} \right)^{-0.31} \left( 1 - \exp(-0.5 \xi_p) \right) \dots\dots\dots(7)$$

- $C_t$  : coefficient de transmission
- $R_c$  : côte d'arase
- B : largeur de la berme
- $H_s$  : hauteur significative (houle de projet)  $H_s=2.2$
- $\xi_p$  : le paramètre de déferlement.

$$\xi = \tan \alpha / \sqrt{s_o} \dots\dots\dots(8)$$

$S_o$  : cambrure

$$s_o = H / L_o = \frac{2\pi}{g} \frac{H}{T^2} \quad \dots\dots\dots(9)$$

$L_o$  : longueur d'onde au large

On a  $H_s=2.2\text{m}$  et  $T=12\text{s}$

$$S_o=9.78*10^{-3} \text{ m/s}$$

P:Tang  $\alpha =1/2$

$$\zeta= 5.05$$

C'est un **déferlement gonflant**.

Notre objectif est d'avoir un coefficient de transmission  $C_t=0.5$  ainsi que  $R_c = 1\text{m}$ , cela pour une meilleure protection des géotextiles contre les ultraviolets des rayons solaires.

$$\mathbf{B=16.82\text{m}}$$

#### **F. La stabilité des géotubes :**

Après remplissage, la structure du tube n'atteint pas la même hauteur que son diamètre théorique, mais peut atteindre un maximum de 60 à 70% de son diamètre, selon la mise en œuvre et les techniques de remplissage.

Pour notre cas on prend un diamètre théorique de 3.25m

Le diamètre qu'on peut atteindre est entre  $1.95 \text{ m} < D < 2.275 \text{ m}$

On prend  $D = 2 \text{ m}$

On va utiliser la formule suivante (Pilarczyk, 2000)

$$\frac{H_s}{\Delta D} < 1 \quad \dots\dots\dots(10)$$

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

D: épaisseur du géotube

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

$\gamma_s$ : masse volumique du sable utilisé pour remplir le géotube ;  $\gamma_s = 2.634\text{t/m}^3$

La profondeur d'implantation est de 3 m, elle correspond à une hauteur de houle de dimensionnement de  $H_s = 2.2 \text{ m}$ , et pour une  $\Delta=1.58$

$$\mathbf{H_s/\Delta D=0.69}$$

Les dimensions de l'ouvrage vérifient les conditions de stabilité élaborées par Pilarczyk. Afin d'optimiser ces dimensions, la variante est passée sur le modèle réduit, plus précisément en canal à houle



**Fig.38** : Essais en modèle réduit : canal à houle

#### **G. Le nombre de géotube :**

Pour déterminer le nombre de géotube à mettre en place ainsi que leurs caractéristiques géométriques, nous avons utilisé le tableau élaboré la société Néerlandaise leader mondiale des géosynthétique [TenCate](#).

**Tab.08** : Dimensions d'un boudin à un remplissage de 70 % (source [TenCate](#), 2010)

<b>Diamètre D (m)</b>	<b>Circonférence C (m)</b>	<b>Hauteur h (m)</b>	<b>volume V m<sup>3</sup>/ml</b>	<b>largeur max W (m)</b>	<b>largeur base W<sub>b</sub> (m)</b>
1,60	5,0	1	1.7	2	1.7
2.5	7.9	1.5	4.1	3.2	2.7
<b>3.25</b>	<b>10.2</b>	<b>2</b>	<b>6.9</b>	<b>4.2</b>	<b>3.5</b>
4	12.6	2.4	10.4	5.1	4.3
5	15.7	3	16.3	6.4	5.4

Afin de respecter les caractéristiques géométriques des géotubes sur des fonds de -3 m, il est nécessaire de prévoir des boudins faisant une hauteur de 2 m une fois posés et remplis sur les

fonds, d'accoler 04 boudins dans le sens de la largeur afin d'obtenir une largeur de 16.80 m au minimum.

Les deux tronçons de 120m de longueur sont composés de trois boudins 40m de longueur et le tronçon de 100m est constitué de deux boudins de 50m de longueur.

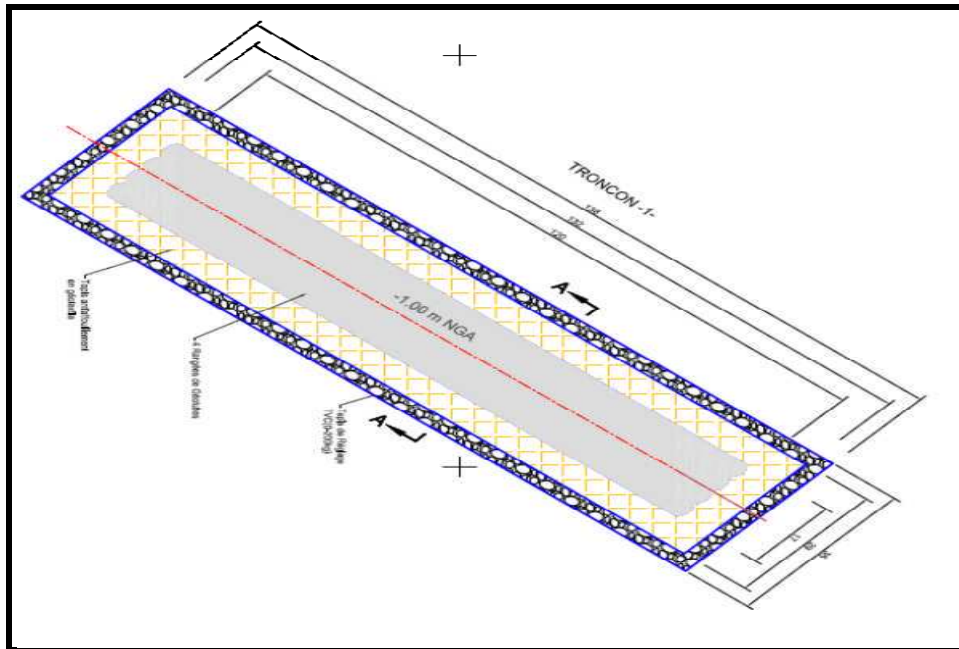
**Tab.10** : Nombre de boudin à mettre en place

	<b>Nombre de boudins de 40 m par tronçon</b>	<b>Nombre de boudin de 50 m par tronçon</b>	<b>Linéaire de tronçon (m)</b>	<b>Nombre total de boudin de 40 m</b>	<b>Nombre total de boudin de 50 m</b>	<b>Volume Totale de sable à installer (m<sup>3</sup>)</b>
<b>Tronçon 1</b>	3	0	120	12	0	3312
<b>Tronçon 2</b>	0	2	100	0	8	2760
<b>Tronçon 3</b>	3	0	120	12	0	3312
<b>Total</b>	<b>6</b>	<b>2</b>	<b>340</b>	<b>24</b>	<b>8</b>	<b>9384</b>

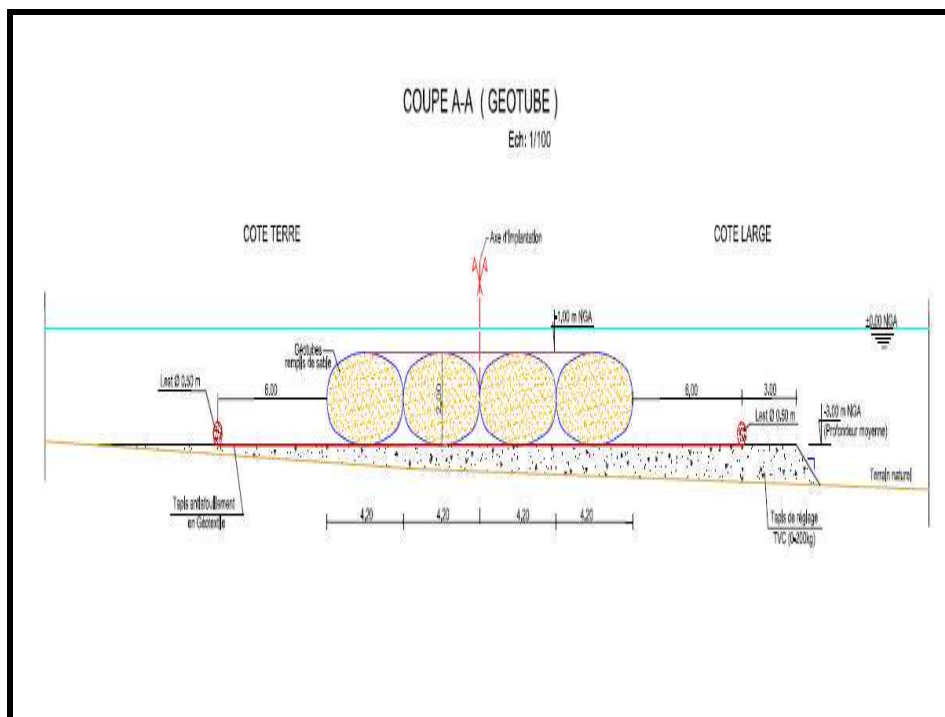
Ces boudins seront disposés sur un tapis anti-affouillement en géotextile de type PP80L, de 28.80m de largeur, afin d'assurer la stabilité de l'ouvrage et d'éviter les phénomènes d'affouillement sous les tubes, le tapis devra disposer d'un système de lest de part et d'autre, permettant d'éviter les risques de retournement ou de torsion.

Ce système de lestage sera composé de boudins de lestage de diamètre 0,50 m, disposés de chaque côté du tapis et remplis de sable, tel que présenté sur le plan de la figure 42.

Il est nécessaire de procéder à un reprofilage des fonds préalablement à la pose, pour assurer une profondeur régulière et identique tout le long du tracé par la mise en place d'un tapis de réglage ou par réglage des souilles.



**Fig.39** : Plan du tronçon du boudin (STMA,2010)



**Fig.40** : Coupe A-A de brise lame en géotube (STMA,2010)

- 1- une côte d'arase de -1 m ;
- 2- une largeur totale est de 16.8m (4x 4.2 m de largeur) pour quatre tubes posés côte à côte dont le diamètre de chacun est de 3.20 m afin d'assurer une hauteur de 2m;
- 3- un tapis anti- affoulement d'une largeur de 29 m sur une longueur de 132m, muni d'un petit lest sur leurs extrémités sous la forme d'un petit tube de 50 cm de diamètre, en vue d'assurer la pérennité du sol support.
- 4- Tapis de réglage en TVC de (0-200kg) sur lequel se pose le tapis anti affoulement

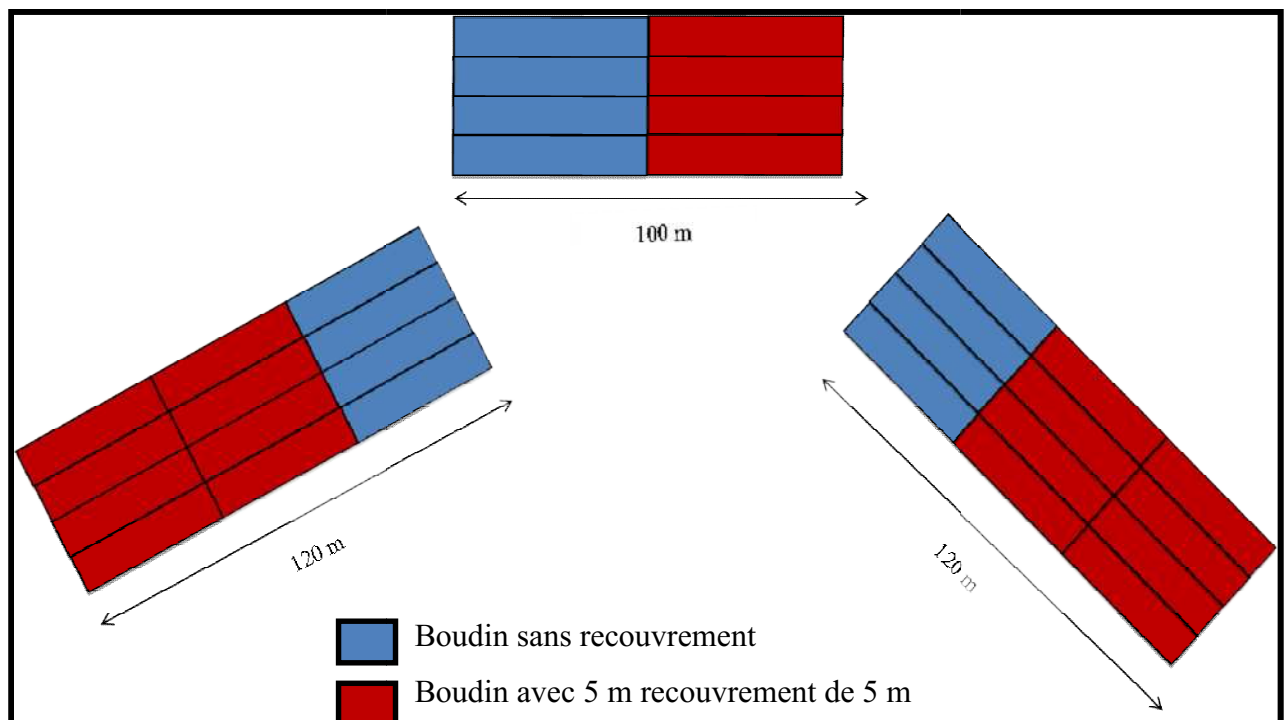
### IV-3-6 La technique de mise en oeuvre :

#### A. Introduction :

Afin d'assurer la stabilité de l'ouvrage, la société Ten Cate a préconisé une méthode d'exécution spécifique par la mise en place des géotubes avec et sans recouvrement entre les trois boudins d'un géotube longitudinalement, c'est-à-dire chaque boudin repose sur l'autre, pour une meilleur attache ainsi pour être plus solide face à la force attractive de la houle. Cela sera détaillé dans cette partie. (fig.44).

Pour poser les géotubes avec la méthode conseillée, les boudins sont fabriqués avec des dimensions nouvelles pour assurer le chevauchement entre eux.


Les nouvelles dimensions des boudins géotube **system GT1000M**, sont :




**Fig.41** : Technique de mise en œuvre


Les dimensions des boudins des géotubes **system GT1000M**, de diamètre 3.25 m :

- Les dimensions des boudins des géotubes des tronçons de 120m de longueur :

 Huit unités de longueur 40.4 m plus option pour doublage intérieur en géotextile de séparation type S61.

 Seize unités de longueur 45.5 m plus option pour doublage intérieur en géotextile de séparation type S61

- Les dimensions des boudins de géotubes de tronçon de 100m de longueur

 Quatre unités de longueur 50.6 m plus option pour doublage intérieur géotextile de séparation type S61.

■ Quatre unités de longueur 55.7 m plus option pour doublage intérieur en Géotextile de séparation type S61.

**Tab.11** : Nombre d'unités de system GT1000M avec les nouvelles dimensions

Désignation	Nombre de Géotubes	Longueur Total
<b>Avec recouvrement de 5m</b>	16 Unités 45.5 m = 729.6 m 4 Unités 55.7m = 222.8m	<b>952.4m</b>
<b>Sans recouvrement</b>	08 Unités * 40.4m = 323.2m m 04 Unités * 50.6 m = 202.4	<b>526.6m</b>

### B. Les matériaux de confinement :

Les matériaux de confinement des géotubes proviennent de la carrière : Ets Moussaoui Oued Taiba Beni kesila Bejaia. Les caractéristiques granulométriques obtenues à partir des essais effectués par le Laboratoire des travaux Publics de l'Est Annaba sont conformes aux normes indiquées pour le remplissage des géotubes

**Tab.12** : Résultats des essais granulométriques

Désignation des essais	Résultats	Spécifications
L'équivalent du sable	78.61	>65
Masse volumique Absolue $\text{gr}/\text{cm}^3$	2.634	
Masse volumique apparente $\text{gr}/\text{cm}^3$	1.396	



**Fig. 42** : Stock de sable

### C. La pose et le remplissage des géotubes :

#### • Mise en place du tapis anti-affouillement :

La première opération consiste à mettre en place le tapis anti-affouillement. Il est déposé sur un ponton, et plié en forme d'accordéon. Le tapis étant muni de points de fixations tous les 50 cm sur l'ensemble de sa surface, il est possible de fixer régulièrement des petits lests avant la mise en place sur le ponton, qui facilite la pose du tapis. Dans le cas présent, les tapis, livrés en rouleau, seront directement déroulés puis lestés sous l'eau sur la zone d'implantation, puis immédiatement fixés provisoirement aux piquets.

Une fois le tapis en place, les petits boudins de lestage de part et d'autre du tapis sont remplis par injection de sable. Ce lestage a pour but de compléter la stabilité des tapis et ultérieurement d'assurer la protection contre l'érosion du sol support sur lequel reposent les tubes.

#### • Le remplissage des géotubes :

Le géotube est maintenu en place ligaturé à des piquets ou à un bâti de béton conçu pour ça (voir figure 44)

Chaque géotube est rempli en continu. Pour remplir un élément de 170 m<sup>3</sup> environ avec une pompe de 300 m<sup>3</sup>/h (minimum) envoyant une mixture comprenant 15% de sable, il faut compter 4 heures environ pour le remplissage. (Ten Cate)

La mise en œuvre dépend pour beaucoup de l'origine du sable. Il sera aspiré à proximité et injecté directement dans le géotube, les matériaux de confinement qui proviennent d'une carrière seront déposés dans un bassin et propulsés par un débit d'eau important avec une installation à terre ou sur barge.

### D. Mise en place et positionnement des brise-lames :

Afin de positionner précisément les brises lames selon les implantations définies et pour faciliter la pose des tapis anti-affouillement, des tubes et des balises en bétons ont été conçues (fig. 43). La pose de ces dernières se fera grâce au positionnement de GPS.



**Fig.43** : Balises de positionnement



**Fig. 44** : Phases d'exécution des travaux

Le sable se trouvant sur les terres pleines sera transporté par des camions pour arriver au bassin où il y aura 15% de sable et 85% d'eau qui seront pompés par une pompe hydraulique vers les géotubes à travers des cheminées via des conduites flottantes. Le remplissage des boudins des géotubes se fera par compartiment.

Il est nécessaire d'avoir une équipe de plongeurs pour gérer le remplissage.

# **Conclusion générale**

## CONCLUSION :

L'étude de protection du littoral d'Azeffoun par les atténuateurs en géosynthétique nous a permis de comprendre la dynamique sédimentaire et les mouvements du courant dans ce secteur en constatant que l'érosion côtière dans la zone résulte en effet de l'addition de plusieurs facteurs naturelles et anthropique à savoir les aménagements portuaires, les constructions sur le cordon dunaire ainsi que la force des vents.

A l'issue de ce travail, nous avons pu effectuer tout d'abord les travaux d'application au niveau du LEM (application du logiciel MIKE 21, surfer et du GSTA) sur le terrain (constat de l'avancement des travaux) et les travaux de recherche à l'ENSSMAL (recherche bibliographique). Nous avons englobé 5 volets tous importants les uns que les autres à savoir : La bathymétrie, la granulométrie, le transport sédimentaire GSTA, la réfraction de la houle et la proposition de solution douce contre l'érosion avec du géosynthétique; il en ressort les points suivants :

- L'étude bathymétrique révèle que le fond marin de notre zone d'étude se caractérise par un relief homogène. Les profils présentent une morphologie particulière caractérisée par des pentes raides près de la côte. Ces derniers illustrent la morphologie sous marine des fonds qui est affectée par le phénomène d'érosion.

- Sur le plan sédimentaire :

- Les pélites ont une teneur faible conforme au schéma classique généralement admis, à savoir une augmentation graduelle des teneurs en pélites de la côte vers le large.

- La médiane montre que sa moyenne est de 280  $\mu\text{m}$ , ceci prouve donc que la constitution du sédiment est majoritairement du sable moyen. La répartition spatiale de ce paramètre obéit au schéma classique de la répartition des sédiments en mer par une décroissance de la taille des particules de la côte vers le large.

- L'indice de tri  $S_o$  montre que la majorité des valeurs sont inférieures à 1.5, les sédiments sont donc très bien triés selon la classification de Folk et Ward 1957.

-L'indice de classement Sk montre que les valeurs de cet indice sont pour la plus part voisins du 1. Les sédiments présentent un même classement aussi bien du côté fin que du côté grossier donc une répartition symétrique très positive correspond à un bon classement de Folk et Ward 1957.

L'analyse granulométrique révèle une constitution de sable en majorité fin et moyen ( $150 < D_{50} < 500\mu\text{m}$ ) et des teneurs de pélites très faible (3-10%), ceci indique la présence d'une énergie importante mettant en perpétuel remaniement les sédiments présents dans le site.

- Les résultats obtenus de la modélisation du transport sédimentaire par le model GSTA « Grain Size Trend Analysis» lors de cette étude mettent en évidence la dynamique sédimentaire active dans le sens de la côte vers le large et la forte interaction des agents hydrodynamiques et les grains des sédiments. L'application de model de GSTA dans la plage d'Azeffoun a donné des résultats approuvables, qui concordent avec les résultats obtenus au cours de l'étude qui suit celle de la réfraction de la houle.

L'impact de l'implantation humaine sur le littoral a profondément changé la morphologie côtière. En effet la construction du port lui même à conduit à l'érosion de notre zone d'étude.

## **Recommandations :**

- La stabilité de l'ouvrage a été vérifiée par la formule établie en 2000 par Pilarczyk alors que cette dernière ne prend pas en considération tous les paramètres hydrodynamique ou il n'intègre pas l'ampleur des courants.
- Afin de mieux comprendre les mouvements des courants de retour obtenus à partir de la modélisation numérique de notre zone d'étude nous recommandons de mettre en place un appareil de mesure (courantomètre).
- L'étude sur model réduit a été effectuée sur le canal à houle non sur le bassin houle, autrement cette étude a été consacré seulement à la vérification de la stabilité de l'ouvrage de protection.
- La réalisation de ce projet a subit un retard considérable du aux imprévu d'intempéries tout au long de l'année. Ce qui a fortement freiné l'avancement des travaux.
- Selon Décret exécutif n° 2007-145 du 2 Joumada El Oula 1428 correspondant au 19 mai 2007 déterminant le champ d'application, le contenu et les modalités d'approbation des études et des notices d'impact sur l'environnement, p. 105. notre projet n'est pas soumis à une étude d'impacte sur l'environnement.

# **Bibliographie**

**Akouango, É., Certain, R. et Barusseau, J.P. 2000.** Mobilité sédimentaire: définition par simulation des populations granulométriques mobiles sur l'avant-côte. *6ème Journées Nationales Génie Civil- Génie Côtier*. Caen, France : s.n., 2000.

**Assassi, C. et Otmani, H. 2010.** Etude de protection de la zone de Club des pins . *mémoire d'ingénieur* . s.l. : Ecole Nationale Supérieure des Sciences de la Mer et de l'Aménagement du Littoral, 2010.

**Bagnouls, F. et Gaussen, H. 1953.** les climats et leurs classification. *Annuel géographique*. 1953. pp. 193-220.

**Bertier, J. 2009.** Analyse multi-échelles de la morphodynamique d'une plage artificielle, avant-port Ouest de Dunkerque (Nord de la France). *Thèse de Doctorat*. s.l. : Université du Littoral Côte d'Opale, Dunkerque, 2009. p. 303 .

**Bezuijen, A., & al. 2009.** Placing accuracy and stability of geocontainers. s.l. : Dutch Ministry of Transport and Public Works et Delft Hydraulics, 2009.

**Brière, C. et Abadie, S. 2004.** Analyse des courants induits par la houle au voisinage de l'embouchure de l'Adour à Anglet. *VIIIèmes Journées Nationales Génie Civil – Génie Côtier*. Compiègne : s.n., 7-9 septembre 2004.

**Castelle, B. B. 2007.** Double bar beach dynamics on the high-energy meso-macrotidal French Aquitanian coast. *a review. Marine Geology*. 2007. 245, pp. 141-159.

**Chamley, H. 1987.** Sédimentologie. Paris : DUNOD, 1987. p. 175 .

**Chevillon, C. 1985.** Contribution à l'étude sédimentaire des dépôts du lagon sud-ouest de Nouvelle-Calédonie. La plaine lagunaire. *D.E.A.* s.l. : Université Aix-Marseille II, 1985.

**Chevillon, C. 1995.** Texture, Granulométrie et composition bioclastique des sédiments actuels de l'atoll d'Ouvéa (Iles Loyauté, Nouvelle-Calédonie). Nouméa Nouvelle-Calédonie : ORSTOM, 1995.

**CIRIA, CUR . 1991.** Manual on the use of rock in coastal and shoreline engineering "rock manual". 1991. pp. 4,320.

**CIRIA, CUR. 2005.** Manual on the use of rock in hydraulic engineering. 2005. pp. 4 ,320.

**Cordier, E. 2007.** Dynamique hydrosédimentaire du récif frangeant de l'Hermitage/La Saline (La Réunion) : Processus physiques et flux sédimentaires. *Thèse de Doctorat*. Reunion : Université De la Reunion, 2007. p. 193.

**Dégiovani, C. 1973.** Etude de sédimentologie dynamique à la presqu'île de Sidi Ferruch (Ouest d'Alger). *Thèse de 3ème cycle*. s.l. : Université Aix Marseille II, 1973. pp. 1-453.

**Dernovaya, N. et Lasjaunias, M. 2010.** L'érosion du trait de côte à Hauteville-sur-Mer. *Rapport intermédiaire du Mémoire d'Aptitude en Géologie*. Beauvais, France : Institut Polytechnique Lasalle Beauvais, 2010.

**Dolan, R. 1978.** A new photogrammetric method for determining shoreline erosion. *Coastal engineering*. 1978. 2, pp. 21,39.

**Douglas, B.C. et Crowel, M. 2000.** Long term shoreline prediction and error propagation. *Journal of Coastal Research*. 2000. 16, pp. 145,152.

**Duval, M. 2007.** Etude du déferlement d'une onde de Stokes et de la dissipation associée par simulation directe. *Thèse Doctorat*. Toulouse, France : Institut National Polytechnique de Toulouse, 2007. p. 221.

- Faye, I.B.N. 2010.** Dynamique du trait de côte sur les littoraux sableux de la Mauritanie à la Guinée-Bissau (Afrique de l'Ouest) : Approches régionale et locale par photo-interprétation, traitement d'images et analyse de cartes anciennes ». *Thèse de doctorat*. Brest : École Doctorale des Sciences de la Mer, 2010. Vol. 1.
- Gao, S. 1996.** A Fortran program for grain-size analysis to define net sediment transport. *Computers and Geosciences*. 1996. 22 (4), pp. 449-452.
- Gao, S. & Collins, M. 1991.** A critique of the "McLaren method" for defining sediment. *Journal of Sedimentary Petrology*. 1991. 61, pp. 143-146.
- Gao, S. & Collins, M. 1994b.** Net sediment transport patterns inferred from grain-size trends, based upon definition of "transport vectors"-reply. *Sedimentary Geology*. 1994b. 90, pp. 157-159.
- Gao, S. & Collins, M. 1994a.** Analysis of grain-size trends for defining sediment transport. *Journal of Coastal Research*. 1994a. 10 (1), pp. 70-78.
- Gao, S. & Collins, M. 1992.** Net sediment transport patterns inferred from grain-size. *Sedimentary Geology*. 1992. 80, pp. 47-60.
- Garlan, T. 2004.** Apports de la modélisation dans l'étude de la sédimentation marine récente. *Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches*. s.l. : Université Des Sciences Et Techniques De Lille, 2004. p. 80 .
- Héquette, A., Hemdane, Y. & Anthony, E. J. 2008.** Determination of Sediment Transport Paths in Macrotidal Shoreface Environments: A Comparison of Grain-Size Trend Analysis with Near-Bed Current Measurements. *Journal of Coastal Research*. 2008. 24 (3), pp. 695-707.
- Idrissi, M., et al. 2004.** Impact des installations côtières sur l'évolution du littoral de Mohammedia (Maroc). *VIIIèmes Journées Nationales Génie Civil – Génie Côtier*. Compiègne : s.n., 7-9 septembre 2004.
- Koffler, A.; Bendriss, A. & Zengerink, E. 2002.** *Les Géosynthétiques En Protection Contre L'érosion Des Berges Et En Construction D'ouvrages Hydrauliques Et Maritimes*. 2002.
- Koffler, A., et al. 2009.** Un Atténuateur De Houles En Tube Géosynthétique Pour Limiter L'érosion De La Plage De La Capte À Hyères. *Rencontres Géosynthétiques*. 2009.
- Krystian, E., Pilarczyk, W. & Rijkswaterstaat. 2005.** Coastal Stabilization And Alternative Solutions In International Perspective. *6th International Conference on Coastal and Port Engineering in Developing Countries, Colombo, Sri Lanka*. s.l. : Rijkswaterstaat, Hydraulic Engineering, Institute GA Delft, The Netherlands, HYDROpil Consultancy, 2005.
- Krystian, W. E. 1996.** Geotextile Systems In Coastal Engineering- An Overview. s.l. : Manager R&D, Rijkswaterstaat, Hydraulic Engineering Division, P.O. Delft, The Netherlands , 1996.
- Larfi, B. et Remini, B. 2006.** Le transport solide dans le bassin versant de l'oued Isser impact sur l'envasement du barrage de Beni amrane (Algérie). *Larhyss Journal*. s.l. : Laboratoire de Recherche en Hydraulique Souterraine et de Surface, 2006. 5, pp. 63-73.
- Layoune, A. et Tiguercha, D. 2011.** Application de la modélisation numérique pour l'étude l'ensablement du port de Cap Djinet. *mémoire d'ingénieure*. s.l. : Ecole Nationale Supérieure des Sciences de la Mer et de l'Aménagement du Littoral, 2011.
- Longere, P., et al. Etude Bathymétrique Et Sedimentologique Des Etangs De Diane Et D'urbino En Corse**. S.l. : ARCHIMER.
- Losson, B. et Corbonnois, J. 2006.** Les modes de sédimentation détritique: nouvelle méthode de détermination appliquée à des remplissages endokarstiques. *Geologica Belgica*. 2006. 9 (3-4), pp. 257-265.

**MATE. 1987.** Guide méthodologique " plan de prévention des risques littoraux". 1987.

**Mihoubi, M. K., Dahmani, H. et Belkessa, R. 2012.** Simulation numérique du transit sédimentaire d'un aménagement côtier. *XIIèmes Journées Nationales Génie Côtier – Génie Civil*. Cherbourg : Paralia CFL, 2012. 10.5150/jngcgc.

**Mihoubi, M.H., Dahmani, H. et Kettab, A. 2011.** Modélisation numérique de la houle côtière et du transport sédimentaire pour l'étude d'un port de pêche : cas du port de Khemisti. 2 *Conférence Méditerranéenne Côtière et Maritime*. Tanger, Maroc : s.n., 2011.

**Millot, C., Taupier-Letage, I., M. & Benzohra, M. 1990.** The Algerian eddies. *Earth Scienc Reviews*. 1990. 27, pp. 203,219.

**Observatoire de la Côte, Aquitaine. 2001.** *Evolution historique du littoral basque :Evolution Du Trait De Cote Sur Les Photographiesaeriennes De L'ign Et Les Cartes Anciennes Du Shom*. 2001.

**Paskoff, R. 1993.** *Les littoraux : impacts des aménagements sur leur evolutions*. Paris : Masson, 1993.

**Poizot, E. 2009.** La dynamique sédimentaire au travers de la géostatistique et des systèmes d'informations géographiques. *Thèse Doctorat*. Perpignan : Université Via Dominicia, 2009. pp. 44,99 .

**Reiffsteck, P. 2003.** Recommandations pour l'utilisation des géosynthétiques dans la lutte contre l'érosion. s.l. : LCPC - Division Mécanique des Sols, des Roches et de la Géologie de l'Ingénieur, 2003.

**Rivière, A. 1977.** *Méthode de granulométrie: Techniques et interprétation*. Paris : Masson, 1977.

**Seltzer, P. 1946.** le climat d'Algérie. s.l. : Institut Mediteranien Physique du Globe de l'Univers D'Algerie, 1946. p. 129.

**Sorensen, R.M. 1997.** *Basic coastal engineering*. 2. s.l. : Third, 1997.

**Ten Cate Géotube. 2010.** *Géosystème pour applications marines*. [www.tencate-nicolon.com](http://www.tencate-nicolon.com). [En ligne] 2010

**Ten Cate Nicolon. 2012.** Les géosynthétiques pour l'ingénierie marine et hydraulique. [www.tencate-nicolon.com](http://www.tencate-nicolon.com). [En ligne] 2012.

**TenCate Géosynthétique. 2010.** Géotube GT1000MB: La solution écologique pour protéger la nature. [www.tencate-nicolon.com](http://www.tencate-nicolon.com). [En ligne] 2012

**Vinther, N., Christiansen, C., Bartholdy, J., Sprensen, C. et Lund-Hansen, L.C. 2004.** Sediment transport across a tidal divide in the Danish Wadden Sea. *Danish Journal of Geography, Geografisk Tidsskrift*. 2004. 104(1), pp. 71,86.

## **Les cartes**

Photos aériennes (INCT, 1980 et 1999)

Carte géologique de l'Algérie, N° 9/24, partie comprise entre Azeffoun et Azazga, Echelle 1/50 000, (**Office National de Recherche Géologique et Minière, 1997**)

# **Annexe**

**Tableau des résultats des calculs des indices granulométriques :**

x	y	Pélites	Q90	D50	Sk(Ø)	So(Ø)
626289,29	4084319,13	2	346,1	254,3	0,024	0,340
626199,64	4084266,48	2	581,9	302,7	-0,307	0,560
625870,72	4083958,35	0,50	4411	385,6	-0,735	2,100
625972,6	4083999,32	2	4411	1327,6	0,085	1,480
626058,81	4084055,26	1	5000	630	-0,380	1,694
626145,68	4084110,57	2	1948,4	806,1	-0,324	0,751
626245,52	4084153,69	2	465,3	302,9	-0,228	0,392
626337,35	4084204,25	1	326,4	265,2	0,073	0,274
626117,62	4084206,72	2	313,9	240,9	-0,013	0,339
626028,82	4084151,95	2	298,3	224,8	0,011	0,312
625923,02	4084115,83	2	308,7	239,7	-0,019	0,305
625787,08	4084107,39	2	313,8	240,5	-0,008	0,346
626194,76	4084475,41	2	346,5	245,5	0,098	0,414
626106,76	4084421,17	2	380,9	254,6	-0,053	0,433
626022,21	4084371,07	2	447,9	304,1	0,069	0,447
625939,04	4084307,96	2	352,3	245,8	0,013	0,387
625865,66	4084239,95	2	310,3	218,7	0,008	0,442
625764,97	4084197,66	2	345,9	239,6	0,019	0,412
625658,92	4084156,2	2	357,5	241,8	0,053	0,443
625658,86	4084230,06	3	294,3	202,9	0,104	0,449
625760,03	4084271,72	5	291,4	194,3	0,096	0,485
625847,87	4084329,07	4	249,2	170	0,026	0,468
625930,57	4084385,21	5	268,6	177	0,062	0,489
626014,78	4084443,05	5	268,3	173,4	0,064	0,514
626099	4084500,9	3	284	179,2	0,030	0,543
626182,91	4084555,88	5	314,5	206	0,080	0,541
625431,08	4084378,5	3	285,5	180,5	-0,061	0,503
625533,87	4084413,95	3	267,6	165,6	-0,093	0,406
625634,42	4084463,82	3	229,7	152,6	-0,038	0,433
625762,36	4084476,74	5	230,6	152,4	-0,053	0,415
625836,58	4084547,28	4	223,5	181,9	0,001	0,437
625929,26	4084590,73	4	230	153,4	0,058	0,480
626005,35	4084659,5	6	240	161,9	0,000	0,513
626216,73	4084830,96	3	303	198,2	0,005	0,367
626394,59	4084654,89	2	299,1	216,6	-0,062	0,400
626483,24	4084790	2	373	255,5	0,065	0,360
626373,77	4084379,14	2	301,1	221,7	-0,091	1,058
626395,01	4084860,18	10	751,5	273	-0,065	0,321

## Les échelles des indices granulométriques (Folk & Ward 1957)

### TAILLE MOYENNE ou "MEAN SIZE" (Folk & Ward, 1957)

$$Mz = (\phi_{16} + \phi_{50} + \phi_{84}) / 3$$

Limites selon Wentworth (1922) :

Vase	3.98	Sable très fin	3	Sable fin	2	Sable moyen	1	Sable grossier	0	Sable très grossier	-1	Granule	-2	Gravier	-6	Galet	( $\phi$ )
(SG)		(STF)		(SF)		(SM)		(SG)		(STG)		(GN)		(GV)		(GT)	
Mud	0.063	Very fine sand	0.125	Fine sand	0.25	Medium sand	0.5	Coarse sand	1	Very coarse sand	2	Granule	4	Pebble	64	Cobble	(mm)

### TRIAGE ou "STANDARD DEVIATION" (Folk & Ward, 1957)

$$So = (\phi_{84} - \phi_{16}) / 4 + ((\phi_{95} - \phi_5) / 6.6)$$

Limites adaptées à l'étude des milieux récifaux par Weydert (1971) :

Extrêmement bien trié (EBT)	0.5	Très bien trié (TBT)	1.1	Bien trié (BT)	1.5	Mal trié (MT)	2	Très mal trié (TMT)
<i>Extremely well sorted</i>		<i>Very well sorted</i>		<i>Well sorted</i>		<i>Poorly sorted</i>		<i>Very poorly sorted</i>

### ASYMETRIE ou "SKEWNESS" (Folk & Ward, 1957) :

$$Skd = \{[(\phi_{16} + \phi_{84}) - 2(\phi_{50})] / 2(\phi_{84} - \phi_{16})\} + \{[(\phi_5 + \phi_{95}) - 2(\phi_{50})] / 2(\phi_{95} - \phi_5)\}$$

-1	Très négative (AT-)	-0.3	Négative (A-)	-0.1	Symétrie (S)	0.1	Positive (A+)	0.3	Très positive (AT+)	1
	<i>Strongly fine skewed</i>		<i>Fine skewed</i>		<i>Nearly symmetrical</i>		<i>Coarse skewed</i>		<i>Strongly coarse skewed</i>	