

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 POUR L'OBTENTION DU DIPLOME
DE MASTER EN SCIENCES DE LA MER

Sujet :

**Modélisation du transit sédimentaire sur
la plage de Sidi Ghiles par la méthode de
L.C.H.F**

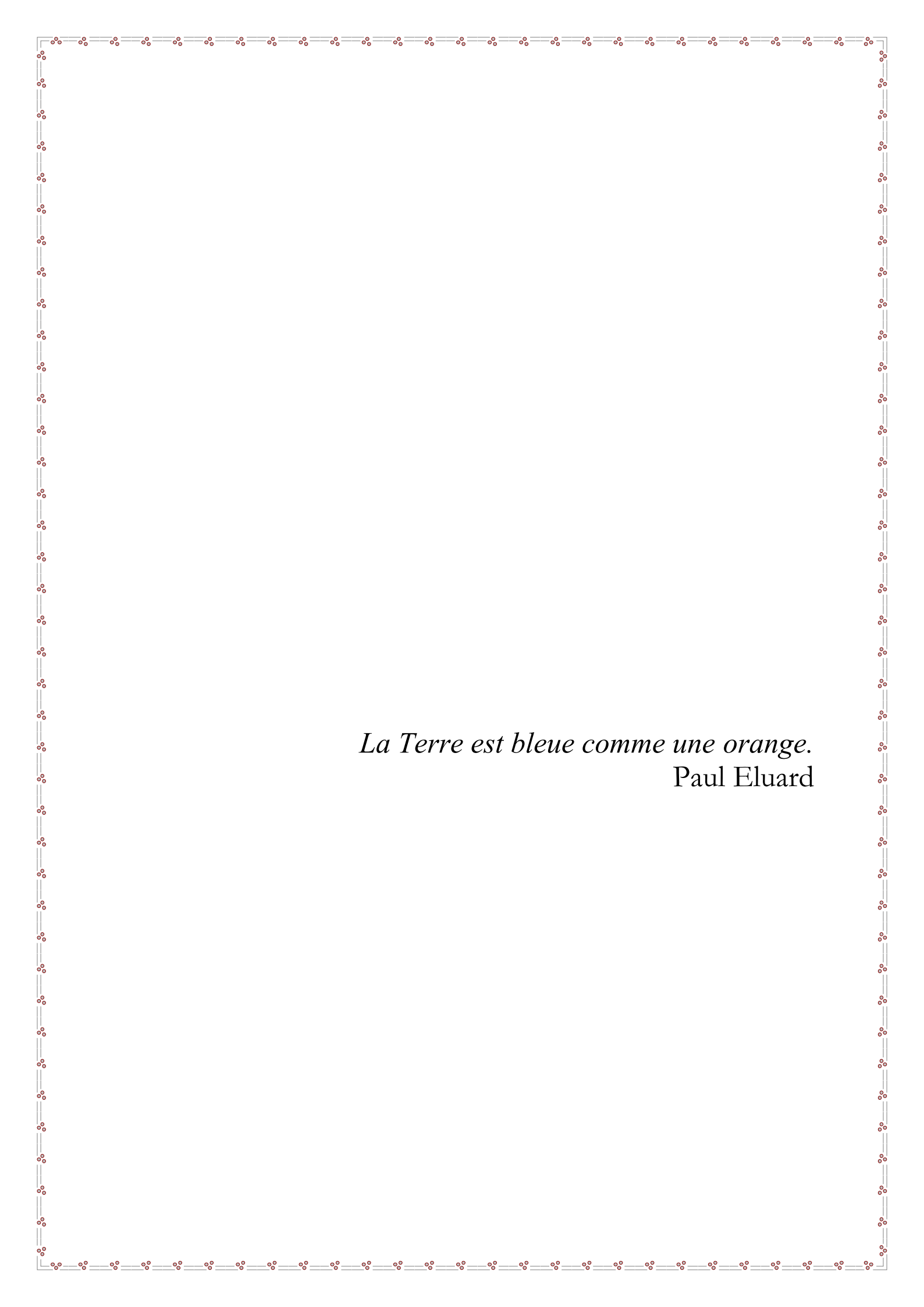
Présenté par:

- MOUHOUBI Nour el Imène.

Soutenu le 13/10 /2012 devant le jury suivant :

Mr	LARID.M	Maître de conférences A (ENSSMAL)	Président
Mr	BELKESSA.R	Professeur (ENSSMAL)	Promoteur
Mme	BENZOUAI	Maître Assistant A (ENSSMAL)	Examinatrice
Mr	HAMDANE.Y	Maître de conférences A (ENSSMAL)	Examineur

Promotion : (2012)



La Terre est bleue comme une orange.
Paul Eluard

Dédicaces

*A mon professeur Mr Belkessa, pour m'avoir donné goût à la
recherche,*

*A mes parents, pour m'avoir guidée et orientée depuis ma
première année scolaire à ce jour,*

*A mes grands-parents, qui m'ont accordé un foyer plein de
gaité et de paix,*

*A mes sœurs Samia et Asma, pour leurs conseils et remarques
instructifs,*

*A tous mes amis : Khadidja, Miloud, Abdellah, Yasmine,
Hanya, Noureddine, Samia, Bilel, Aissa et en particulier à ma
promo Aménagement 2012 pour leurs encouragements et
aides durant mon parcours universitaire,*

*A toi Mehdi, pour ta présence et ton grand cœur, ta patience
et ta compréhension depuis toujours,*

*A toutes les autres personnes que je n'ai pas citées, que j'ai
oublié mais ils se reconnaîtront à travers ce dédicace.*

Remerciements

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

A cet effet, on tient à remercier Monsieur LARID d'avoir accepté de présider le jury de cette soutenance, ainsi que Madame BENZOUAI et Monsieur HEMDANE de nous avoir honorés de leur présence, et d'avoir acceptés d'examiner ce travail et dont les critiques nous serviront sûrement.

On voudrait également remercier Monsieur BELKESSA, pour avoir accepté, de diriger et de suivre constamment le progrès de ce travail, par ses suggestions et ses critiques constructives, dont la patience et la sympathie m'ont fait aimer le domaine de l'aménagement.

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

On tient à exprimer notre vive gratitude à tous nos enseignants, depuis la première année fondamentale, jusqu'à la cinquième année universitaire.

Sommaire

Introduction	01
Chapitre I : Généralités	
I.1. Localisation de la zone d'étude	03
I.2. Transport sédimentaire en milieux côtiers	04
I.2.1. Processus affectant les sédiments naturels	04
I.2.1.1. Sédiments, définitions et classification	04
I.2.1.2. Modes de transport des sédiments	06
I.2.1.3. Processus mis en jeu dans le transport sédimentaire	07
Chapitre II : Méthodes de Modélisation et de Quantification du transit sédimentaire	
II.1. Modélisation du transit sédimentaire	10
II.1.1. TELEMAC 3D	10
II.1.1.1. Physique et Modélisation	10
II.1.1.2. Méthodologie	13
II.1.1.3. Application du modèle	14
II.1.2. Modèle de Gao et Collins (1994)	17
II.1.2.1. Principe du modèle	17
II.1.2.2. Méthodologie	17
II.2. Quantification des transports longitudinaux	20
II.2.1. Méthodologie	21
II.2.1.1. Formule du L.C.H.F (1973)	21
II.2.1.2. Formule de C.E.R.C (1973)	24
II.2.1.3. Formule de VANRIJN (1990)	24
II.2.1.4. Formule de KAMPHIUS et al. (1986)	25
Chapitre III : Application de la formule du L.C.H.F (1986)	
III.1. Etude sédimentaire	27
III.2. Estimation du bilan énergétique	28
III.2.1. Détermination de l'amplitude Hs	28
III.2.2. Résultat du calcul de la durée d'action t	29
III.2.2.1. Calcul des fréquences d'observation F%	29
III.2.2.2. Calcul de la durée t :	30
III.2.3. Détermination de l'angle	30
III.3. Estimation du transport sédimentaire	33
Conclusion et perspectives de l'étude	35

Bibliographie
Annexes

Liste des abréviations

°C	: Degré Celsius
cm	: Centimètre
E	: Est
Lat	: Latitude
LCHF	: Laboratoire Centrale d'Hydraulique Français
LEM	: Laboratoire d'Etudes Maritimes
m	: Mètre
m³	: Mètre cube
ml	: Mètre linéaire
mm	: Millimètre
m/an	: Mètre par an
m/s	: Mètre par seconde
m/s²	: Mètre par seconde carrée
m³/s	: Mètre cube par seconde
N	: Nord
NW	: Nord-Ouest
ONM	: Office National de la Météorologie
s	: Seconde
SE	: Sud-Est
SSMO	: Summary of Synoptic Meteorological Observations
SW	: Sud-Ouest
T	: Temps

Liste des figures

Fig.I.1 :	Localisation de la zone d'étude (Google Earth, 2012).	3
Fig.I.2 :	Schéma général de la dynamiques sédimentaire (d'après Parker (1986) ; Mehta et l.(1989)	9
Fig.II.1 :	Vue 3D du MNT (réalisé par Tecplot, (Richard.A, 2008-2009).	15
Fig.III.1 :	Répartition spatiale de la médiane granulométrique entre Cherchell et Sidi Ghiles (Mouhoubi et Ouabel, 2012).	27
Fig.III.2 :	Détermination de l'angle α .(Mouhoubi et Ouabel, 2012)	32
Fig.III.3 :	Schéma probable de l'hydrodynamisme dans la zone d'étude (Mouhoubi et Ouabel, 2012).	34

Liste des tableaux

Tab.I.1 :	Classification de Wentworth (1922) ;	05
Tab.II.1 :	Relations entre les paramètres granulométriques (en unité de phi) de deux station A et B, pour un transport sédimentaire de A vers B, de type FB- et CB.	19
Tab.III.1 :	Résultats du calcul des fréquences d'observation f_{ri}	28
Tab.III.2 :	Résultats du calcul des moyennes d'apparition P_n	29
Tab.III.3 :	Résultats du calcul de H_s par direction et par période	29
Tab.III.4 :	Résultats du calcul des fréquences d'observation $F\%$ par direction et par période	30
Tab.III.5 :	Résultats du calcul des durées d'action t de la houle par direction et par période	30
Tab.III.6 :	Résultats du calcul du bilan énergétique de la houle par direction et par période	30
Tab.III.7 :	Résultats du calcul des angles α et des fonctions $f(\alpha)$ par direction et par période	31
Tab.III.8 :	Estimation du transit sédimentaire global	33

Introduction

Introduction

La dégradation du littoral algérien est un problème inéluctable de portée nationale ; elle affecte l'environnement et nuit au paysage côtier ainsi qu'aux stratégies économiques, notamment touristiques du pays. Le recul des plages sableuses de la commune de Sidi Ghiles et des communes voisines s'opèrent à des vitesses comprises entre 0,51 m/an et 0,65 m/an (Mouhoubi.N, Ouabel.k et Belloulou.B, Gana.A , 2012).

La houle et la dérive littorale qu'elle induit sont les principaux agents hydrodynamiques de l'évolution des littoraux meubles de cette baie (Sliti, 1990 ; El Arrim, 1996). Dans ce contexte, la connaissance du volume de sables mobilisés parallèlement à la côte par la dérive littorale et l'étude de son évolution en fonction des conditions environnementales constituent l'une des démarches indispensables à toute analyse prévisionnelle de gestion de l'érosion marine le long des plages de la baie.

D'après Villaret (EDF 2003), même si la densité des sédiments qui est considérée comme constante, avec une prédominance de quartz ($\rho_s=2650 \text{ kg/m}^3$), la taille et la forme des grains varient en réponse au forçage hydrodynamique. La granulométrie des sédiments peut être uniforme ou étendue. En règle générale, les sédiments fins sont plus facilement mobilisables et transportés à des taux plus importants que les sédiments grossiers. La couche supérieure des fonds marins a donc tendance à s'appauvrir peu à peu en sédiments fins. Ce phénomène de revêtement a pour effet de limiter le transit des sédiments, voir de le bloquer, et doit être pris en compte dans les modèles morphodynamiques.

En général, on ne retrouve pas toutes les catégories granulométriques au même endroit, mais il s'effectue une ségrégation des particules, dans les directions horizontales et sur la verticale. On observe géographiquement des alternances de zones de galets, de sables grossiers et de sables fins, ainsi que des zones dominées par des sédiments cohésifs constitués d'argiles et de vases. En un point donné, la nature du substrat peut aussi varier sur la verticale avec la présence de strates de natures différentes (EDF 2003).

Différentes techniques ont été utilisées et mentionnées dans la littérature pour quantifier les masses de sédiments longshore dans une cellule sédimentaire bien choisie, mais aussi de modéliser la direction et la distribution de ces sédiments. Ces techniques ont évolué depuis des formules empiriques (tel que les formules du LCHF, CERC...) à des équations semi-empiriques numériques programmées sur des outils informatiques bien développés (TELEMAC, Aquasea...).

L'estimation du transit sédimentaire moyen dans la plage centre de Sidi Ghiles ainsi qu'une présentation des principales méthodes suivies pour ceci, font l'objet de cette recherche bibliographique intitulée « *Modélisation du transit sédimentaire dans la plage centre de Sidi Ghiles* », qui a été élaborée dans le cadre d'un master de recherche en sciences de la mer. Dans chaque étude de protection, l'étude sédimentologique et par conséquent celle du transit littoral sont très importantes dans le choix de ou des solutions proposées. Dans ce sens, ce rapport a été élaboré afin de dénombrer les différentes techniques et formules possibles qu'on pourra appliquer dans un système microtidal comme la méditerranée.

Il a été départagé en trois grands chapitres :

- Le premier chapitre présente de zone d'étude ainsi que les propriétés essentielles qui déterminent le comportement dynamique des sédiments non-cohésifs, à savoir leur diamètre, leur courbe granulométrique, leur densité relative ainsi que leur vitesse de chute. Il décrit les paramètres hydrodynamiques importants, qui interviennent dans le calcul du taux de transport. et les mécanismes qui gouvernent le transport des sédiments selon les différents ;
- Le second chapitre résume les formules classiques utilisées pour estimer le taux de transport ainsi que les outils informatiques développés ;
- Le troisième et dernier chapitre est une application de la formule LCHF (1913) dans la zone d'étude, en détaillant les différentes étapes suivies.

Généralités

Chapitre I : Généralités

I.1. Localisation de la zone d'étude

La commune de Sidi Ghiles, située à 130 km à l'Ouest de la capitale, à 30 km du chef lieu de Tipaza et à 7,5 km de la commune de Cherchell ; s'étend sur une superficie de 3715 Ha (ANAT, 2012). Elle est délimitée par Cherchell à l'Est, Hadjret Elnouss à l'Ouest et Sidi Semiane au Sud. (Figure.I.1)

Notre zone d'étude qui constitue la plage centre de Sidi Ghiles est large d'environ 50 m sur une bande de 300 m, orienté vers le Sud Est-Nord Ouest. Les affleurements géologiques qui s'étendent le long de son littoral sont essentiellement d'âge miocène supérieur marin ; montrant un mélange de calcaire, grès et argile ainsi que des formations de roches ignées granitiques vers l'arrière-pays.



Fig .I.1 : Localisation de la zone d'étude (Google Earth, 2012).

Elle s'allonge sur une côte de 1,5 Km dont le rivage est orienté Sud Est-Nord Ouest, et ses coordonnées Lambert sont : Longitude Est $2^{\circ} 07'39.36''$ et $2^{\circ} 06'47.52''$, Latitude Nord $36^{\circ} 35'12.44''$ et $36^{\circ}35'5.22''$.

Elle appartient au domaine méditerranéen sub-humide. Ce littoral méditerranéen microtidal subit l'influence du régime des houles. Les vagues de direction NW à N sont les plus fréquentes, avec des hauteurs significatives autour de 3 m et des périodes observés de 6 à 10 s (S.S.M.O tome II, Zone Algiers (1963-1970). Le secteur de la zone d'étude présente un espace meuble avec une

prédominance d'un sable grossier dont le diamètre moyen (D50) est compris entre 500 et 2000 μm .

I.2. Transport sédimentaire en milieux côtiers

Cette partie est consacrée à la description des processus physiques influençant le transport sédimentaire et à leur modélisation. Tout d'abord, nous rappelons quelques définitions concernant les sédiments et leurs modes de transport, les différents processus influençant le transport sédimentaire en milieux côtiers et estuariens.

I.2.1. Processus affectant les sédiments naturels

I.2.1.1. Sédiments, définitions et classification

Les sédiments sont généralement issus de l'altération des formations continentales superficielles et de l'activité biologique in situ, etc. L'altération constitue l'ensemble des mécanismes qui libèrent les particules des roches et soustraient les éléments dissous à la surface terrestre, avant qu'interviennent les processus d'érosion, puis de transport et de dépôt. Les sédiments sont de nature très variée selon les roches dont ils dérivent et sont dominés par des silicates, surtout le quartz pour les fractions grossières, et les minéraux argileux et les carbonates d'origine biogénique (Chauchat.J, 2007).

Le spectre granulométrique est très étendu, depuis les fines poussières jusqu'aux gigantesques blocs, et les sédiments ont des formes très variées : ils sont curviformes, allongés, aplatis ou en feuillets mais rarement sphériques. Ces formes compliquent beaucoup la mesure de la taille des particules et introduisent des incertitudes.

L'analyse des tailles fait appel à une échelle partagée en classe granulométrique, dont la progression est géométrique par commodité historique. La progression la plus utilisée est celle de (Wentworth, 1922), pour laquelle chaque classe principale correspond à un diamètre du double ou de la moitié de la classe voisine, la classe de base correspondant à 1 mm (Tab.I.1) :

Tab I.1 : Classification de Wentworth (1922)

Nom en français		Nom en anglais		Taille	
Blocs		Boulders		≥ 256	Sédiments grossiers
Gros cailloux		Cobbles		64 - 256	
Graviers		Gravels		32 - 64	
Petits cailloux		Pebbles		4 - 32	
Granules		Granules		2 - 4	
<i>Sable</i>	Sable très grossier	<i>Sand</i>	Very Coarse Sand	1 - 2	Sédiments fins
	Sable grossier		Coarse sand	0,5 - 1	
	Sable moyen		Medium sand	0,25 - 0,5	
	Sable fin		Fine sand	0,125 - 0,25	
	Sable très fin		Very fine sand	0,0625 - 0,125	
<i>Silt</i>	Silt grossier	<i>Silt</i>	Coarse Silt	0,0312 - 0,0625	
	Silt moyen		Medium silt	0,0156 - 0,0312	
	Silt fin		Fine silt	0,0078 - 0,0156	
	Silt très fin		Very fine silt	0,00390625 - 0,0078	
Argile		Clay		0,0001 - 0,00390625	
Colloïde		Colloid		$< 0,0001$	

En milieux estuariens et côtiers les sédiments ont des tailles inférieures à quelques millimètres. On y retrouve les sables, les silts, les argiles et les colloïdes :

- **Les sables** : sont constitués de petites particules provenant de la désagrégation d'autres roches, dont la dimension est comprise entre 0,063 et 2 mm. Ils sont classés selon leur granulométrie. Ils sont souvent, du fait de l'érosion, le produit de la décomposition du granit et des roches carbonatées ainsi que des organismes à squelette calcaire ou siliceux ;
- **Les silts** : sont des particules très fines, de diamètre compris entre 4–63 μm , obtenues par l'effritement mécanique des roches sur le fond, et plus particulièrement sous l'action des courants pour les silts d'origine fluviale. Ce sont des particules suffisamment fines pour être transportées sur de longues distances par les courants ;
- **Les argiles** : sont composées, par des aluminosilicates hydratés, qui présentent une structure feuilletée ou fibreuse qui explique leur plasticité. On les classe en trois familles :
 - la kaolinite ;
 - la montmorillonite, également connue sous l'appellation de terre de Sommière ;
 - l'illite, qui est la plus répandue.

À noter que ces minéraux ne se rencontrent pas isolément dans la nature mais dans des roches composées d'un mélange de minéraux typiques des argiles et d'autres minéraux ou matériaux associés (sable, oxyde de fer, calcaire, débris végétaux). L'interstice entre les feuillets contient

de l'eau ainsi que des ions. Il en résulte des variations de distance entre les feuillets, et donc des variations dimensionnelles macroscopiques de l'argile quand elle s'hydrate (dilatation) ou s'assèche (contraction) et donc une grande variabilité des propriétés rhéologiques.

- **Les colloïdes** : sont des éléments d'origine minérale ou organique de diamètre inférieur à 0,1 micron. Ils jouent un rôle important dans les processus de cohésion et de floculation.

Les sédiments fins sont caractérisés par une taille arbitraire inférieure à 62,5 μm , ce sont les sables très fins, les silts, les argiles et les colloïdes. Ils sont facilement transportables et sont à l'origine de l'envasement des estuaires et des zones côtières adjacentes.

Le comportement des sédiments ne dépend pas uniquement de leur granulométrie (Tab.I.1) mais aussi de leur composition et notamment de leur teneur en argile et en matières organiques. C'est ainsi qu'on différencie les sédiments non-cohésifs des sédiments cohésifs :

- Les particules constitutives des **sédiments non-cohésifs** sont indépendantes les unes des autres et conservent leur individualité dans leur déplacement, elles n'ont pas tendance à s'agglomérer. Elles constituent les sables ;
- **Les sédiments cohésifs** résultent principalement de la présence d'argiles et/ou de matières organiques. Les grains tendent à se lier entre eux et à former des agrégats ou floes, la taille effective des floes change continuellement sous l'effet des propriétés physicochimiques du milieu (tel que salinité) et de l'énergie turbulente de l'écoulement (Verney, 2006). Leur densité varie en fonction de leur teneur en matières organiques, en eau interstitielle ou encore selon leur composition minéralogique. Ce sont les vases.

I.2.1.2. Modes de transports des sédiments

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

- **Le transport par roulement ou charriage** : concerne les grains de la couche superficielle des sédiments non-cohésifs qui roulent sur le fond dans le sens de l'écoulement jusqu'à trouver une nouvelle position d'équilibre. Ce mode de transport se produit essentiellement lorsque la contrainte de frottement est proche de la contrainte critique de mouvement ;
- **Le transport par saltation** : apparaît lorsque le seuil de mouvement est dépassé. L'impulsion fournie par le fluide fait sauter les particules au-dessus du fond suivant une trajectoire balistique. La hauteur maximale atteinte par les grains est de l'ordre de grandeur du diamètre de celle-ci ;
- **Le transport en suspension (ou suspended load)** : se produit lorsque l'écoulement est suffisamment fort pour maintenir en suspension les particules sans que celles-ci ne se

redéposent. Les particules concernées par ce mode de transport sont les sables, les silts et les argiles. La taille et le poids des particules transportées sont en relation directe avec l'intensité de l'écoulement.

D'après Bagnold (1973) la distinction principale se fait entre le transport en suspension et le transport par charriage sur le fond (bed load) comprenant le roulement et la saltation. Dans le cas du transport par roulement et par saltation, l'impulsion fournie par le fluide est sur l'horizontale contrairement au transport en suspension.

Les sédiments non-cohésifs peuvent être transportés par ces trois modes, charriage sur le fond, saltation et transport en suspension. Par contre, les sédiments cohésifs sont principalement transportés en suspension (suspended load) et leur érodabilité varie en fonction de l'état de consolidation des dépôts de vase sur le fond (Chauchat.J, 2007).

I.2.1.3. Processus mis en jeu dans le transport sédimentaire

Le comportement des sédiments dans les zones côtières et estuariennes est influencé par de nombreux phénomènes. Les particules chutent, sédimentent et se déposent sur le fond pour former le sédiment. Dans le sédiment se produisent les processus de tassement et de consolidation. Lorsque l'agitation engendrée par les courants et les vagues est suffisante, les sédiments peuvent être remis en suspension ou érodés puis transportés dans l'eau (Chauchat.J, 2007).

Au cours de ce transport les sédiments cohésifs peuvent flocculer pour former des agrégats, modifiant ainsi leur chute. Parker (1986) puis Mehta et al. (1989) ont proposé un modèle conceptuel de la dynamique sédimentaire estuarienne reliant les processus de dépôt - érosion - transport aux états spécifiques des vases (Fig. I.2). Les phénomènes hydrodynamiques tels que la marée, les vagues, le mélange des eaux douces et salées vont fortement influencer la dynamique sédimentaire. Nous allons décrire succinctement ces différents processus :

- **La sédimentation** est définie comme le processus de chute d'éléments solides (particules, flocons, agrégats, ...) dans un liquide sous l'action de la pesanteur et des forces de frottement dues à la viscosité du fluide ; au cours de ce processus, les grains sont distants les uns des autres de sorte que les interactions directes entre particules sont faibles tant que la distance interparticulaire est grande ;
- **Le transport en suspension** des sédiments est assuré par l'advection, mouvement moyen, d'une part, et la dispersion liée aux fluctuations turbulentes d'autre part. Lorsque l'intensité de la turbulence devient trop faible, les particules sédimentaires se déposent sur le fond (Eisma (1992), entre autres). Le processus de floculation peut fortement influencer la sédimentation lorsque la teneur en argile de la suspension est importante ;
- **La floculation** est donc un processus spécifique aux sédiments cohésifs. En observant une suspension concentrée au microscope, on peut voir sous certaines conditions des amas de particules appelés floccs, eux-mêmes constitués de petits amas compacts de particules fines appelés agrégats (Mewis and Spaul, 1976). La formation d'une telle structure est appelée

agrégation, coagulation ou floculation. Les floes et les agrégats se forment par fixation de particules après une collision. Les mécanismes contribuant principalement à ce processus sont le mouvement brownien résultant de l'agitation thermique des molécules fluides, le cisaillement dû aux gradients de vitesse au sein du fluide et la vitesse de chute différentielle résultant des différences de forme et de taille des amas (Hayter, 1983). La fréquence des collisions augmente évidemment avec la concentration. Lorsque deux particules cohésives sont suffisamment proches, elles peuvent coaguler sous l'action de forces interparticulaires attractives diverses ;

- **La consolidation** correspond au tassement et à la densification d'un dépôt de sédiments par évacuation du liquide interstitiel sous l'action de la pression due au poids propre des grains et/ou à un chargement extérieur. Dans ce processus, le fluide interstitiel circule dans la matrice solide constituée par des grains très voisins voire en contact ;
- **L'érosion** peut être définie comme la remise en mouvement des particules du fond sédimentaire. L'érosion se produit lorsque la contrainte de frottement au fond devient suffisamment grande pour vaincre les forces de cohésion et de pesanteur qui maintiennent les particules au fond (Partheniades, 1962). L'érosion est d'autant plus efficace que la vase est fraîchement déposée et donc peu consolidée. Les vagues peuvent jouer un rôle important sur l'érosion en imposant un chargement cyclique du fond qui favorise la liquéfaction et la formation de rides « ripple marks », modifiant ainsi la rugosité ;

Dans les estuaires à moyen et fort marnage, le transport des matières en suspension est souvent caractérisé par l'existence naturelle d'une zone d'accumulation des sédiments en suspension (Glangeaud, 1939) appelée "bouchon vaseux" ("turbidity maximum" en anglais) dont la concentration peut varier entre quelques dizaines de milligrammes par litre à la surface et quelques grammes par litre au fond en fonction des estuaires et de l'instant de la marée. Le "bouchon vaseux" oscille et se déplace en fonction de la marée et du débit fluvial.

La décantation rapide du bouchon vaseux pendant les périodes de marée de morte-eau donne parfois lieu à l'apparition d'une couche de vase fluide concentrée : la "crème de vase" (ou "fluid mud" en anglais) (Jouanneau and Latouche, 1981). Celle-ci a été observée dans de nombreux estuaires tels que la Gironde (Allen, 1971), la Loire (Gallene, 1974) et la Seine (Lesourd, 2000) en France. Son origine semble liée à des conditions hydrodynamiques de faible énergie et à la présence d'une quantité de matières en suspension suffisante pour générer un flux de sédimentation important.

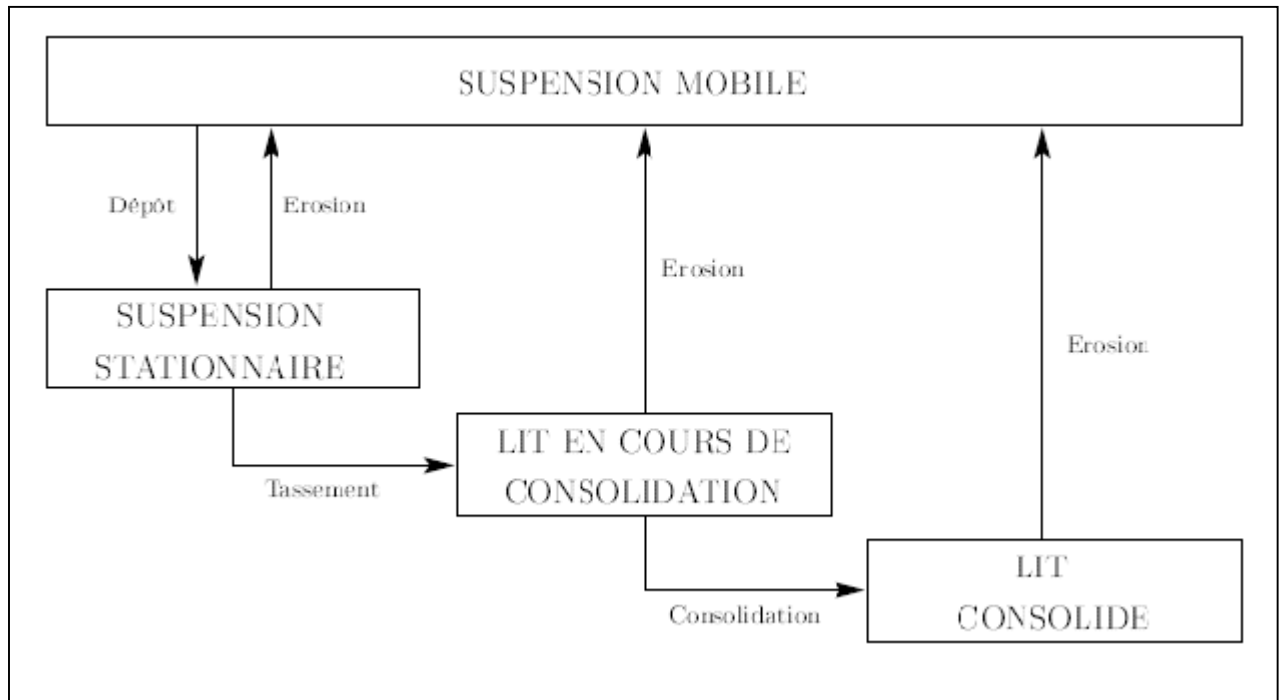


Fig.I.2: Schéma général de la dynamique sédimentaire (d'après Parker (1986) ; Mehta et al.(1989))

I.2.1.3. Etat de l'art de la modélisation numérique classique du transport sédimentaire

L'approche couramment utilisée pour modéliser le transport sédimentaire en milieux côtiers et estuariens suppose que le domaine de calcul soit divisé en deux sous-domaines.

L'un est constitué d'un milieu fluide au sein duquel la concentration de sédiments est faible. Dans ces conditions, les interactions fluide-particule peuvent être négligées et les particules sont considérées comme un "scalaire passif" exception faite de leur vitesse de chute qui doit être prescrite. L'autre sous-domaine, au fond, traite les phénomènes de tassement et de consolidation (Kynch, 1952; Terzaghi and Peck, 1967; Gibson et al., 1967).

La définition de la transition entre le fond et le fluide au-dessus est toujours un problème délicat, dans la nature comme dans les modèles. Cette transition est souvent définie à partir d'une concentration ou d'une densité de référence. Cette ambiguïté dans la définition du fond est une des motivations fortes pour l'approche diphasique qui ne nécessite pas une telle définition. L'un des points délicats dans l'approche classique consiste à modéliser les échanges de matières entre ces deux sous-domaines. Ils doivent être paramétrisés par l'intermédiaire de formules empiriques (Krone, 1962; Partheniades, 1965).

Dans le chapitre suivant, un ensemble d'outils et de formules vont être décrits.

*Méthodes de Modélisation et
Quantification du transit
sédimentaire*

Chapitre II : Méthodes de Modélisation et de Quantification du transit sédimentaire

Introduction

Ce chapitre, consacré pour les différentes techniques et méthodes de quantification et de modélisation du transport sédimentaire les plus efficace et les plus utilisées, est une synthèse bibliographique des documents et ouvrages, ainsi que des articles et publications sélectionnés pour cela.

II.1. Modélisation du transit sédimentaire

Le transit sédimentaire d'un fleuve ou d'une portion côtière est régi par l'érosion, l'advection et le dépôt de ces sédiments. Il est séparé en deux catégories conceptuelles, par charriage et par suspension. Nous ne traitons que la suspension dans cette synthèse bibliographique. On trouve plusieurs logiciels qui exploitent ces modèles de manières différentes ; dans les paragraphes suivants deux types de logiciel sont détaillés :

II.1.1. TELEMAC 3D

La modélisation numérique de la chaîne de calcul TELEMAC et en particulier avec TELEMAC-3D dans sa version 5.9, nécessite l'utilisation de d'autres logiciels de prétraitement et post-traitement tel que : Mapinfo, Trigrif, Tecplot, Fudaa-prepro. La chaîne de calcul TELEMAC inclut Matisse (génération de maillage), STBTEL (vérification de maillage, interpolation des fonds), Rubens (post-traitement). Malgré l'existence du module de calcul sédimentaire bidimensionnel SISYPHE, la résolution du transport sédimentaire est réalisée directement dans TELEMAC-3D.

II.1.1.1. Physique et Modélisation

La modélisation sédimentaire nécessite trois modèles en interaction : le modèle hydrodynamique, le modèle sédimentologique et le modèle morphodynamique. Le modèle morphodynamique fixe le champ spatialisé des caractéristiques d'évolution morphodynamique (contrainte critique d'érosion, modèle de tassement du sol). Pour une bathymétrie donnée, le modèle hydrodynamique permet d'obtenir les champs de variables hydrodynamiques (hauteur, vitesses, contrainte de cisaillement). Les variables hydrodynamiques alimentent le modèle sédimentologique qui détermine les potentiels flux d'érosion et de dépôt. L'association du modèle sédimentologique et du modèle morphodynamique permet de déterminer l'évolution bathymétrique des fonds. Cette évolution est ensuite introduite dans le modèle hydrodynamique pour calculer de nouveau les champs de variables dynamiques et ainsi de suite :

a- Modèle hydrodynamique

La contrainte de cisaillement de l'eau engendrée par le frottement au fond est écrite τ_b . Par définition, la vitesse de frottement u_* s'écrit comme suit [II.1] :

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau_b}{\rho}} \quad \dots\dots\dots[\text{II.1}]$$

Où : ρ est la masse volumique du fluide.

Prandtl a défini une distribution [II.2] de vitesse logarithmique telle que :

$$u = \frac{u_*}{\kappa} \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) \quad \dots\dots\dots[\text{II.2}]$$

Où : κ est la constante de Von Karman ($\kappa = 0,41$).

Cette formulation demande la connaissance de z_0 , la côte maximale de vitesse nulle. Pour cela, le modèle de Nikuradse, choisi pour l'étude, utilise la notion de longueur de rugosité effective K_s . La longueur de rugosité effective K_s se décompose en une rugosité de grain K'_s et une rugosité de forme K''_s , selon la formule suivante [II.3] :

$$k_s = k'_s + k''_s \quad \dots\dots\dots[\text{II.3}]$$

La longueur de rugosité de grain K'_s est généralement définie par rapport à la granulométrie par la relation [II.4] :

$$k'_s = 3.d_{90} \quad \dots\dots\dots[\text{II.4}]$$

Avec : d_{90} est le diamètre pour lequel 90 % de la population de sédiments possède un diamètre inférieur.

En régime turbulent rugueux ($\frac{u_*}{\nu} > 70$), z_0 est définie tel que [II.5] :

$$z_0 = 0,033.k_s \quad \dots\dots\dots[\text{II.5}]$$

Ainsi pour une vitesse u_1 à la côte z_1 , la distribution logarithmique de vitesse permet d'exprimer la contrainte de cisaillement τ_b :

$$\tau_b = \rho \left(\frac{\kappa \cdot u_1}{\ln(z_1/z_0)} \right) = \rho \left(\frac{\kappa \cdot u_1}{\ln(30 \cdot z_1/k_s)} \right) \dots\dots[\text{II.6}]$$

Cette formulation [II.6] est utilisée dans le logiciel TELEMAC-3D pour calculer la contrainte en question. Le modèle de Nikuradse prend en compte la structure verticale du champ de vitesses, ce qui n'est pas le cas des modèles de Chézy et de Manning-Strickler. Dans notre cas, le calcul de la contrainte de cisaillement est plus juste. Ceci explique en partie l'intérêt d'une étude en trois dimensions.

La dynamique des fluides est décrite par les équations de Navier-Stokes. En régime turbulent, il est intéressant de décrire l'écoulement comme étant un écoulement moyen associé à une fluctuation turbulente. En appliquant cette décomposition aux équations de Navier-Stokes, on obtient les équations de Reynolds.

A cause de cette décomposition, un terme supplémentaire apparaît dans les équations : ce sont les tensions de Reynolds. Les travaux dédiés à la turbulence cherchent à exprimer au mieux ces tensions de Reynolds. Il existe de nombreux modèles de turbulence comme le modèle k_ϵ , le modèle de longueur de mélange ou le modèle de Smagorinski.

b- Modèle sédimentaire

Cette étude s'intéresse aux sédiments fins, c'est-à-dire aux vases, limons, sables fins. Avec des diamètres médians inférieurs à $80 \mu\text{m}$, il s'agit de sédiments cohésifs. Ainsi, selon la formule de Partheniades (1963) [Van-Rijn, 1993], le taux d'érosion E s'écrit :

$$E = M \left(\frac{\tau_b - \tau_{ce}}{\tau_{ce}} \right) \dots\dots\dots[\text{II.7}]$$

Avec :

M est le coefficient de Partheniades.

τ_{ce} est la contrainte critique d'érosion.

Le coefficient de Partheniades M et la contrainte critique d'érosion τ_{ce} sont des variables dont les valeurs sont issues des mesures expérimentales. Cependant nous les utilisons comme paramètres d'ajustement du modèle sédimentaire.

Le taux de dépôt D s'exprime :

$$D = W_c \cdot C_b \dots\dots\dots[\text{II.8}]$$

Où :

W_c est la vitesse de chute des sédiments.

C_b est la concentration de sédiments au pied de la colonne d'eau.

La vitesse de chute des sédiments W_c est un paramètre d'ajustement sédimentaire. La concentration de sédiments au pied de la colonne d'eau C_b est calculée par le modèle.

c- Modèle morphodynamique

Le modèle morphodynamique utilisé dans cette étude reste simple. Il a vocation à être complexifié par la suite. Il consiste actuellement à considérer que l'ensemble de la surface du modèle n'est pas érodable. Seuls les dépôts sont érodables.

II.1.1.2. Méthodologie

La chaîne de calcul TELEMAC est codé dans le langage de programmation Fortran 90. Le logiciel TELEMAC-3D résout les équations tridimensionnelles de l'hydraulique à surface libre (avec ou sans l'hypothèse de pression hydrostatique) et de transport-diffusion de grandeurs intrinsèques (température, salinité, concentration, sédiments ...). Ses principaux résultats sont, en chaque point du maillage de résolution, la vitesse dans les trois directions et la concentration des grandeurs transportées. Sur le maillage en surface, le résultat principal est la hauteur d'eau.

TELEMAC-3D trouve ses principales applications en hydraulique à surface libre, maritime ou fluviale (EDF, 2007). TELEMAC-3D résout les équations de Reynolds comme indiqué précédemment.

De manière plus pratique, le logiciel TELEMAC-3D a besoin d'un minima des fichiers suivants pour réaliser un calcul :

- un fichier de géométrie qui est le maillage horizontal ;
- un fichier de conditions aux limites ;
- un fichier des paramètres de calcul.

Le fichier des paramètres de calcul contient l'ensemble des paramètres physiques et numériques nécessaires au calcul. Une description d'un exemple de fichier des paramètres se trouve dans les paragraphes suivants, ainsi que des autres fichiers d'entrée nécessaire au calcul.

Outre ces fichiers, il est possible d'en ajouter d'autres comme le fichier Fortran. Ce fichier reprend une ou plusieurs parties du code source qui peuvent être modifiées par l'utilisateur pour adapter le code à son cas de simulation.

II.1.1.3. Application du modèle

1^{ère} étape

Elle consiste à préparer le MNT, qui est l'acronyme du Modèle Numérique de Terrain. Il est la représentation sur une grille de la topographie de la zone d'étude. On l'obtient par en associant les données topographiques du site (l'information) au maillage (le support numérique).

Puis, on traite les données topographiques ; qui ne sont pas directement exploitables. Une mise en forme orientée pour la modélisation numérique est nécessaire. Ce travail a pour but de créer un fichier de points et un fichier de lignes. Le fichier de points contient les coordonnées de l'ensemble des mesures topographiques réalisées dans le lit majeur. Le fichier de lignes contient les coordonnées de lignes brisées, appelées lignes de contraintes. Ces deux fichiers texte permettent de créer le maillage. Le maillage s'appuie sur les lignes de contraintes pour discrétiser le domaine. Les lignes de contraintes permettent notamment d'imposer une continuité topographique entre deux nœuds de maillage. Ceci permet de privilégier des axes d'écoulement au sein du calcul. Ce travail est réalisé en majeure partie avec un logiciel de S.I.G. (Système d'Information Géographique tel que Mapinfo).

Les grandes étapes de l'exploitation des données topographiques sont énumérées ci-dessous.

- Identification des zones caractéristiques (lit mineur, lit majeur, zones insubmersibles ...),
- Définition de l'emprise géographique du modèle numérique,
- Définition de sections en travers équivalentes,
- Création de lignes de contraintes dans le lit mineur,
- Création de lignes de contraintes secondaires (lit majeur, digues des casiers, épis),
- Exportation des données (points cotés et lignes de contraintes).

2^{ème} étape : Choix de modélisation

Dès l'exploitation des données topographiques, il est nécessaire de faire des choix de modélisation. Dans les paragraphes qui suivent, nous discutons de quelques uns de ces choix :

- *L'emprise du modèle* : qui marque les limites du modèle numérique ont fait l'objet de discussion ;
- *La diffluence* : c'est est un élément important dans la compréhension de l'hydrodynamique de la zone d'étude. Cependant une modélisation correcte de la répartition des débits liquides (a fortiori de la répartition des débits solides) n'est pas triviale. Il faut choisir d'inclure ou non la diffluence dans le modèle. Ne pas modéliser la diffluence permet de s'affranchir de la difficulté de simuler une bonne répartition de débit.
- *Sections équivalentes* : Le travail sur les sections équivalentes est réalisé en vue de l'élaboration des lignes de contraintes. Il est nécessaire de construire des sections en travers qui ont un nombre N de points arbitrairement fixé par le modélisateur. La disposition des N points est régie par trois contraintes qui sont de bien représenter la bathymétrie de la section,

d'engendrer une section mouillée dont la surface est proche de la surface de la section mouillée mesurée et de répartir les N points de manière homogène sur l'ensemble de la section. Cette dernière contrainte résulte des règles permettant d'assurer la stabilité numérique des calculs. Généralement, on ne dépasse pas 20 points.

3^{ème} étape : Maillage

Le maillage est construit avec le mailleur Matisse (EDF, 2004). Il est élaboré grâce aux fichiers de points et de lignes de contraintes. Un point important dans la construction du maillage est le choix des critères de mailles. Ce choix dépend d'une part des objectifs de modélisation et d'autre part de la puissance de calcul disponible. On peut définir trois types de zones à savoir : le lit majeur, le lit mineur et les particularités, avec des critères qui varient d'une zone à une autre ; généralement le lit majeur est une étendue géographique importante, d'autre part il y transite une faible proportion des débits, avec un critère de maille lâche (critère 1). Pour le lit mineur, considérant les arguments opposés (faible étendue géographique, forte proportion des débits en transit, donc forts gradients de vitesses) ; c'est la cellule sédimentaire avec un critère de maille moyen (critère 2). Les particularités étant primordiales pour la compréhension des processus sédimentaires, avec un critère de maille plus dense (critère 3). Le critère résultant pour un point du domaine est défini comme étant le minimum des trois critères. Avec la puissance de calcul actuelle, il est déconseillé de dépasser 20 000 nœuds pour le maillage 2D. Le mailleur produit un fichier de géométrie pour le logiciel TELEMAC-3D.

Prenant l'exemple de la figure.II.1 qui est une visualisation en perspective du MNT. Sur cette représentation, au niveau de la partie amont du chenal du Rhône (Richard.A, 2008-2009) on peut remarquer que le lit mineur est fortement façonné par les lignes de contraintes.

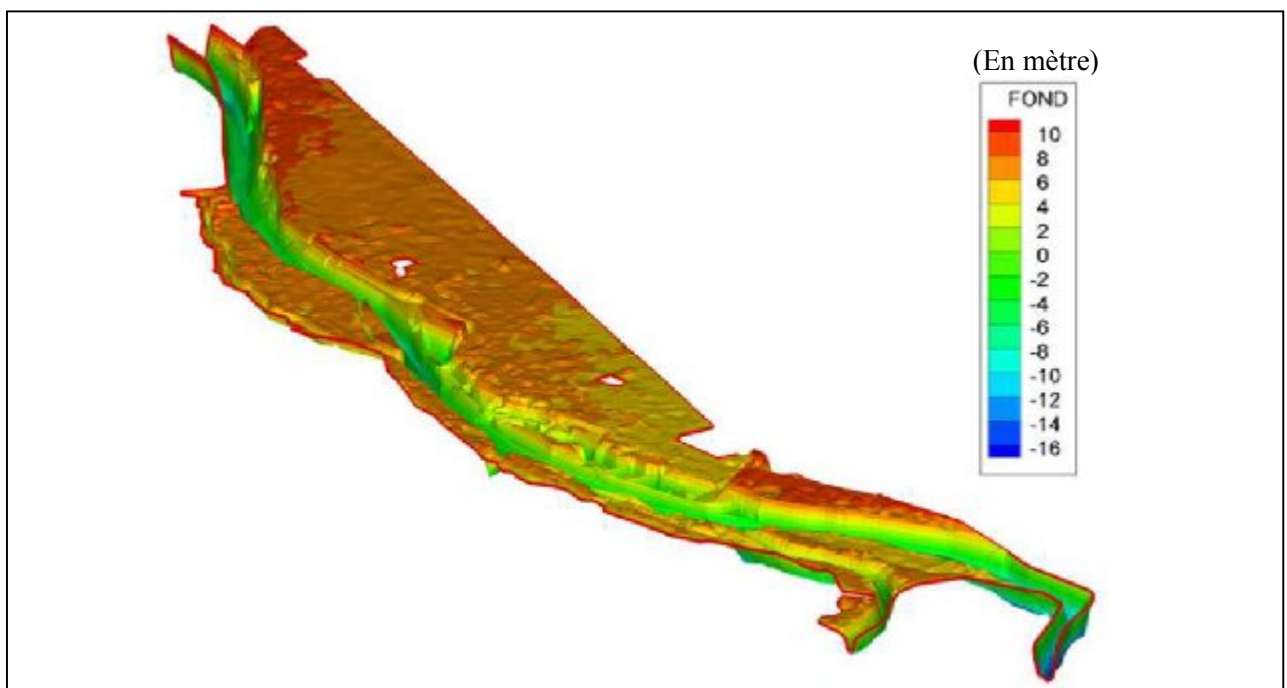


Fig II.1 : Vue 3D du MNT (réalisé par Tecplot, (Richard.A, 2008-2009).

4^{ème} étape : Calage hydraulique

Le calage hydraulique consiste à ajuster les paramètres du modèle numérique afin de simuler au mieux le comportement hydrodynamique du cours d'eau. Dans le cas d'un fleuve par exemple, le seul paramètre de calage est le coefficient de rugosité du lit du cours d'eau. L'ajustement de ce paramètre est possible grâce à des mesures de terrains de différentes natures. Nous les détaillons dans les paragraphes qui suivent. Le calage hydraulique donne aussi une indication sur la qualité de la représentation de la bathymétrie au niveau de la diffluence.

Les paramètres du calcul hydraulique sont au nombre de quatre (Richard.A, 2008-2009) :

- *Conditions initiales et atteinte du régime permanent* : elles sont choisies de manière à écourter le temps de mise en régime de l'écoulement. En utilisant le fichier des frontières liquides (voir annexe B) ; il possible d'imposé une rampe de débit puis un débit fixe pour atteindre le régime permanent ;
- *Conditions limites* : ils sont de deux types. A l'amont, le débit est imposé alors que la hauteur est renseignée comme libre. Inversement, aux deux sorties aval, les hauteurs sont contrôlées alors que les débits sont libres ;
- *Loi de frottement* : le modèle de frottement de Nikuradse est utilisé. La longueur de rugosité équivalente de Nikuradse fait l'objet du calage hydraulique. Pour imposer une première valeur, on se base sur la rugosité de grain : $k'_s = 3.d_{90}$. Au niveau du palier d'Arles, d_{90} varie entre 30 et 50 mm (SOGREAH, 2000b) ;
- *Modèle de turbulence* : on peut choisir comme modèle de turbulence horizontal celui de Smagorinski. Pour celui de turbulence vertical, il possible d'utilisé le modèle de longueur de mélange. Ces deux modèles sont les modèles les plus utilisés à Sogreah pour les études tridimensionnelles.

5^{ème} étape : Calage sédimentaire

Le calage sédimentaire consiste à ajuster les paramètres du modèle sédimentaire pour simuler au mieux le transport, le dépôt et l'érosion des MES. Dans le cas d'un fleuve par exemple, le calage demande d'ajuster la vitesse de chute des sédiments, la contrainte critique d'érosion et le coefficient de Partheniades (Richard.A, 2008-2009). Les mesures de débits solides ne sont pas fréquentes. C'est pourquoi il n'est pas nécessaire d'effectué qu'un calage qualitatif du modèle sédimentaire.

Les paramètres du calcul sédimentaire sont au nombre de trois (Richard.A, 2008-2009) :

- *Conditions initiales* : le calcul sédimentaire s'appuie sur un calcul hydraulique stabilisé. Initialement il n'y a pas de dépôts sédimentaires dans le domaine de calcul. Partant sur l'hypothèse que la bathymétrie du MNT représente une situation sédimentaire stable. On rappelle que les fonds du modèle ne sont pas érodables. De plus, la concentration de sédiments dans la colonne d'eau est nulle ;

- Conditions limites sédimentaires : aux frontières liquides, les conditions limites sédimentaires sont exprimées en masse de sédiments par volume d'eau transitée ;
- Caractéristiques du matériau sédimentaire : comme précédemment indiqué, le sédiment modélisé est considéré cohésif. La contrainte critique d'érosion τ_{ce} , le coefficient de Partheniades M et la vitesse de chute des sédiments W_c sont les paramètres caractéristiques qui définissent le sédiment pour une simulation donnée (Richard.A, 2008-2009). Le calage sédimentaire a pour but d'ajuster ces paramètres. Les paramètres de référence qu'on doit utiliser sont ceux qui se rapprochent le plus du cas d'étude, issus d'études préalables, basées sur des sondages carottés au niveau de la même zone. En effet, Un écoulement hydraulique est appliqué sur la carotte de sédiments. Les caractéristiques de l'écoulement sont contrôlées : dimensions du canal connues, débit liquide imposé. La turbidité de l'eau est mesurée à l'aval de l'échantillon. En comparant la variation observée de la turbidité à la variation imposée du débit, on peut déduire les paramètres de la loi de Partheniades pour l'échantillon en question (Ternat, 2007, p. 129).

II.1.2. Modèle de Gao et Collins (1994)

En se basant sur le principe de la méthode de Mc Laren, Gao et Collins proposent un modèle de transport sédimentaire spatial plus représentatif. La méthode d'analyse de Gao et Collins (1991, 1992, 1994a et 1994b) consiste à effectuer des prélèvements de sédiments superficiels selon un quadrillage régulier. Cette méthode est basée sur la probabilité d'occurrence d'une direction nette de transport en fonction des points de prélèvements adjacents. Ce modèle permet d'obtenir une carte de représentation des directions de transport sédimentaire potentiel, dans laquelle la probabilité de transport entre deux points d'échantillonnage est proportionnelle à la longueur du vecteur résiduel (Bertier, 2009).

II.1.2.1. Principe du modèle

Le principe du modèle repose sur le postulat que la répartition des sédiments sur le fond résulte des processus de transport sédimentaire (Mc Laren, 1981 ; Mc Laren et Bowles, 1985 ; Gao et Collins, 1990, 1992 in Cordier, 2007). L'érosion, le transport par traction, saltation ou suspension, le dépôt sélectif ou total ainsi que le mélange de sédiments en provenance de différentes sources, sont à l'origine de la variation de la distribution spatiale des paramètres granulométriques. Les directions privilégiées du transport sédimentaire peuvent être décrites par l'évolution de la taille moyenne (M_z), du tri (S_o) et de la symétrie de la distribution sédimentaire (S_k) (Mc Laren, 1981).

II.1.2.2. Méthodologie

1^{ère} étape

Elle consiste à calculer les indices granulométriques en unités de « Phi ». Les trois paramètres granulométriques usuels utilisés en sédimentologie sont : la taille moyenne des sédiments (M_z), l'indice de tri (S_o), l'indice de symétrie de la distribution (S_k). Le de calcul de ces paramètres sont

possible par les formules de Folk et Ward (1957) qui nécessite l'élimination de la fraction coquillère 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 paléo-écoulement (Losson et Corbonnois 2006). où qui est le logarithme à base de 2 du diamètre D en millimètre ; on l'obtient par la formule [II.9] :

$$\boxed{= \frac{+}{+}} \dots\dots\dots[\text{II.9}]$$

- **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). ce paramètre est calculé par la relation [II.10] :

$$\boxed{= \frac{-}{+} + \frac{-}{.}} \dots\dots\dots[\text{II.10}]$$

- **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). Il peut être calculé par la formule suivante [II.12] :

$$\boxed{= \frac{+}{(-)} + \frac{+ ()}{(-)}} \dots\dots[\text{II.1}]$$

2^{ème} étape

Une distance critique doit être ensuite déterminée entre les stations de l'échantillonnage. Il s'agit de la distance maximale qui existe entre deux échantillons voisins en prenant en compte l'ensemble des échantillons prélevés. Cette distance permettra à la suite de distinguer les échantillons qui seront considérés comme voisins lors des étapes ultérieures. Si la distance entre deux échantillons est inférieure à « D_{Ct} », les deux sites seront alors considérés comme voisins.

3^{ème} étape

Cette étape est une sorte de comparaison des trois paramètres déjà calculés ; 2³ cas possibles peuvent apparaître entre un échantillon et son voisin, reconnu par le modèle de Gao et Collins (1992) :

- 1 $Mz_1 \geq Mz_2$; $So_1 \geq So_2$; $Sk_1 \leq Sk_2$
- 2 $Mz_1 \leq Mz_2$; $So_1 \geq So_2$; $Sk_1 \geq Sk_2$
- 3 $Mz_1 \geq Mz_2$; $So_1 \geq So_2$; $Sk_1 \geq Sk_2$
- 4 $Mz_1 \leq Mz_2$; $So_1 \geq So_2$; $Sk_1 \leq Sk_2$
- 5 $Mz_1 \geq Mz_2$; $So_1 \leq So_2$; $Sk_1 \leq Sk_2$
- 6 $Mz_1 \leq Mz_2$; $So_1 \leq So_2$; $Sk_1 \geq Sk_2$
- 7 $Mz_1 \geq Mz_2$; $So_1 \leq So_2$; $Sk_1 \geq Sk_2$
- 8 $Mz_1 \leq Mz_2$; $So_1 \leq So_2$; $Sk_1 \leq Sk_2$

Partant du principe que le dépôt est mieux trié dans la direction du transport sédimentaire, deux cas d'évolution peuvent alors être rencontrés, qui représentent avec une plus grande probabilité les réelles tendances de transport sédimentaire, les transports de type FB- et CB+ (Gao et al, 1994 in Mezouar, 2009). Le tableau V.1 définit ces deux cas de transport et présente les relations requises par les paramètres granulométriques, exprimés en unité phi (ϕ), pour un transport allant d'une station A vers une station B.

Tab.II.1: Relations entre les paramètres granulométriques (en unité de phi) de deux station A et B, pour un transport sédimentaire de A vers B, de type FB- et CB.

Cas	Définition	Relations
FB-	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 ϕ).	$Mz_1 \leq Mz_2$ $So_1 \geq So_2$ $Sk_1 \geq Sk_2$
CB+	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 ϕ).	$Mz_1 \geq Mz_2$ $So_1 \geq So_2$ $Sk_1 \leq Sk_2$

Le cas FB- correspond à des processus de transport de faible énergie et le cas CB+, des processus de forte énergie.

4^{ème} étape

Elle consiste à esquisser une première carte vectorielle à partir des échantillons qui répondent au 1^{er} et 2nd cas. Tous les vecteurs ont alors la même longueur car il n'est pas à ce stade d'analyser de déterminer une indication plus ou moins forte d'un transport à l'aide des trois indices granulométriques utilisés.

5^{ème} étape

Quand la relation pour un transport FB- ou CB+ est respectée (tableau II.1), un vecteur de transport est assigné au point de calcul. Le transport total est obtenu en sommant et en moyennant tous les vecteurs de transport obtenus pour une même station. Dans ce cas la résultante \vec{R} de ces vecteurs peut s'exprimer par [II.13] :

$$\vec{R}(x, y) = \sum_{n=1}^n \vec{r}(x, y) \dots \dots \dots [\text{II.13}]$$

Avec :

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

Puis, on passe à l'étape des vecteurs transport (modèle résiduel) : cette étape permet aux autres sites sans vecteurs, qui ne dépendent pas au deux cas, de leur allouer des vecteurs, le calcul de ces vecteurs est obtenu par l'équation suivante [II.14]:

$$\vec{R}_{av}(x, y) = \frac{1}{K+1} + \left[\vec{r}(x, y) + \sum_1^K \vec{R}_j \right] \dots \dots \dots [\text{II.14}]$$

$\vec{r}(x, y)$: le vecteur des points sélectionnés; \vec{R}_j vecteurs voisins ; K : nombre totale de sites voisins ayant impérativement un voisin

C'est le logiciel GSTA qui s'occupe de ces calculs, pour en tirer un tableau, qu'on peut schématiser et obtenir les tendances aux transports.

Cette méthode n'a pas pu être appliquée dans notre zone d'étude vu l'absence de données sédimentologique au niveau du site de Sidi Ghiles.

a- Limites de calcul des tendances

- La pertinence du choix de D_{cr} ; en effet, il faut bien choisir cette distance.
- 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 D_{cr} (Le Roux, 1994a, 1994b *in* Mezouar, 2009).

II.2. Quantification des transports longitudinaux

Dans la zone littorale, des quantités importantes de sables 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 le sédiment (Masselink et *al*, 2006).

II.2.1. Méthodologie

La méthodologie d'estimation des transits sédimentaires repose en premier lieu sur l'identification des cellules sédimentaires, entre lesquelles s'organise le transport longitudinal, dans le cadre d'un système fermé à ses deux extrémités ainsi que vers la terre et le large (Drapeau et Mercier, 1990). La notion de cellule sédimentaire, appelée aussi cellule de dérive littorale, s'est imposée avec l'objectif de caractériser à court et long termes les évolutions longitudinales des transits sédimentaires littoraux. Elle a tout d'abord été développée par J.P. May et W.F. Tanner (1973) à partir de la notion de distribution de l'énergie des houles (et du courant de dérive littorale) le long d'un rivage.

Une cellule est souvent définie comme un compartiment côtier qui contient un cycle complet de sédimentation comprenant une zone source (d'érosion), une zone en équilibre dynamique puis une zone en accrétion. Elle a fait l'objet de remaniements et de compléments méthodologiques et conceptuels (Komar, 1985 ; Carter *et al.*, 1990) qui ont notamment permis d'affiner la définition des limites de ces cellules. M.J. Bray *et al.* (1995) ont établi une typologie et une méthodologie pour définir les différentes limites de cellule et en distinguent deux groupes.

Les limites fixes correspondent à un obstacle physique, naturel (cap, estuaire, embouchure) ou anthropique (jetée portuaire, brise-lame, digue). Les limites mobiles ou libres se rencontrant le plus fréquemment sur les littoraux ouverts, correspondent à des instabilités ou des réponses morphologiques à une variation d'une composante gérant le transit sédimentaire.

La cellule sédimentaire étudiée constitue la plage Centre de la commune de Sidi Ghiles ; depuis sont trait de côte jusqu'à la profondeur limite de déferlement c'est-à-dire à -10 m de profondeur.

Durant ces dernières décennies plusieurs formules de transport sédimentaire dans la zone de déferlement de la houle ont été développées . Le plus souvent, ces formules de transport sont nées de travaux réalisés en laboratoire, ne prenant en compte que les houles qui se propagent dans le même sens que les courants ; on cite : LCHF (1973), CERC (1973), KAMPHUIS *et al* (1986) et VAN-RIJN (1990) :

II.2.1.1. Formule du L.C.H.F (1973)

Les ordres de grandeur du volume déplacé des sédiments parallèlement à la côte (transit littoral) peuvent être évalués à partir de différentes formules dont la plus utilisée est la formule [II.6] de Sauvage de Saint-Marc et de Vincent « LCHF » :

$$Q = K/C g H_s^2 T. t (\alpha) \dots\dots[II.6]$$

Dont les paramètres sont :

Q : volume de sable transporté (en m³)

K : coefficient de transport du sable (2.5x10⁻⁶)

g : accélération de la pesanteur (en m/s²).

C : cambrure.

H_s : amplitude significative de la houle (en m)

T : période de la houle (en seconde).

t : durée d'action de la houle (en seconde).

f(α) : fonction de l'obliquité "α" de la crête de la houle avec la côte.

L'utilisation de cette formule conduit à déterminer d'abord :

I. Le bilan énergétique annuel de transport caractérisé par : H_s². T.t,

On aura alors à suivre les étapes suivantes pour définir les paramètres H_s, T et t

1. Déterminer les amplitudes H_s :

i. Calculer la fréquence d'apparition « f_{ri} » de la houle par période et par direction :

Elle est donnée par la formule suivante [II.7] :

$$f_{ri} = \text{nombre de cas d'apparition (par direction et par période)} / 8870 \quad \text{..[II.7]}$$

En effet : la valeur 8870 correspond au nombre total d'apparition des houles, pour toute direction et période confondu. f_{ri} n'a pas d'unité, elle représente un nombre.

ii. Déterminer la moyenne des fréquences d'apparition P_n qui est égale à [II.8] :

$$P_n = \sum f_{ri} / n \quad \text{.....[II.8]}$$

Avec :

n = nombre de fois où la houle ayant une amplitude comprise dans les intervalles suivant : [0- 2 m], [2,5- 4 m], [5- 9 m].....et ayant la même période ; par exemple : la houle du secteur N45° ayant une amplitude comprise entre 0 et 2 m et ayant une période de 6 secondes, son n est égale à 5. P_n n'a pas d'unité, elle représente un nombre.

iii. Calculer les amplitudes H_s :

A partir des droites de régression logarithmiques qui représentent les amplitudes H_s observées en fonction des fréquences d'apparition $f_{ri} : f(f_{ri}) = H_s$ observées, les amplitudes H_s à la côte sont déterminées. En effet, on obtiendra des courbes de tendances de la forme suivante :

$H_s = A \ln(P_n) + B$; il suffit alors de remplacer alors les valeurs de A, B (déterminés des droites de régression) et P_n (calculée auparavant). H_s est exprimée en mètres.

2. T représente la période, puisqu'on calcule le transit annuel, donc on utilisera les périodes de 6, 8 et 10 secondes. Ce qui fait que pour chaque direction, trois périodes sont utilisés.

3. Détermination de la durée t :

i. Calculer des fréquences d'observation F :

Elle est déterminée en utilisant la formule suivante [II.9] :

$$F \% = \sum (\text{nombre de cas pour chaque} / 8870) \times 100 \quad \text{..[II.9]}$$

F est exprimé en pourcentage.

ii. Calcul de la durée t :

La durée d'action de la houle d'un secteur donné est obtenue en utilisant la formule suivante [II.10]:

$$t = (365j \times 24h \times 3600s / 100) \times F\% \quad \text{.....[II.10]}$$

Elle est exprimée en secondes.

Une fois que tous ces paramètres sont obtenus, le bilan énergétique peut être défini.

II. Trouver l'angle « α » et la fonction ()

La fonction (α) liée à la l'obliquité de la houle $(\alpha) = \text{Sin } 7/4 (\alpha)$.

Pour déterminer théoriquement le transit le long de la côte qui est directement lié à la direction de la houle au large, il est nécessaire d'évaluer l'angle (α) et la fonction (α) qui en découle. Cette obliquité de la houle avec la ligne de rivage étant supposée mesurée par profondeur de 15 à 20 m, dans notre étude α a été déterminée pour la profondeur de 10 m.

L'angle α est déterminé par la méthode suivante :

- $\alpha = \text{angle crête de la houle - côte} = 180^\circ - (90^\circ + \beta)$.
- $\beta = \text{angle orthogonale - côte}$.
- $\sigma = \text{angle orthogonale - Nord}$.

a- Formule de CERC (1973)

Cette formule purement empirique, s'applique pour des côtes rectilignes avec des pentes régulières, elle se base sur le bilan énergétique transféré à la côte par les houles. Cette formule [II.11] s'énonce :

$$Q = n_{br} \cdot H_{br}^3 \cdot \sin(\theta_{br}) \quad \dots\dots[II.11]$$

Avec :

Q = sédiment transporté parallèlement à la côté en m³/an.

H_{br} = hauteur de la houle significative à la ligne de déferlement.

n_{br} = coefficient relatif à la ligne de déferlement.

θ_{br} = angle d'incidence de la houle au niveau de la ligne de déferlement en degrés.

Si on prend :

$$h_{br} = \frac{H_{br}}{2} \quad \dots\dots[II.12] \quad \text{et} \quad \theta_{br} = \frac{\theta_{br}}{2} \quad \dots\dots[II.12]$$

h_{br} = profondeur de l'eau dans la zone de déferlement.

L'équation [II.11] devient :

$$Q = n_{br} \cdot \left(\frac{H_{br}}{2}\right)^3 \cdot \sin\left(\frac{\theta_{br}}{2}\right) \quad \dots\dots[II.11]$$

b- Formule de VAN RIJN (1990)

Cette formule [II.12] se vend plus complète que celle de L.C.H.F, elle donne la quantité des sédiments total qui est la somme des transports par charriage (Q_c) (par saltation et roulement) et par suspension (Q_s) :

$$Q_t = Q_c + Q_s \quad \dots\dots\dots[II.12]$$

Où :

Q_t = transport total.

Q_c = transport par charriage.

Q_s = transport par suspension.

Le transport par charriage Q_c est donné par [II.13] :

$$Q_c = \frac{Q_t \cdot \sin(\theta_{br})}{\sin(\theta_{br})} \quad \dots\dots\dots[II.13]$$

Avec :

T= paramètre de cisaillement sur le fond.

D* = diamètre adimensionnel.

Le transport par suspension Q_s est calculé par [II.14] :

$$Q_s = (F_c + F_h) \cdot C_a \cdot \dots \dots \dots [II.13]$$

Où :

F_c et F_h = sont des facteurs de correction relatifs au courants et houles.

C_a = concentrations a un niveau de référence.

Le transport total est évalué comme la somme vectorielle des transports liés à la houle et aux courants.

L'application de cette formule exige des moyens matériels importants pour l'estimation in-situ d'un certain nombre de paramètres. Ce qui a répondu son application difficile dans notre zone d'étude.

c- Formule de KAMPHUIS et al (1986)

Développé par KAMPHUIS en 1986, elle s'énonce comme suit [II.14] :

$$Q_s = \dots \dots \dots (\dots) \dots \dots \dots [II.14]$$

On obtient [II.15] :

$$Q_s = \frac{\dots}{[(\dots) \times \dots]} \dots \dots \dots [II.15]$$

Où :

S = quantité de sédiments transportés parallèlement à la côte (en m³/an).

Q = quantité de sédiments transportés parallèlement à la côte (en m³/s).

D₅₀ = diamètre moyen des grains.

P = porosité.

H = hauteur de la houle.

T = période (en secondes).

ρ_s = masse volumique du grain solide.

ρ_w = masse volumique de l'eau de mer.

θ_0 = angle d'incidence de la houle au large.

$\varepsilon = 0,575$.

Puis, on suit les étapes déjà mentionnées dans l'évaluation des transports sédimentaires dans la formule du LCHF ; à savoir le calcul des fréquences d'apparition, la détermination de l'angle d'incidence...

*Application de la
Formule du L.C.H.F*

Chapitre III : Application de la formule du L.C.H.F (1986)

Avant d'appliquer cette formule, on va détailler un peu la sédimentologie de la zone d'étude, en présentant une étude sédimentologique obtenue suite à des études antérieures dans des régions adjacentes :

III.1. Etude sédimentaire

Suite à l'observation de la carte obtenue (Fig N°18) par le LEM, on note que :

- Le secteur de la zone d'étude présente un espace meuble avec une prédominance d'un sable grossier dont le diamètre moyen (D50) est compris entre 500 et 2000 μm .
- Un sable très grossier ($2000 \mu\text{m} < D50 < 10500 \mu\text{m}$) au niveau de la partie Ouest de la zone d'étude qui est plaqués contre la côte aux niveaux des profondeurs comprises entre les isobathes 0 et -5m.

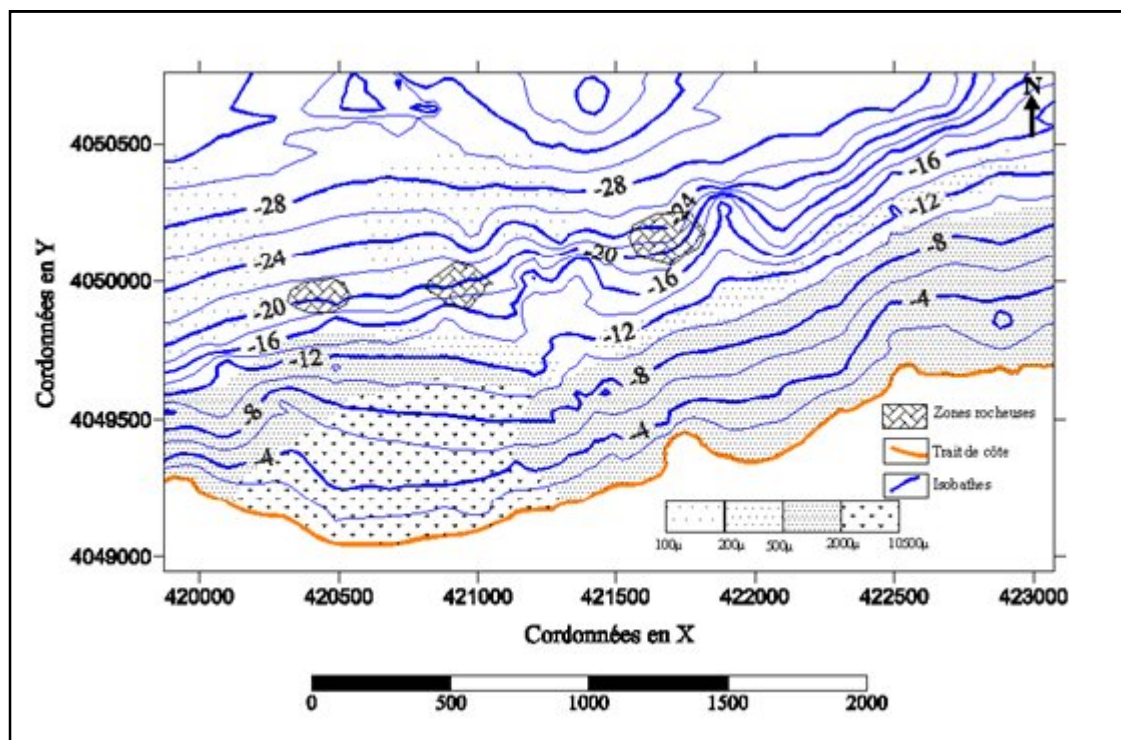


Fig.III.1 : Répartition spatiale de la médiane granulométrique entre Cherchell et Sidi Ghiles (Mouhoubi et Ouabel, 2012).

III.2. Estimation du bilan énergétique

III.2.1. Détermination de l'amplitude H_s

a- Fréquences et les moyennes d'apparition f_{ri} et P_n

En utilisant le tableau du document de l'U.S. Naval Weather Command intitulé « Summary of Synoptic Meteorological Observations » (S.S.M.O tome II, Zone Algiers (1963-1970), où les houles sont classées en fonction de leur période, de l'amplitude au large ainsi que du nombre de leur apparition et ceci par direction. Ces données sont traitées pour obtenir les fréquences f_{ri} et les moyennes P_n (présentées dans l'annexe 6).

Dans chaque calcul, les résultats sont donnés par secteur et par période :

Tab.III.1 : Résultats du calcul des fréquences d'observation f_{ri}

Hs observée	Nombre d'observation >Hs			f_{ri} fréquence d'observation		
	N 360°	N 315°	N 45°	N 360°	N 315°	N 45°
0	758	582	1627	0,09	0,07	0,18
0,25	495	400	1012	0,06	0,05	0,11
0,75	347	253	550	0,04	0,03	0,06
1,25	270	172	353	0,03	0,02	0,04
1,75	229	131	284	0,03	0,01	0,03
2,25	204	112	259	0,02	0,01	0,03
2,75	190	105	251	0,02	0,01	0,03
3,25	187	100	246	0,02	0,01	0,03
3,75	182	97	241	0,02	0,01	0,03
4,25	179	0	236	0,02	0,00	0,03
4,75	0	0	236	0,00	0,00	0,03
5,25	0	0	236	0,00	0,00	0,03
5,75	0	0	236	0,00	0,00	0,03
6,25	0	0	236	0,00	0,00	0,03

Tab.III.2 : Résultats du calcul des moyennes d'apparition P_n

Direction :	Période (s)		
	6	8	10
N360	0,05	0,02	0,00
N315	0,03	0,01	0,00
N45	0,09	0,03	0,03

b- Résultat du calcul des amplitudes H_s

En traçant les droites de régression logarithmiques qui représentent les amplitudes H_s observées en fonction des fréquences d'apparition f_{ri} : $f(f_{ri}) = H_s$ observées (annexe 7), H_s est déterminée en utilisant les équations des courbes de tendances tracées par direction et par période

Tab.III.3 : Résultats du calcul de H_s par direction et par période

Direction	Période (s)		
	6	8	10
N360°	$H_s = -1,43 \ln(P_n) - 3,703$ $H_s = 0,66$	$H_s = -12,5 \ln(P_n) - 45,29$ $H_s = 2,70$	$H_s = -0,92 \ln(P_n) + 0,628$ $H_s = 5,70$
N315°	$H_s = -1,16 \ln(P_n) - 3,287$ $H_s = 0,61$	$H_s = -10,1 \ln(P_n) - 42,22$ $H_s = 2,73$	0
N45°	$H_s = -0,96 \ln(P_n) - 1,759$ $H_s = 0,59$	$H_s = -20,9 \ln(P_n) - 71,64$ $H_s = 3,05$	$H_s = -3,26 \ln(P_n) - 6,591$ $H_s = 5,23$

III.2.2. Résultat du calcul de la durée d'action t **III.2.2.1. Calcul des fréquences d'observation $F\%$**

Le tableau suivant récapitule les fréquences d'observation de la houle par période et par direction :

Tab.III.4 : Résultats du calcul des fréquences d'observation F% par direction et par période

Direction	Période (s)		
	6	8	10
N 360°	7,98	0,53	0,03
N 315°	6,18	0,38	0,00
N 45°	17,80	0,48	0,06

III.1.2.2. Calcul de la durée t :

Le tableau suivant récapitule les durées d'action de la houle par période et par direction :

Tab .III.5 : Résultats du calcul des durées d'action t de la houle par direction et par période

Direction	Période (s)		
	6	8	10
N 360°	2517191,43	167101,69	10666,07
N 315°	1948334,61	120882,07	0
N 45°	5613905,75	152880,27	17776,78

Ainsi, les bilans énergétiques par direction et par période sont représentés dans le tableau récapitulatif suivant :

Tab .III.6 : Résultats du calcul du bilan énergétique de la houle par direction et par période

Direction	Période (s)			TOTAL
	6	8	10	
N 360°	6567610,37	9769424,49	3464776,78	19801811,64
N 315°	4385445,00	7226769,69	0,00	11612214,69
N 45°	11855979,23	11377121,19	4865644,52	28098744,93
			Total	59512771,27

III.2.3. Détermination de l'angle α

L'angle α a été déterminé manuellement, l'illustration est représentée dans la figure 5. Les angles obtenus ainsi que leurs fonctions $f(\alpha)$ sont récapitulés dans le tableau suivant :

Tab.III.7 : Résultats du calcul des angles α et des fonctions $f(\alpha)$ par direction et par période

Direction		Période (s)		
		6	8	10
N 360	α	14	15	13
	$f(\alpha)$	0,414693243	0,44228869	0,386710962
N 315	α	-25	-20	-16
	$f(\alpha)$	-0,691513056	-0,573576436	-0,469471563
N 45	α	54	48	41
	$f(\alpha)$	0,996917334	0,994521895	0,949699126

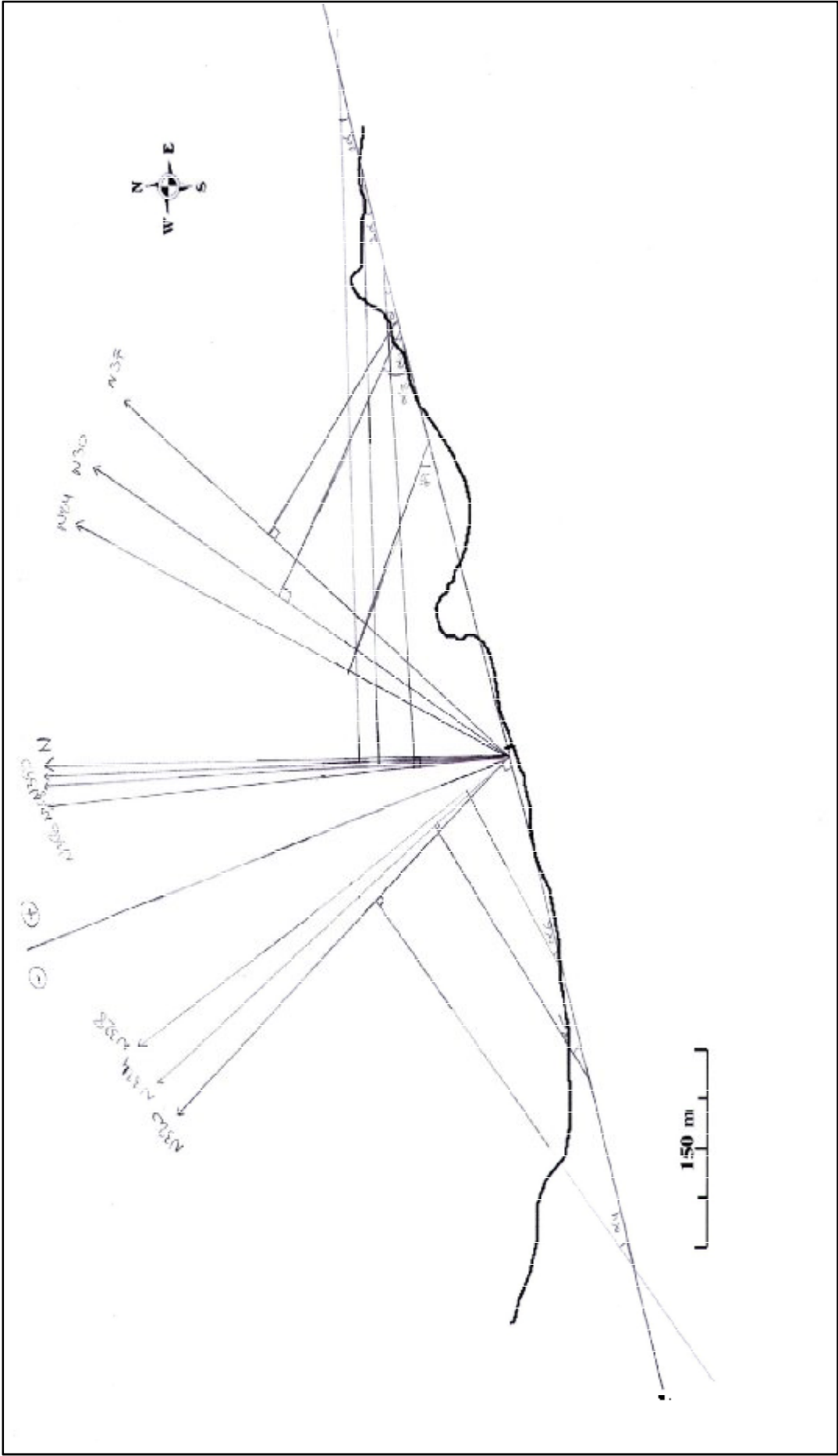


Fig .III.2 : Détermination de l'angle α .(Mouhoubi et Ouabel, 2012).

III.3. Estimation du transport sédimentaire

Le bilan est ainsi calculé, le tableau suivant récapitule le transit sédimentaire par direction et par période, ainsi que le transit sédimentaire global :

Tab.III.8 : Estimation du transit sédimentaire global

Direction	Période (s)			TOTAL
	6	8	10	
N 360°	2226,50	3532,34	1095,34	6854,18
N 315°	-2479,14	-3388,62	0	-5867,77
N 45°	9662,39	9249,85	3777,58	22689,82
			TOTAL	23676,23

Conclusion

Le transit littoral a été estimé à 23676 m³/an, dirigé de l'Est vers l'Ouest, c'est ce qui explique l'érosion observée dans la plage de Sidi Ghiles. En effet, cette dérive qui est due à la prédominance des vents de secteur Nord-Ouest, induit par conséquent des courants de retour assez puissant dirigé vers le Nord-Ouest qui arrachent les sédiments de la plage et les déposent au large (Figure.III.2).

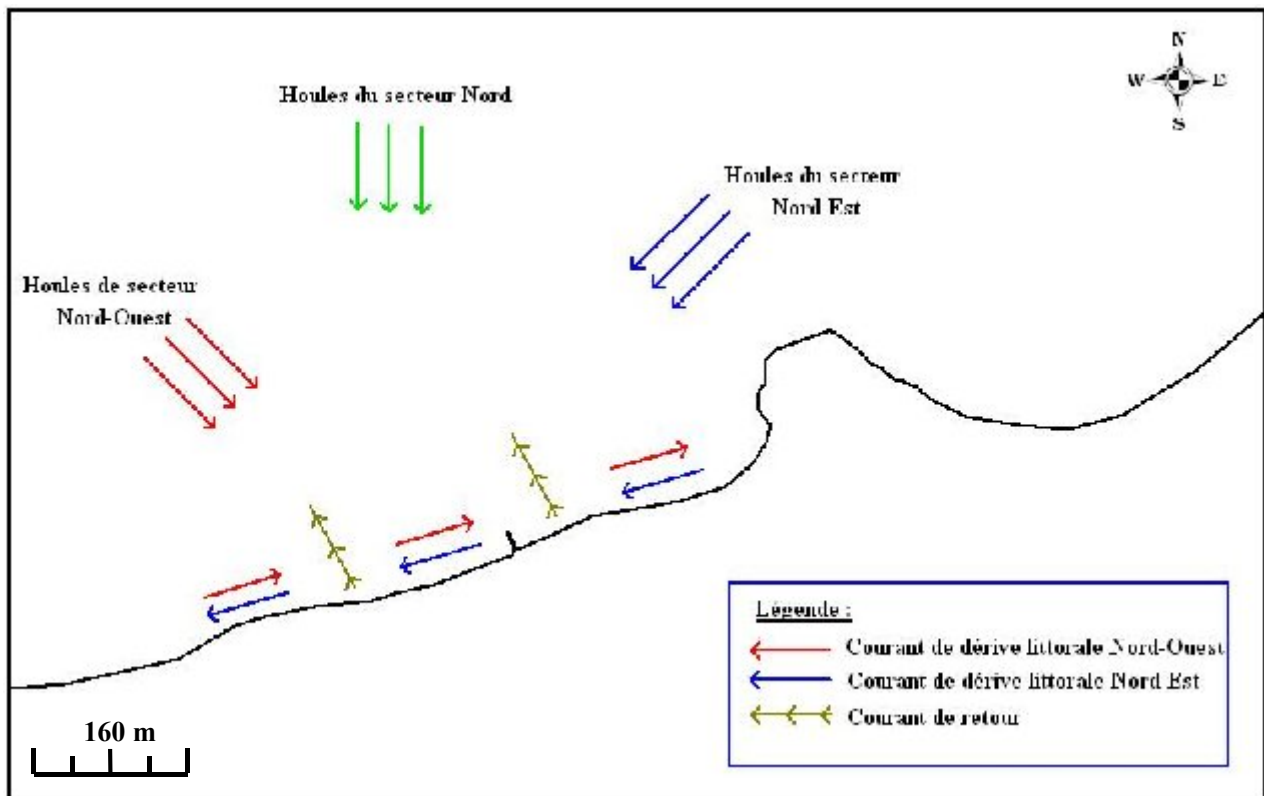


Fig.III.3 : Schéma probable de l'hydrodynamisme dans la zone d'étude (Mouhoubi et Ouabel, 2012).

*Conclusion et
Perspectives de l'Etude*

Conclusion et perspectives de l'étude

Ce travail constitue une contribution à la modélisation du transport sédimentaire en milieux côtiers et estuariens, et en particulier sur les phénomènes turbulents et de sédimentation. Pour ce dernier, une étude bibliographique de la modélisation a été réalisée (Barbay, 2000). Elle visait à répondre aux objectifs suivants :

- construire une thèse qui pourrait constituer un recueil concernant le transit sédimentaire : l'explication des différentes techniques et formules pour modéliser et de quantifier ces flux ;
- Ainsi que de clarifier quelques notions qui étaient auparavant plus ou moins méconnues (chapitre II) ;
- Appliquer une formule comme celle du LCHF dans le cas d'étude pris qui est celui de la plage centre de Sidi Ghiles (chapitre III)

Les résultats obtenus aurait pu fait l'objet d'une comparaison entre les différentes techniques et logiciels détaillés mais faute de manque de données, on s'est arrêtée au niveau de la formule empirique du LCHF, qui donne des résultats assez fiable, quoique la négligence de certains paramètres dans cette formule la laisse, un peu incomplète.

Cette étude peut bien évidemment être améliorée. Tout d'abord, il serait intéressant de réaliser de vraies simulations pour une gamme étendue de débits et en utilisant des logiciels tels que TELEMAC 3D. Ceci permettrait d'obtenir une vision plus globale du comportement hydrosédimentaire du modèle numérique. Simultanément, il me semble qu'il faudrait travailler à l'amélioration du modèle morphodynamique : rendre les fonds érodables, définir les paramètres de la loi d'érosion comme fonction de l'espace, prendre en compte le tassement des sédiments. Ce développement passe par une collaboration plus étroite avec des organisations pointues dans ce domaine. Cette interaction croissante est prévue car cette étude ne se situe qu'au début d'un projet de recherche étendu et plus vaste. Le travail synthétisé dans ce rapport donne une base exploitable pour la suite d'une éventuelle recherche.

Les perspectives de l'étude sont nombreuses. Il pourrait être intéressant de construire un nouveau MNT correspondant à la bathymétrie de la plage centre de Sidi Ghiles datant de 2012 (premières investigations dans cette zone). Ensuite, il faudrait définir des événements caractéristiques sur le plan sédimentaire et morphologique. Ceci permettrait de simuler ces différents événements pour tenter de reconstituer l'historique des dépôts de cette région.

Bibliographie

Ouvrages et Thèses :

- ANAT, 2012.** Plan d'aménagement du territoire de la wilaya de tipaza, p23-40, 54-58, 70.
- Bagnold.R.A, 1973.** The nature of saltation and « bed-load » transport in water, in proceeding of the royal society, p 473-504.
- Belleudy.P, Lefort.P, 2001.** La continuité sédimentaire et sa rupture. SHF-Lyon.
- Belloulou.B, Gana.A, 2012.** Etude d'une protection pour la plage de Hadjret El-Nouss. *Mémoire d'ingénieur, ENSSMAL, 2012.*
- 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, Université du Littoral Côte d'Opale, Dunkerque, p 303.*
- Boillat.J.L, Martinerie.R, Garcia.J, De Cesaire.G, 2008.** La gestion sédimentaire en milieu alpin. Transport solide et gestion des sédiments en milieux et urbains. *La houille blanche /N°04-2008.*
- Bruneau.N, 2009.** Modélisation morphodynamique des plages sableuses. *Thèse de doctorat, Université de Bordeaux I.*
- Chaibi.M, Sabatier .F, Maanan.M, 2009.** Quantification de transport sédimentaire longshore : Application à la baie d'El Haouzia (région d'El Jadida, Maroc), *Université Cadi Ayad/ Bulletins de l'Institut Français.*
- Chamley.H, 1987.** Sédimentologie. *DUNOD, Paris, p 175.*
- Chauchat.J, 2007.** Contribution à la modélisation diphasique du transport sédimentaire en milieux côtiers et estuariens. *Thèse de doctorat, Université de CAEN/Basse-Normandie.*
- Choon.L.K, 2007.** Modeling tide and storm surge in the east coast of penninsular Malaysia. Université Sains Malaysia.
- De Linares.M, 2007.** Modélisation numérique bidimensionnelle du transport solide et de la dynamique fluviale. *Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier – Grenoble, p7-15, 19-22.*
- Ehrhold.A , Guillou.S, Auffret. J.P, Garlan.T, Dan Nguyen.K, 2003.** Modélisation des flux sédimentaires charriés dans la baie du Mont-Saint-Michel (Manche, France). *Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS and Ifremer/CNRS/IRD.*

Fernane.M.A, 2003. Utilisation d'un modèle mathématique vectorielle de Gao & Collins (1994) dans les petits fonds d'une plage de la rive sud de la méditerranée Azur Plage (Algérie). *Mémoire d'ingénieur, ISMAL.*

Gao. S, Collins. M, 1994a. Analysis of grain-size trends for defining sediment transport. *Journal of Coastal Research* , p10 (1), 70-78.

Gao. S, Collins. M, 1992. Net sediment transport patterns inferred from grain-size. *Sedimentary Geology* , p80, 47-60.

Gao. S, Collins. M, 1994b. Net sediment transport patterns inferred from grain-size trends, based upon definition of "transport vectors"-reply. *Sedimentary Geology* , p 90, 157-159.

Gerder.F, 2007. Hydrodynamique du golf d'Aigues-Mortes : Mesures in-situ et modélisation. *Mémoire de master, Université de Toulon et du Var.*

Ghezali.F, 2004. Dynamique sédimentaire dans la zone de déferlement de la houle : application du modèle mathématique vectoriel de Mc Laren et Bowles développé par Gao et Collins entre le port de Jijel et oued Jenjen. *Mémoire d'ingénieur, ISMAL.*

Grasso.F, 2009. Modélisation physique de la dynamique hydro-sédimentaire des plages. *Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier – Grenoble, p81-103.*

International Atomic Energy Agency (IAEA), 2003. Collection and preparation of bottom sediment samples for analysis radionuclides and trace element. *Vienna (ISBN 92-0-109003-X ; ISSN 1011-4289).*

Kamphuis .J.W, 1991. Alongshore sediment transport rate. *J. Waterways, Port, Coast. Ocean. Eng* , p 117, 624–640.

Komar.P, Inman.D, 1970. Longshore sand transport on beaches. *Journal of Geophysical Research* , p 75, 227-230.

Laoudi.M, Zargouni.F, 2009. Modélisation topo-bathymétrique et transit sédimentaire « Exemple des plages sableuses de la baie de Tunis (Nord-Est de la Tunisie) ». *Géomorphologie : relief processus, environnement.*

Layoune.A, Tiguercha.D, 2011. Application de la modélisation numérique pour l'étude de l'ensablement du port de cap Djinet. *Mémoire d'ingénieur, ENSSMAL, p45, 54-56, 66-68.*

Logiciel TELEMAC-3D version 5.8, 2007. Système de modélisation TELEMAC (hydrodynamique tri-dimensionnelle). Manuel d'utilisateur.

Losson.B , Corbonnois.J, 2006. Les modes de sédimentation détritique: nouvelle méthode de détermination appliquée à des remplissages endokarstiques. *Geologica Belgica* ,p 9 (3-4), 257-265.

Martin.L, 2009. Fonctionnement écologique de la seine à l'aval de la station d'épuration d'Achères : Donnée expérimentale et modélisation bidimensionnelle. *Thèse de doctorat, Ecole de Mines de Paris.*

Masselink.G, Kroon.A, Davidson-Arnott.R.G, 2006. Morphodynamics of intertidal bars in wave-dominated coastal settings - A review. *Geomorphology*, p73, 33-49.

McLaren.P, 1981. An interpretation of trends in grain size. *J. Sed. Pet* ,p 51, 611-624.

McLaren.P, Bowles.D, 1985. The effect of sediment transport on grain-size distribution. *Journal of Sedimentary Petrology* , p 55 (4), 457-470.

Mehter.A.J, 1988. Laboratory studies on cohesive sediment deposition and erosion, in *Physical Processes Estuaries*, edited by J.Dronker and W.V.Leussen p 427-445. Springer, Berlin, 21.

Mezouar.K, 2009. Etude comparative entre les méthodes de protection des deux littoraux Algérien et Roumain. *Thèse de Doctorat, Université technique de construction de Bucarest, Bucarest*, p 404.

Militello.A, Kraus.C.N, 2003. Numerical simulation of sediment pathways at an idealized inlet and EBB shoal. *Proceeding coastal sediment'03. CD-ROM Published by World Scientific Publishing Corp. and East Meets West Productions, Corpus Christi, Texas, USA. ISBN 981-238-422-7.*

Mouhoubi.N, Ouabel.K, 2012. Etude d'une solution de protection pour la plage centre de Sidi Ghiles (Cherchell). *Mémoire d'ingénieur, ENSSMAL, 2012.*

Ouillon.S, 2011. Dynamique Sédimentaire (Notes de cours). *Master 2, Université Abomey Calavi, Faculté des Sciences et Techniques, Cotonou, Bénin.*

Rochard.A, 2008. Modélisation tridimensionnelle des écoulements et du transport de sédiments fins sur un tronçon du Rhône. *Mémoire d'ingénieur, Institut National Polytechnique de Toulouse*, p15-17.

S.S.M.O, 1963-1970. Tome II. Zone Algérienne.

Sabatier.P, 2006. Reconstitution paléoclimatique des événements extrêmes (crues et tempêtes) dans le golf d'Aigues-Mortes à travers l'étude des archives sédimentaires prélevés dans les lagunes palavasiennes. *Mémoire de master, Académie de Montpellier.*

Sliti.M , 1990. Fonctionnement des brises-lames dans le système marin littoral du Golf de Tunis. *Thèse de 3^{ème} cycle de Géologue, Université de Bordeaux, p 222.*

SOGREAH, 2000b. Etude globale pour une stratégie de réduction des risques dus aux crues du Rhône ; calculs de transport solide. Technical report, *SOGREAH Consultants.*

Ternat, 2007. Erosion des sédiments cohésifs en auto consolidation. *PhD thesis, Université de la Méditerranée.*

Vassas.C, Vella.C, Sabatier.F, 2008. Méthode et avancées des travaux sur l'étude du transit sédimentaire pour des régimes hydrauliques variés à l'embouchure du Grand Rhône (France). Actes du colloque international pluridisciplinaire « Le littoral subir, dire, agir » - Lille, France, 16-18 Janvier.

Verrey.R, 2006. Processus de contrôle de la dynamique des sédiments cohésifs. *PhD thesis. Université de Rouen, p13-20.*

Villaret.C, 2003. Modélisation du transport sédimentaire en granulométrie étendue: étude bibliographique. *Département laboratoire national d'hydraulique et environnement groupe ouvrages d'eau et environnement, EDF.*

Wang.P, Tidwell.D.K, Beck.T.M, KrausN.C, 2007. Sedimentation patterns in a stabilized migratory inlet, blind pass, florida, *Proceedings Coastal Sediments '07 Conference.*

Wentroth.C.K, 1992. A scale of grade and class terms for clastic sediment. *Journal of geology, p 30, 377-392.*

Zemenzer.S, 2004. Ensablement du port par transport sédimentaire : simulation et application du modèle de Gao et Collins(1994) au port de Sidi Fredj. *Mémoire d'ingénieur, ISMAL.*

Eisma.D, 1992. Suspended matter in the aquatic environment, p 315. *Springer-Verlag, Berlin.*

Hayter.E.J, 1983. Production of cohesive sediment movement in estuarial waters, *PhD thesis, Coastal et Oceanographic Engineering Department University of Florida.*

Mewis.J, Spaul.A, 1976. Rheology of concentrated suspensions. *Advances in Colloid and interface Science*, p 6, 173-200.

Sites web :

« Les transits sédimentaires — Observatoire de la Côte Aquitaine ». [Online] Available: <http://littoral.aquitaine.fr/Les-transits-sedimentaires.html>. [Accessed: 24-juill-2012].

« Geosciences Montpellier - Mémoires (Master et DEA) ». [Online]. Available: <http://www.gm.univ-montp2.fr/spip/spip.php?article791>. [Accessed: 27-juill-2012].

« Geosciences Montpellier - Caractérisation de l'hydrodynamique et de la morphodynamique littorale et côtière ». [Online]. Available: <http://www.gm.univ-montp2.fr/spip/spip.php?article130>. [Accessed: 27-juill-2012].

A. S. Arcilla, *Coastal Dynamics 2005: State of the Practice*. ASCE Publications, 2006.

« Aquasea - Coastal Circulation & Wave Modeling Software ». [Online]. Available: <http://www.vatnaskil.is/softwaredevelopment/aquasea>. [Accessed: 04-août-2012].

[Online]. Available:

<http://hmf.enseeiht.fr/travaux/CD9598/travaux/optsee/hym/nome15/sarlkub/hydro2.htm>.

[Accessed: 24-juill-2012].