

MeHSIP-PPIF

PHASE II

DEPOLLUTION INTEGRALE DU LAC DE BIZERTE - TUNISIE

*Aménagement des berges de Menzel Bourguiba et
Menzel Abderrahmen*

TA 2008/S 140-186933

(RG/2008/01/FSF)

Juillet 2012

MeHSIP-PPIF

Programme d'investissement pour l'élimination
des zones sensibles en Méditerranée

*Mécanisme d'aide à la préparation et à la mise en
oeuvre des projets*



European
Investment
Bank

A TA operation funded by the
European Union - FEMIP Support Fund



LDK
CONSULTANTS

ATKINS

Étude de faisabilité: Dépollution Intégrale du Lac de Bizerte

Name of Underlying Project:	MeHSIP-PPIF Mediterranean Hot Spot Investment Programme Project Preparation and Implementation Facility
Date	
Version	

Expert Team:

N. Marchesi (Project Leader)
G. Akl (Institutional Key Expert)
T. Young (Team Leader)

Project Director: **M. Woolgar**

REVISION	DATE	DESCRIPTION	PREPARED BY (AUTHOR)	REVIEWED BY
0	11/07/2011	Working program for project preparation	N. Marchesi	G. Akl, T. Young
1	23/08/2011			
2				

Document nr.: 5080309/30/DG/069

Disclaimer

Le programme est financé au titre du Fonds d'assistance technique de la FEMIP. Ce Fonds utilise des aides non remboursables accordées par la Commission européenne pour appuyer l'activité d'investissement que la BEI déploie dans les pays du sud de la Méditerranée, en assistant les promoteurs au cours des différentes étapes du cycle des projets.

Les auteurs assument pleinement la responsabilité du contenu de la présente brochure. Les opinions exprimées ne reflètent pas nécessairement celles de l'Union européenne ou de la Banque européenne d'investissement.

CONTENTS

1 INTRODUCTION	5
1.1 PRESENTATION ET OBJECTIF DE L'ETUDE	5
1.2 LOCALISATION GEOGRAPHIQUE ET REVUE HISTORIQUE	5
2 ETUDES ANTÉRIEURES ET INVESTIGATIONS COMPLÉMENTAIRES .	8
2.1 LES SOURCES DE NUISANCES	8
2.2 PRINCIPAUX RESULTATS DES ETUDES ANTERIEURES	6
2.2.1 QUALITE DES EAUX DE LA LAGUNE	6
2.2.2 CONTAMINATION DES SEDIMENTS DE LA LAGUNE	11
2.2.3 ANALYSE DES RESULTATS	6
2.3 PROGRAMMES D'INVESTIGATIONS COMPLEMENTAIRES	8
2.3.1 LEVES TOPO-BATHYMETRIQUES	8
2.3.2 PROGRAMME D'INVESTIGATION GEOCHIMIQUE	9
3 ETUDE GÉOCHIMIQUE	14
3.1 CARBONE ORGANIQUE TOTAL (COT)	14
3.2 AZOTE TOTAL	17
3.3 LES METAUX LOURDS	20
3.3.1 LE CADMIUM	20
3.3.2 LE PLOMB	20
3.3.3 LE ZINC	21
3.3.4 LE MERCURE	21
3.3.5 L'ARSENIC	22
3.3.6 LE NICKEL	22
3.4 LES HYDROCARBURES AROMATIQUES POLYCYCLIQUES	6
3.4.1 LE NAPHTALÈNE	6
3.4.2 L'ACÉNAPHTÈNE	6
3.4.3 L'ANTHRACÈNE	6
3.4.4 LE BENZO (A) PYRÈNE	6
3.5 CONCLUSION	7
3.6 MENZEL BOURGUIBA - ORIGINE PROBABLE DE LA POLLUTION DE MENZEL JEMIL	7
4 DONNÉES HYDROGRAPHIQUES ET MÉTÉOROLOGIQUES	10
4.1 NIVEAUX DE REFERENCE	10
4.2 NIVEAUX D'EAU	10
4.2.1 AU NIVEAU DU GOULET DE BIZERTE	10
4.2.2 AU NIVEAU DE LA LAGUNE DE BIZERTE	11
4.3 SURCOTES ET DECOTES	12

4.4	COURANTS ET CIRCULATIONS DES EAUX.....	13
4.5	PLUVIOMETRIE	16
4.6	TEMPERATURE.....	16
4.7	INSOLATION.....	17
4.8	ÉVAPORATION	18
4.9	HUMIDITE ATMOSPHERIQUE	18
4.10	VENT	19
4.11	FETCHS ET CLAPOTS.....	23
5	OUVRAGE PORTUAIRE ET AQUACULTURE	26
5.1	OUVRAGE PORTUAIRE.....	26
5.2	AQUACULTURE	27
6	CADRE SÉDIMENTOLOGIQUE	31
6.1	DISTRIBUTION HORIZONTALE.....	31
6.2	DISTRIBUTION VERTICALE	32
7	MORPHOLOGIE DE LA ZONE DU PROJET	34
7.1	MORPHOLOGIE DES FONDS.....	34
7.2	MORPHOLOGIE LITTORALE	35
7.2.1	MENZEL ABDERRAHMANE	35
7.2.2	MENZEL JEMIL.....	41
8	VARIANTES D'AMÉNAGEMENT	46
8.1	OBJECTIFS ET CONTRAINTES D'AMENAGEMENT	46
8.2	SOLUTIONS D'AMENAGEMENT	46
8.2.1	MENZEL ABDERRAHMANE	46
8.2.2	MENZEL JEMIL.....	49
8.3	CONCEPTION ET DIMENSIONNEMENT DES OUVRAGES DE PROTECTION A TALUS.....	58
8.3.1	POIDS DES BLOCS.....	58
8.3.2	EPAISSEUR DES COUCHES.....	59
8.4	DESCRIPTION DES PROFILS TYPES	60
8.4.1	OUVRAGE À TALUS	60
8.4.2	QUAI EN BLOCS.....	61
8.4.3	DEPOT DES PRODUITS DE DRAGAGE	63
8.5	ESTIMATION DU PROJET	5
8.5.1	MENZEL ABDERRAHMANE	5
8.5.2	MENZEL JEMIL.....	11
9	CONCLUSION	12

LISTES DES FIGURES

Figure 1 : Situation géographique de la lagune de Bizerte.....	6
Figure 2 : Localisation des sources de nuisances à Menzel Abderrahmane et Menzel Jemil	9
Figure 3 : Cartes de comparaison 2004 – 2011	10
Figure 4 : Cartes de comparaison des métaux lourds dans les sédiments de surface (2004 – 2011)	5
Figure 5 : Carte de répartition de la pollution dans le lac de Bizerte	7
Figure 6 : Programme des levé topo-bathymétriques de la région de Menzel Abderrahmane	8
Figure 7 : Programme des levé topo-bathymétriques de la région de Menzel Jemil	9
Figure 8 : Carte de localisation des échantillons	10
Figure 9 : Carte de répartition du COT	15
Figure 10 : carte de répartition de l'Azote total.....	19
Figure 11 : Cartes de répartitions des métaux lourds dans les sédiments de surface de la lagune de Bizerte – Menzel Jemil.....	5
Figure 12 : Répartition et intensité des courants barotrope moyen du secteur Nord-Est	8
Figure 13 : Carte des sédiments superficiels de la lagune de Bizerte (Ouakad, 2007)	9
Figure 14 : Variation du niveau dans le goulet due à la marée (INSTM, 2002).....	11
Figure 15 : Comparaison des marées en mer (en bleu) et dans le goulet (en rouge) (INSTM, 2002)	11
Figure 16 : Niveaux simulés en divers endroits du lac de Bizerte (INSTM, 2002)	12
Figure 17 : Circulation hivernale (Direction & Intensité) des eaux dans la lagune de Bizerte. La circulation de surface (a) est plus intense en comparaison à la circulation de fond (b).....	15
Figure 18 : Circulation estivale (Direction & Intensité) des eaux dans la lagune de Bizerte. La circulation de surface (a) est plus importante en comparaison à la circulation de fond (b).....	16
Figure 19 : Evolution mensuelle moyenne de la température à Bizerte entre 1996 et 2006 (INM, 2007)	17
Figure 20 : Evolution mensuelle moyenne de l'insolation à Bizerte entre 1996 et 2006 (INM, 2007)	18
Figure 21 : Evolution mensuelle moyenne de la vitesse moyenne du vent à Bizerte entre 1996 et 2006	19
Figure 22 : Rose des vents de la station de Bizerte entre 1981 et 2004 (INM, 2007)	20
Figure 23 : Rose des vents à la station de Tunis - Carthage	21
Figure 24 : Evolution mensuelle moyenne de la pluviométrie à Bizerte entre 1996 et 2006 (INM, 2007)	23
Figure 25 : Directions des vents influents sur la zone d'étude	24
Figure 26 : Fetchs par direction	24
Figure 27 : Port de pêche de Menzel Abderrahmane	26
Figure 28 : Carte des concessions aquacoles: STL : Société Tunisie Lagunes, FMB : Société Fermes Marines de Bivalves, SCM : Société Tunisie Cultimer, MAT : Société M A Trad, STM : Société Talbi Malek, SMJ : Société Mali Jibtou, EB : Société Ezzdine Boukoum, OMB : Société Othmen et Makram Boukoum, TA : Société Tunisie Aqualog	29
Figure 29 : Photographies illustrant les zones de conchyliculture au Nord-Est de la lagune de Bizerte	30
Figure 30 : Localisation des sédiments carottés.....	31

Figure 31 : Distribution verticale des minéraux argileux dans la lagune de Bizerte (Ben Garali et al. 2010) MA-Menzel Abderrahmane, WG-Oued Guenniche, WBH-Oued Ben Hassine, WT-Oued Tinja, LB-centre de la lagune	33
Figure 32 : Bathymétrie de la lagune de Bizerte	35
Figure 33 : Menzel Abderrahmane; T1- tronçon 1, T2- tronçon 2, T3- tronçon 3, T4- tronçon 4, T5-tronçon 5, T6-tronçon 6	36
Figure 34 : Etat du tronçon 1 de Menzel Jemil.....	37
Figure 35 : Travaux d'entretien des barques et rejet d'eaux usées.....	38
Figure 36 : Côte sinueuse- dépôts ménagers et déchets de constructions.....	39
Figure 37 : Différents aspects de la côte de Menzel Abderrahmane	40
Figure 38 : Photos illustrant la morphologie littorale du tronçon 5	41
Figure 39 : Morphologie du tronçon 6	41
Figure 40 : Menzel Jemil; T-N-tronçon Nord, T-NE-tronçon Nord-Est, T-E-tronçon Est	42
Figure 41 : Morphologie littorale du tronçon Nord de Menzel Jemil	43
Figure 42 : Morphologie du tronçon Nord-Est	44
Figure 43 : Morphologie du tronçon Est	45
Figure 44 : Esquisse de la variante 1 proposée pour l'aménagement de Menzel Abderrahmane	51
Figure 45 : Esquisse de la variante 2 proposée pour l'aménagement de Menzel Abderrahmane	52
Figure 46 : Esquisse de la variante 3 proposée pour l'aménagement de Menzel Abderrahmane	53
Figure 47 : Esquisse de la variante 4 proposée pour l'aménagement de Menzel Abderrahmane	54
Figure 48 : Esquisse de la variante 5 proposée pour l'aménagement de Menzel Abderrahmane	55
Figure 49 : Esquisse de la variante 1 proposée pour l'aménagement de Menzel Jemil	56
Figure 50 : Esquisse de la variante 2 proposée pour l'aménagement de Menzel Jemil	57
Figure 51 : Délimitation de la zone de dragage.....	58
Figure 52 : Profil type de l'ouvrage à talus.....	61
Figure 53 : Profil type 1 de la variante 3 - Menzel Abderrahmane.....	62
Figure 54 : Profil type 2 de la variante 3 - Menzel Abderrahmane.....	63
Figure 55 : Profil type des variantes 4 et 5 - Menzel Abderrahmane.....	63
Figure 56 : Profil type pour les variantes 1 et 2 de Menzel Abderrahmane et la variante 1 de Menzel Jemil	5
Figure 57 : Profil type pour la variante 2 de Menzel Jemil.....	6
Figure 58 : Profil type 1 pour la variante 3 de Menzel Abderrahmane	7
Figure 59 : Profil type 2 pour la variante 3 de Menzel Abderrahmane	8
Figure 60 : Profil type 1 pour les variantes 4 et 5 de Menzel Abderrahmane	9
Figure 61 : Profil type 2 pour les variantes 4 et 5 de Menzel Abderrahmane	10

LISTES DES TABLEAUX

Tableau 1 : Récapitulatif du programme d'analyses pour les sédiments de surface.....	11
Tableau 2 : Récapitulatif du programme d'analyses pour les échantillons des carottes	13
Tableau 3 : concentration du COT dans la lagune de Bizerte - Menzel Jemil.....	14

Tableau 4	: Comparatif des teneurs du COT à Menzel Jemil	16
Tableau 5	: Teneurs en COT de trois différents systèmes lagunaires.....	17
Tableau 6	: concentration de l'Azote total dans la lagune de Bizerte - Menzel Jemil.....	18
Tableau 7	: concentration du Cadmium dans la lagune de Bizerte - Menzel Jemil.....	20
Tableau 8	: concentration du Plomb dans la lagune de Bizerte - Menzel Jemil	21
Tableau 9	: concentration du Zinc dans la lagune de Bizerte - Menzel Jemil.....	21
Tableau 10	: concentration du Mercure dans la lagune de Bizerte - Menzel Jemil.....	21
Tableau 11	: concentration de l'Arsenic dans la lagune de Bizerte - Menzel Jemil.....	22
Tableau 12	: concentration du Nickel dans la lagune de Bizerte - Menzel Jemil	23
Tableau 13	: Comparaisons des résultats d'analyses de sédiments superficiels.....	23
Tableau 14	: Teneurs des HAPs dans les sédiments superficiels de la lagune de Bizerte	7
Tableau 15	: Evaporation à Bizerte	18
Tableau 16	: Humidité en % (Bizerte)	18
Tableau 17	: Vitesses et directions du vent enregistrées à Tunis-Carthage (1970-90)	20
Tableau 18	: Maximums annuels sur 20 ans à la station de Tunis-Carthage (1971-90)	21
Tableau 19	: Vitesse moyennée sur 10 minutes - m/s.....	22
Tableau 20	: Détermination de la hauteur maximale des clapots.....	25
Tableau 21	: Paramètres de calcul des enrochements de la carapace	59
Tableau 22	: Dimensionnement des ouvrages de protection à talus.....	60

LISTES DES ANNEXES

Annexe 1	15
Annexe 2.....	17
Annexe 3.....	20

ABBREVIATIONS

BoQ	Bill of Quantities
CDM	Clean Development Mechanism
EC	European Commission
EIA	Environmental Impact Assessment
EIB	European Investment Bank
EIRR	Economic Internal Rate of Return
ESIA	Economic and Social Impact Assessment
EU	European Union
FDS	Final Disposal Site
FEMIP	Facility for Euro-Mediterranean Investment and Partnership
FIRR	Financial Internal Rate of Return
FIDIC	Fédération Internationale des Ingénieurs Conseils
FS	Feasibility Study
GIS	Geographic Information Systems
JSC	Joint Service Council
IFI	International Financing Institutions
MeHSIP-PPIF	Mediterranean Hot Spots Investment Programme - Project Preparation and Implementation Facility
MoE	Ministry of Environment
MoMA	Ministry of Municipal Affairs
MoPIC	Ministry of Planning and International Cooperation
MSW	Municipal Solid Waste
NAP	National Action Plan
NGO	Non-Government Organisation
PDD	Project design Document
PIP	Project Implementation Plan
PFS	Project Fact Sheet
PPP	Public Private Partnership
RIAL	Reuse for Industry, Agriculture and Landscaping
SW	Solid Waste
TA	Technical Assistance
ToR	Terms of Reference
USAID	United States Agency for International Development
WAJ	Water Authority Jordan
WW	Wastewater
WWTP	Wastewater Treatment Plant

1 INTRODUCTION

1.1 PRESENTATION ET OBJECTIF DE L'ETUDE

Ce document fait partie de la deuxième phase de l'étude de dépollution de la lagune de Bizerte, destinée à la proposition des solutions techniques préliminaires pour l'aménagement des berges du lac au niveau de Menzel Abderrahmane et l'aménagement de la zone conchylicole de Menzel Jemil.

La première phase de cette étude a concerné les sources de pollution situées dans le bassin versant et a abouti à l'élaboration d'un bilan de la pollution induite par l'ensemble des rejets liquides et solides se déversant dans le lac.

L'étude est financée par la BEI à travers le MeHSIP-PPIF dans le contexte de l'initiative Horizon2020. Dans le contexte de l'Initiative H2020, le Ministère de l'Agriculture et de l'Environnement souhaite promouvoir la « réconciliation du Lac de Bizerte avec la mer Méditerranée ». Donc, l'objectif général du projet est de restaurer la qualité des eaux et des écosystèmes du lac de Bizerte pour favoriser un développement socio-économique durable et améliorer la qualité de vie des citoyens. Les objectifs spécifiques sont :

- Proposition des solutions techniques pour éliminer la pollution organique au niveau de Menzel Jemil ;
- Elimination des zones d'eau stagnante et amélioration de la circulation des eaux à Menzel Jemil et Menzel Abderrahmane ;
- Propositions des variantes d'aménagement des berges du lac à Menzel Abderrahmane et création d'une esplanade entre les habitations et le front de mer.

Pour parvenir aux objectifs fixés par la présente étude, ce rapport comporte les parties suivantes :

- Présentation des principaux résultats et recommandations des études antérieures ;
- Présentation des programmes complémentaires des levés topo-bathymétriques et d'investigation géochimique ;
- Définition des conditions climatiques et océanographiques
- Etude de la géomorphologie littorale des zones de l'étude ;
- Proposition des variantes d'aménagement et analyse multicritère.

1.2 LOCALISATION GEOGRAPHIQUE ET REVUE HISTORIQUE

La lagune de Bizerte est située à l'extrême Nord de la Tunisie entre les latitudes 37°8' et 37°14' et entre les longitudes 9°46' et 9°56'. La lagune s'étend sur une superficie de l'ordre de 150 km², avec une largeur maximale de 11 km et une longueur maximale de 13 km, et communique avec la mer par un canal de 6 km de longueur. La largeur et la profondeur maximale du canal est respectivement de

0,8 km et 12 m. La lagune est reliée dans sa partie ouest à un second plan d'eau, le lac Ichkeul, par le canal Tinja d'environ 5 km de long et de quelques mètres de profondeur (3 mètres en période de crue) (Figure 1).

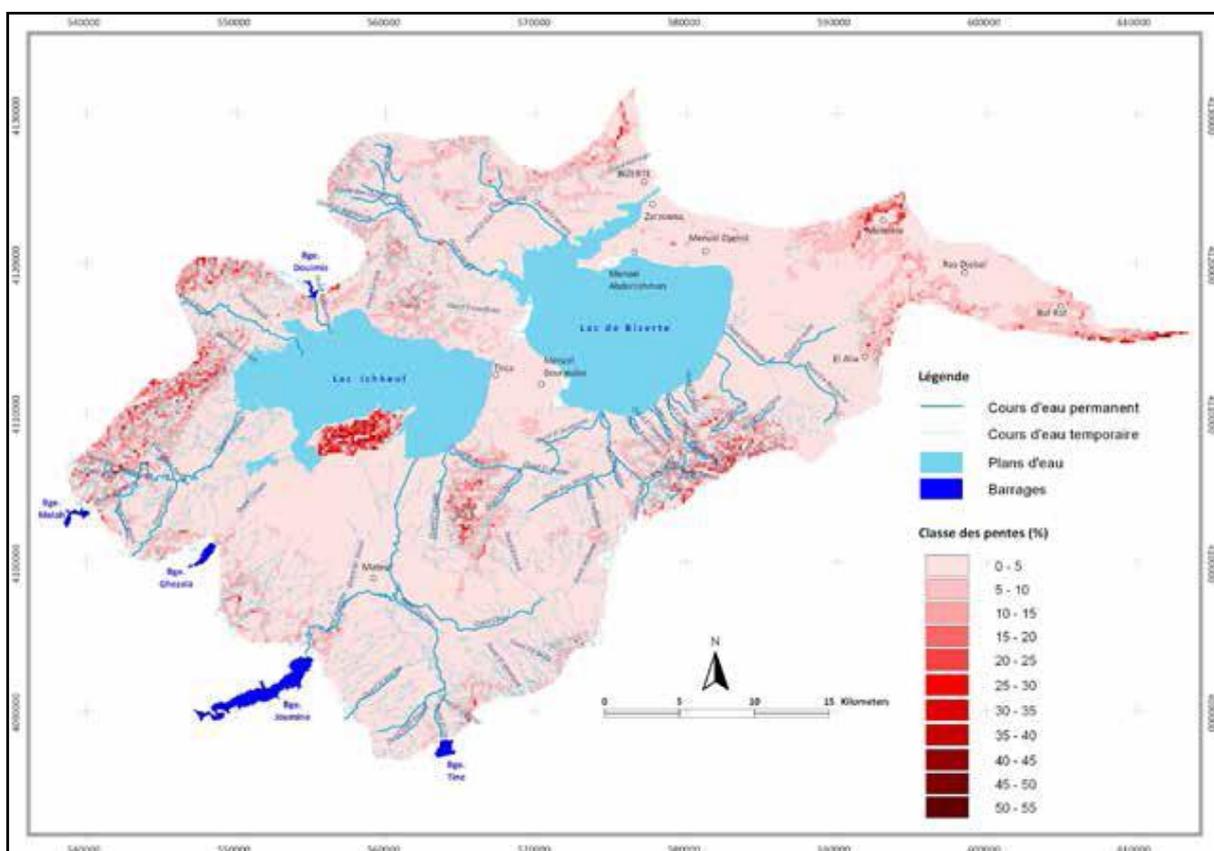


Figure 1 : Situation géographique de la lagune de Bizerte

L'appartenance de cette lagune à une région d'effondrement entourée d'une série de petites montagnes lui confère le caractère d'un réceptacle d'un réseau hydrographique développé composé de plusieurs cours d'eau qui débouchent principalement aux niveaux des bordures sud et ouest de la lagune et qui charrient une quantité d'eau variable en fonction des précipitations et des apports provenant du lac Ichkeul. Ces Oueds sont principalement les oueds El Merdj et Abbés au Nord, les oueds Merazig et Halima au Nord-Ouest, les oueds Soula et Tinja à l'Ouest, les oueds Guenuche, El Hella, Jedara et El Khima, à l'Est et les oueds Guennine, Ben Hassine, Douamis, El Gouraya, Garek, Tliba et Chegui au Sud.

À cette double influence marine et continentale, s'ajoute une troisième influence d'ordres urbaine et industrielle

Un aperçu sur l'historique du comportement morphologique de la lagune, met en évidence l'ancienneté de l'intervention anthropique au remodelage des rivages et par conséquent de l'hydrodynamisme du complexe lagunaire.

En effet, à la fin du 19eme siècle, et suite à la décision de la marine française de créer une base navale au fond du lac, il est décidé de modifier la physionomie du lac en lui assurant une large et profonde communication avec la mer voisine. En 1895, afin de faciliter la protection des navires qui

restaient jusqu'alors bloqués dans la rade de Bizerte, la décision est prise de creuser une très large communication entre le lac et la mer qui va se substituer à l'ancien goulet sinueux et peu profond (-3 m) qui traversait la ville et débouchait dans la mer au niveau du port par une ouverture étroite de 28 m de large. Par ailleurs, un bras de l'ancien goulet isolant à cette époque une petite île, cette dernière est rattachée à la ville, après remblaiement d'une surface qui double la superficie de l'agglomération. Le seul témoin actuel de cet ancien goulet qui a été bouché est donc le vieux port.

Le creusement du nouveau chenal qui est rectiligne, très large et très profond va modifier totalement l'hydrodynamisme du plan d'eau qui va passer d'un milieu de type confiné à un milieu de type confluent. Ceci va se traduire par une modification radicale de l'écosystème antérieur qui va passer d'un milieu à influence continentale dominante à un milieu sous influence marine prépondérante (Bonniard, 1934).

2 ETUDES ANTÉRIEURES ET INVESTIGATIONS COMPLÉMENTAIRES

2.1 LES SOURCES DE NUISANCES

Le lac de Bizerte constitue une lagune côtière qui communique avec la mer Méditerranée par le goulet de Bizerte et avec le lac Ichkeul par l'oued Tinja. Ce bassin versant constitue un pôle de développement socio-économique. En effet, cette zone est caractérisée par des activités industrielles, agricoles, portuaires et commerciales très variées et très dynamiques. Par conséquent, le lac de Bizerte est soumis à un ensemble de nuisances occasionnés par :

- Des rejets hydriques provenant des zones urbaines ;
- Des rejets industriels divers provenant des zones industrielles ;
- Des rejets provenant des activités agricoles sur le bassin versant.

En ce qui concerne la zone de Menzel Abderrahmane et Menzel Jemil, les sources de nuisances sont principalement d'ordre hydrique et concernent:

- Rejet de d'eau pluviale ;
- Rejet de l'ONAS ;
- Rejets usine de confection ;
- Rejet domestique ;
- Rejet port de pêche.

Un dénombrement des sources de nuisances à été effectué dans la première phase de cette étude ainsi que l'analyse des paramètres physico-chimiques et biologiques. Les résultats sont consignés dans le tableau ci-dessous.

Menzel Abderrahmane

Les eaux rejetées dans la lagune de Bizerte – Menzel Abderrahmane sont très chargées en sels nutritifs (notamment en phosphore total) et ayant des concentrations élevées en DBO₅, DCO, MES et en coliformes fécaux.

Les teneurs de ces éléments excèdent largement les limites admissibles de la norme NT 106.002 pour un rejet dans le domaine public maritime MER, notamment pour les stations : 524, 531 et 533.

Le dépassement des normes de qualité des eaux peut avoir un impact négatif sur l'écosystème de la lagune, en effet :

- Les teneurs élevées en MES signifient un dépôt et accumulation des matières solides et des boues.

- DCO: apport des matières oxydables (organiques)
- DBO₅: Apport de matières organiques bio oxydable et consommant de l'oxygène.
- Eléments nutritifs: Azote et Phosphore pouvant provoquer une eutrophisation du lac.
- Germes pathogènes: Engendrera une contamination de l'eau, de la flore et des fruits de mer.

Menzel Jemil

Les sources de nuisances à Menzel Jemil sont moins nombreuses que celles de Menzel Abderrahmane, cependant la qualité des eaux rejetées est la même. En effet les eaux chargées en sels nutritifs (phosphore total et Azote kjeldahl) et ayant des concentrations élevées en DBO₅, DCO, MES et en coliformes fécaux entraîne une eutrophisation de la lagune – Menzel Jemil plus sévère que celle à Menzel Abderrahmane.

Les stations 515 et 517 issues des rejets de l'ONAS, sont les sources les plus polluantes.

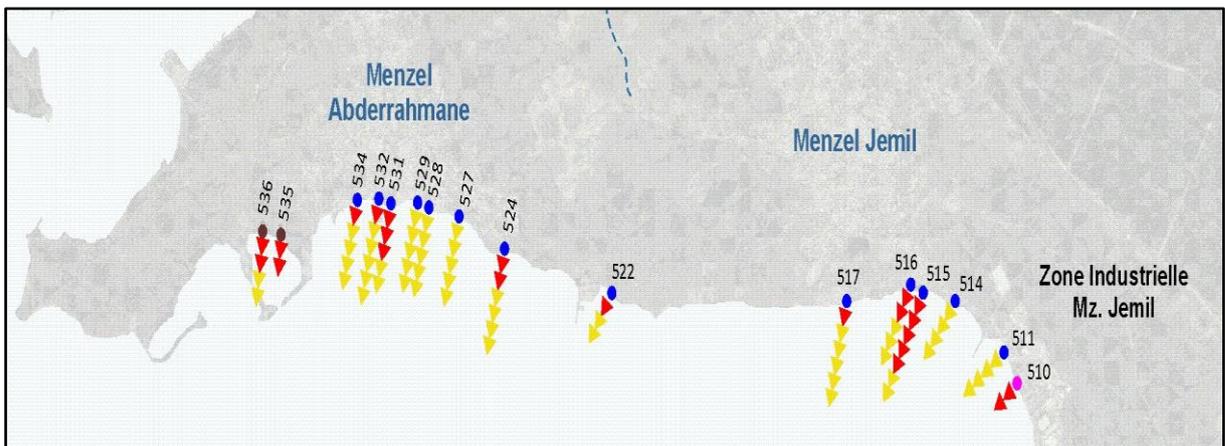


Figure 2 : Localisation des sources de nuisances à Menzel Abderrahmane et Menzel Jemil

N° POINT	Coordonnées Originaires		DESCRIPTION	Paramètres physiques				Sels nutritifs			Salomonelles (germes/100ml)	Coliformes Fécaux (germes/100ml)	
	X	Y		pH	MES (mg/l)	DCO (mg O2/l)	DBO5 (mg O2/l)	N-NO2 (mg NO2/l)	Phosphore total (mg P/l)	Azote kjeldahl (mg N/l)			
			NT106-02 DPM	6,5-8,5	30	90	30	5	0,1	30	Absence	2000	
M. JEMIL	511	582895	4119957	Conduite eau pluviale	8,2	42	*	1,7	0,021	0,07	13,2	Absence	460000
	514	582378	4120292	Rejets usine de confection	8,05	52	*	5,5	0,122	0,38	18,9	Absence	240000
	515	582023	4120386	Rejet ONAS	8,3	340	305	100	2,961	9	51,2	Absence	240000
	516	582022	4120385	REJET EAU PLUVIALE	7,95	49	116	25	4,696	2,14	43,7	Absence	460000
	517	581270	4120308	REJETS ONAS	7,9	150	230	81	<0,011	4,57	50,9	Absence	460000
M. ABDERRAHMANE	522	578852	4120337	zone marécageuse +sortie eau pluviale	8,35	6,8	<30	1,8	0,51	0,09	50,3	Absence	240000
	524	577756	4120639	Point de rejet eaux usées	8,45	120	248	85	0,015	6,28	140	Absence	240000
	527	577288	4120862	Evacuation des eaux usées	9,95	57	<30	2,8	0,106	0,31	22,6	Absence	21000
	528	577011	4120908	Point de rejet domestique	8,5	180	135	51	-	1,77	50	Absence	15000
	529	576999	4120925	Point de rejet	8,35	160	151	59	-	2,5	27,7	Absence	24000
	531	576577	4120948	Point de rejet port pêche	8,4	280	397	200	-	2,7	13,2	Absence	210000
	533	576495	4120962	ONAS sortie vu ensemble AGIL + BANQUE	8	76	225	100	<0,011	4,47	24,9	Absence	460000
	534	576261	4120984	Rejet ONAS en écoulement hors port pêche	8,2	78	105	29	0,109	2,26	21,7	Absence	>1,1E6

2.2 PRINCIPAUX RESULTATS DES ETUDES ANTERIEURES

Le présent rapport prend en considération les résultats et recommandations parvenus dans les études antérieures qui traitent le sujet de dépollution et le réaménagement de la lagune de Bizerte. Ce rapport tient compte aussi des recommandations faites par l'administration, Agence de Protection et d'Aménagement du Littoral, lors de la réunion du 26 Octobre 2011.

2.2.1 QUALITE DES EAUX DE LA LAGUNE

Paramètres physico-chimiques

Température

L'étude de la température des eaux de la lagune, si on compare les données que nous avons à notre disposition s'étalant sur plus de 30 années, montre relativement peu de différences entre les années 70 époque où la température est, en moyenne, de 18,5°, avec des valeurs oscillant entre 10° en janvier et 27° en août (Zaouali, 1974) et les années 2000 avec des valeurs oscillant entre 11 et 26 ° avec une moyenne de 19,5° (INSTM, 2001).

Les données recueillies en décembre 2009 (Zayani.M, 2011) sont tout à fait cohérentes avec celles fournies par l'INSTM, 2001. La température des eaux de surface mesurée en différents point de la lagune oscille entre 12,7 et 13,7 °C, ce qui montre une certaine homogénéité du plan d'eau avec des écarts de température entre les différents points d'échantillonnages qui ne dépassent pas quelques degrés.

Salinité

Dans les années 60-70, la salinité moyenne annuelle du plan d'eau (Azzouz, 1966, Zaouali, 1974) se situait autour de 33‰ avec des écarts oscillant dans sa partie centrale entre 29 (février) et 38‰ (août).

En 2001, les modifications sont très importantes, en effet, l'INSTM donne une salinité moyenne de 38‰ avec des écarts à l'échelle saisonnière qui se sont très fortement estompés. En d'autres termes, sous l'influence des facteurs anthropiques régissant la très notable diminution des apports d'eau douce, on est passé d'un milieu de type bassin de dilution lagunaire (méso euhalin) à un milieu de type bassin de concentration marin.

En cohérence avec les résultats de l'INSTM, Zayani M, (2011) propose des valeurs oscillant entre 36.6 et 37,9 ‰. La concentration moyenne de l'eau de la lagune en sel étant de 37‰. Ces valeurs sont proches de la salinité marine normale.

Le pH

Le pH des eaux du lac de Bizerte est légèrement alcalin. Confirmé par les travaux de Soussi, 1981 et Zayani, 2011, les valeurs du pH des eaux de surface fluctuent entre 7,65 et 7.91.

D'après les résultats de ces travaux nous pouvons dire que le pH des eaux de la lagune ne constitue pas un problème majeur surtout concernant la capacité aquacole du milieu. La stabilité du pH des eaux est due essentiellement à l'échange important avec la méditerranée par le biais du Goulet. Cet

échange important confère à cette dernière un pouvoir tampon non négligeable vis à vis de la variation du pH. Le pH des eaux de surface du méditerrané est compris entre 8 et 8.3.

Oxygène dissous

Les teneurs moyennes en oxygène dissous des eaux de surface enregistrées en 2001 oscillent entre 5,2 et 6,7 mg/l. Elles tendraient à montrer, par rapport aux années 60-70, une légère augmentation de leur teneur en oxygène dissous.

En 2004, les valeurs observées de la concentration en oxygène dissous varient entre 7.8 et 9 gO₂/m³ en fonction des régions. L'axe Menzel Abderrahmen – Menzel Jemil, est caractérisé par des concentrations comprises entre 8.6 et 9 gO₂/m³. Une saturation en oxygène a été notée au niveau de ces régions, la valeur relative est comprise entre 99 et 102% de la saturation.

En 2011, la concentration des eaux de la lagune en oxygène dissous varie entre 6,1 à 6,63 mg/l. On note que les eaux du lac ne présentent jamais de déficit en oxygène dissous.

Les Sels nutritifs

Azote total

Les teneurs en azote total mesurées au sein de la lagune (en Janvier 2004), représentent des valeurs élevées, par rapport à celles rencontrées dans les milieux paraliques. Sa valeur moyenne sur toute la lagune est de l'ordre de 1900 mgN/m³

La teneur en azote total est excessivement élevée dans le Goulet et en face de l'embouchure de l'oued Haima. Elle oscille entre 2000 – 4000 mgN/m³. Une teneur relativement élevée est observée en face de l'oued Guennich où la concentration en azote total est comprise entre 1400 et 1800 mgN/m³. Le reste de la lagune est caractérisé par des teneurs comparables aux milieux paraliques. La station marine, indique des teneurs de l'ordre de 744 mgN/m³.

Nitrates NO₃

Une concentration en nitrate entre 2000 et 3000 mgN/m³ peut être considérée normale, dépassant ce seuil, cet élément peut provoquer les phénomènes d'eutrophisation. En période de faible oxygénation, les nitrates peuvent jouer le rôle de donneurs d'oxygène et éviter l'anaérobiose

L'analyse de la carte de répartition du nitrate dans les eaux de surface, nous permet de constater que les teneurs les plus élevées en nitrate sont situées tout le long des berges de la lagune, avec des concentrations supérieures à 110 mgN/m³ et qui peuvent atteindre des teneurs de 200 mgN/m³ en quelques endroits, telles que l'embouchure de l'oued Guennich, l'embouchure du canal Tinja, et en face de Menzel Abderrahmen.

La répartition des iso-valeurs montre une distribution selon deux zones principales:

- la zone littorale et le canal où les valeurs qui oscillent autour de 180 ppm indiquent un taux d'eutrophisation relativement élevé
- une zone centrale où les valeurs qui oscillent autour de 70 ppm sont indicatrices d'une certaine oligotrophie (milieu aquatique pauvre en éléments nutritifs).

Nitrites NO₂

En l'absence de pollution, il n'y a pas ou très peu de nitrites. En dessous de quelques dizaines de milligrammes, les eaux peuvent être considérées comme pures ou se trouvant sous l'action d'une auto-épuration active, en présence de quelques centaines de milligrammes, la pollution est sensible, celle-ci devient significative au-delà de 1000 mgN/m³.

L'analyse de la carte de répartition du nitrite dans les eaux de surface, nous permet de constater que les teneurs les plus élevées en nitrate sont situées tout le long du Goulet (jusqu'à 68 mgN/m³) et à un degré moindre, au niveau du secteur Est à Sud-est et entre Menzel Abderrahmane et Menzel Jemil (jusqu'à 46 mgN/m³). Il est à noter que La concentration en nitrite à la station marine (référence) est d'environ 40 mgN/m³.

Les chiffres présentés plus hauts, mettent en évidence que les teneurs en nitrite sont de l'ordre de quelques dizaines de milligrammes par mètre cube. La lagune est par conséquent loin d'être polluée (IHE-COMETE, 2004).

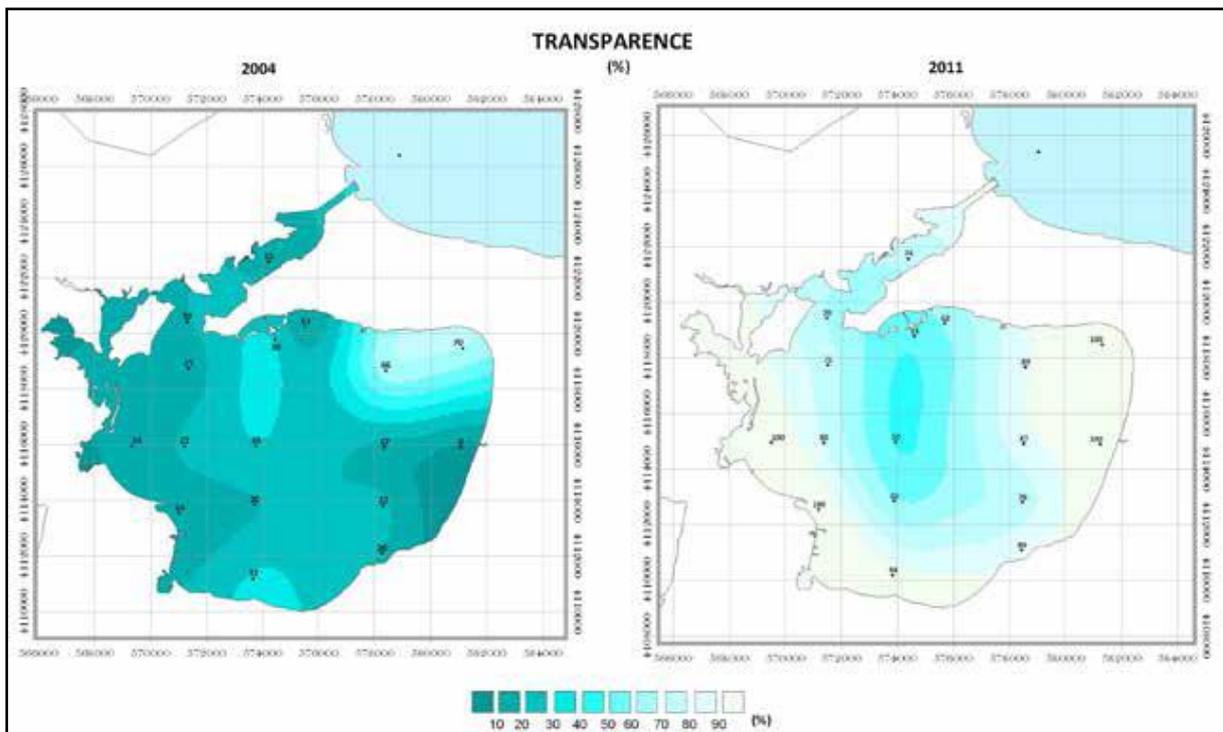
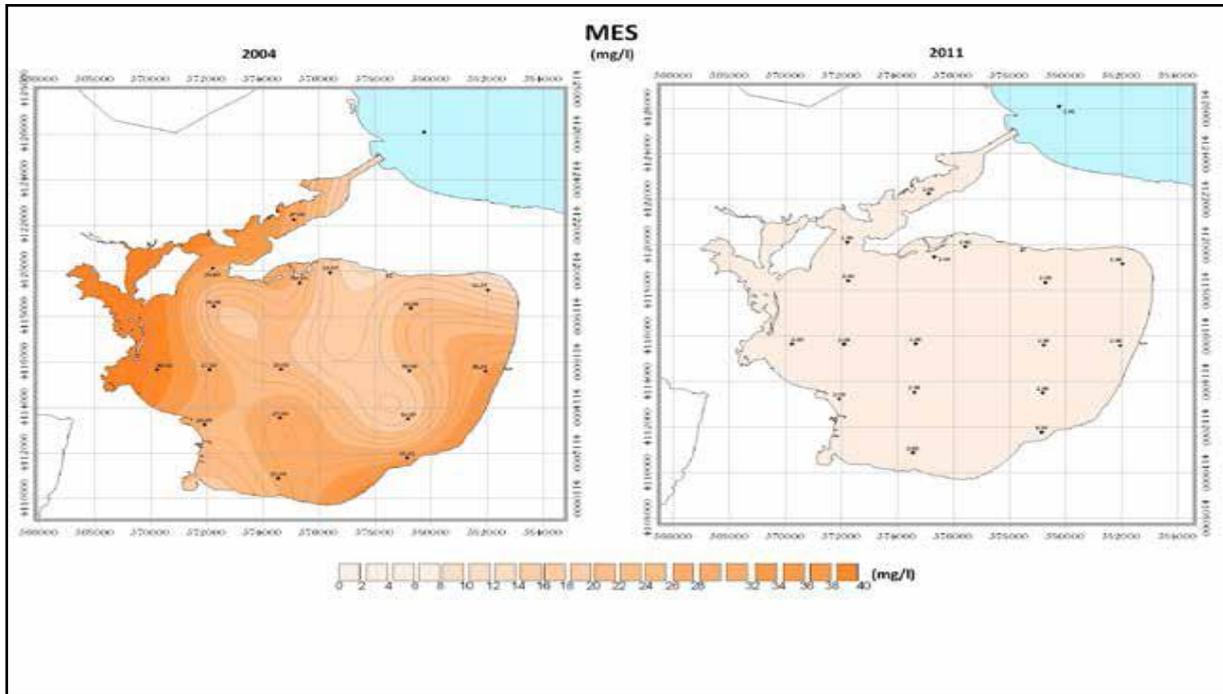
Phosphore inorganique PO₄

Les teneurs en phosphore minéral mesurées au sein de la lagune (en Janvier 2004), représentent des valeurs élevées, par rapport à celles rencontrées dans les milieux paraliques. Sa valeur moyenne sur toute la lagune est de l'ordre de 82.5 mgP/m³.

Des teneurs relativement faibles (70 mgP/m³) ont été observées en face et à l'Ouest de la localité de Menzel Abderrahmane et à l'embouchure de l'oued Haima. Partout ailleurs, la teneur du phosphore est comprise entre 80 et 90 mgP/m³, supérieure à la teneur observée au niveau de la station marine de référence qui est de 50 mgN/m³.

La carte de répartition du phosphore, nous a permis de subdiviser la lagune en cinq zones : le Goulet, le secteur Nord (BC – MJ), tout le secteur Est (MJ – OG), le secteur Sud (OG – OH) et le secteur Ouest (usine El Fouledh – CT). Si les teneurs excessives en phosphore peuvent déclencher le phénomène d'eutrophisation et que les teneurs faibles créent un déséquilibre du milieu, le secteur le plus stable est celui situé à l'Est entre Menzel Jemil et l'oued Guennich, vient en deuxième position, le secteur Sud, délimité par l'oued Guennich et l'oued Bel Hassine.

L'examen du rapport N/P monte une grande variabilité spatiale entre l'Ouest et le Goulet d'une part, et le reste de la lagune d'autre part. Au niveau de la partie centrale et l'Est de la lagune le rapport est presque uniforme, il varie entre 12 et 20, proche du rapport de Reidfield, ce qui implique une tendance de la lagune à la stabilité écologique. Les fortes valeurs observées dans le Goulet, indiquent un déséquilibre du milieu.



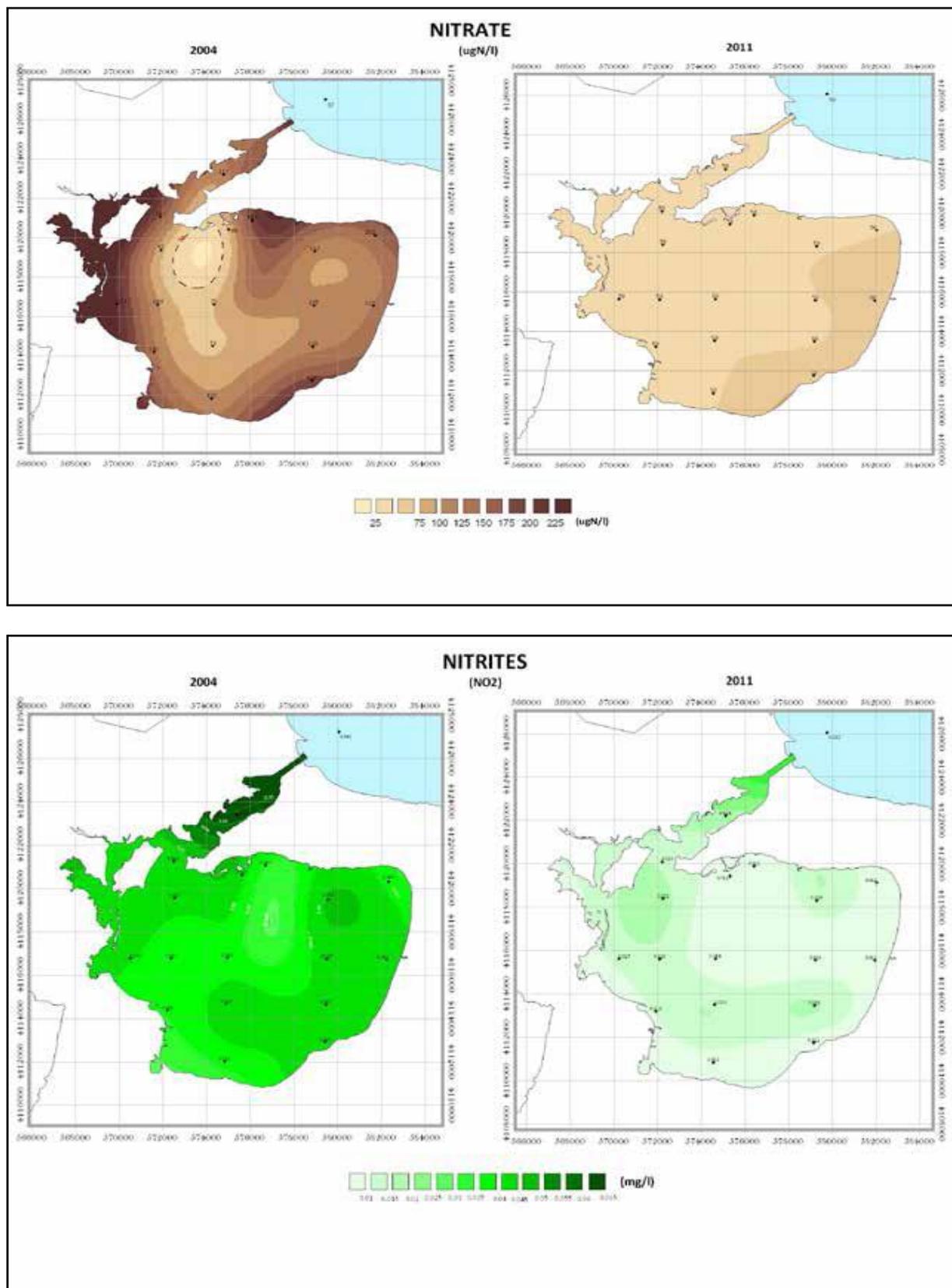


Figure 3 : Cartes de comparaison 2004 – 2011

Les métaux lourds dans l'eau

L'étude menée par IHE-COMETE en 2004 a montré que le niveau de concentration des métaux lourds dans l'eau de la lagune sont inférieurs aux limites de détection des appareils de mesures tels que :

- Le Plomb Pb concentration < 0,025 ppm;
- Le Mercure Hg concentration < 0,0005 ppm;
- Le Chrome Cr concentration < 0,025 ppm;
- Le Cuivre Cu concentration < 0,020 ppm.

Dans toutes les stations à l'exception du Cr. qui atteint 0,031 à la station située dans le goulet de Bizerte (Concentration qui reste toujours très faible). Ces valeurs montrent l'absence de trace de pollution métallique dans les eaux, ceci peut être du aux échanges importants avec la mer.

Conclusion sur la qualité des eaux de la lagune

D'après l'analyse des différents documents disponibles, il apparaît clairement, que dans l'ensemble la répartition spatiale et les teneurs des différents paramètres, ne signale pas une situation d'alerte.

En effet, la variation spatiale du rapport N/P, montre que, mis à part l'exception notée au niveau du Goulet, partout ailleurs le rapport varie entre 12 et 20 ce qui est proche du rapport de Reidfield, ce qui indique la tendance de la lagune à la stabilité écologique.

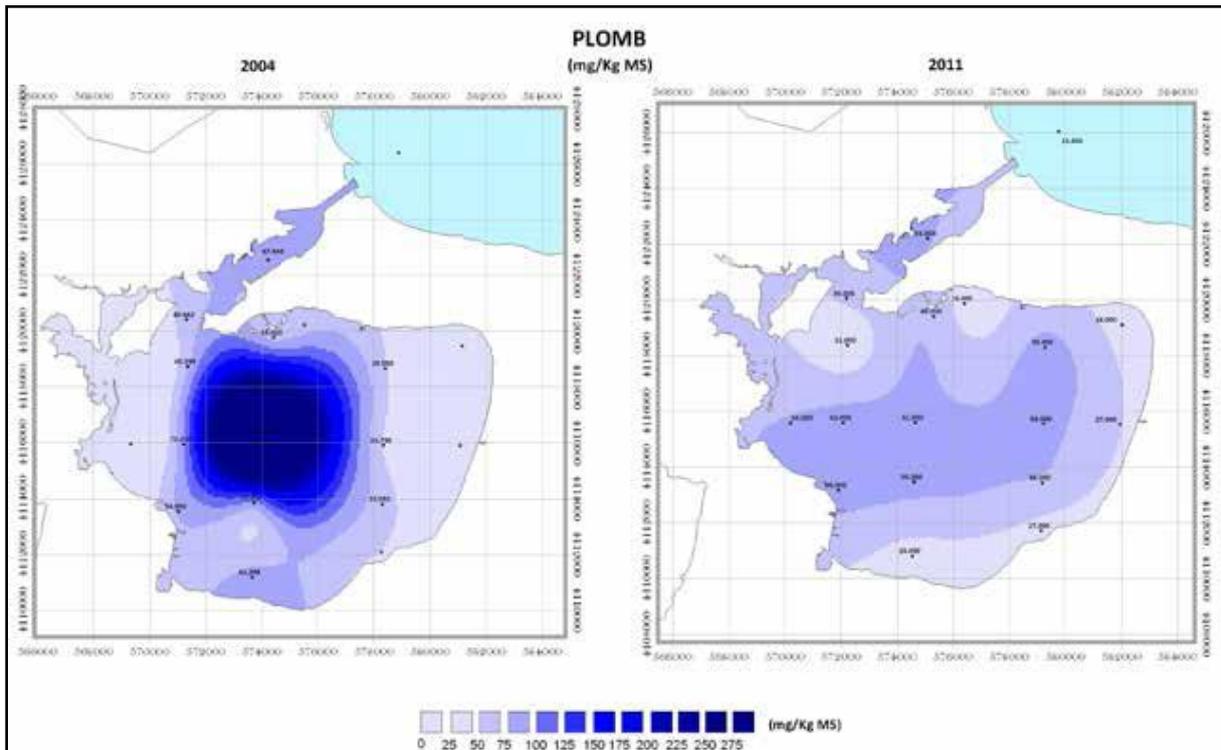
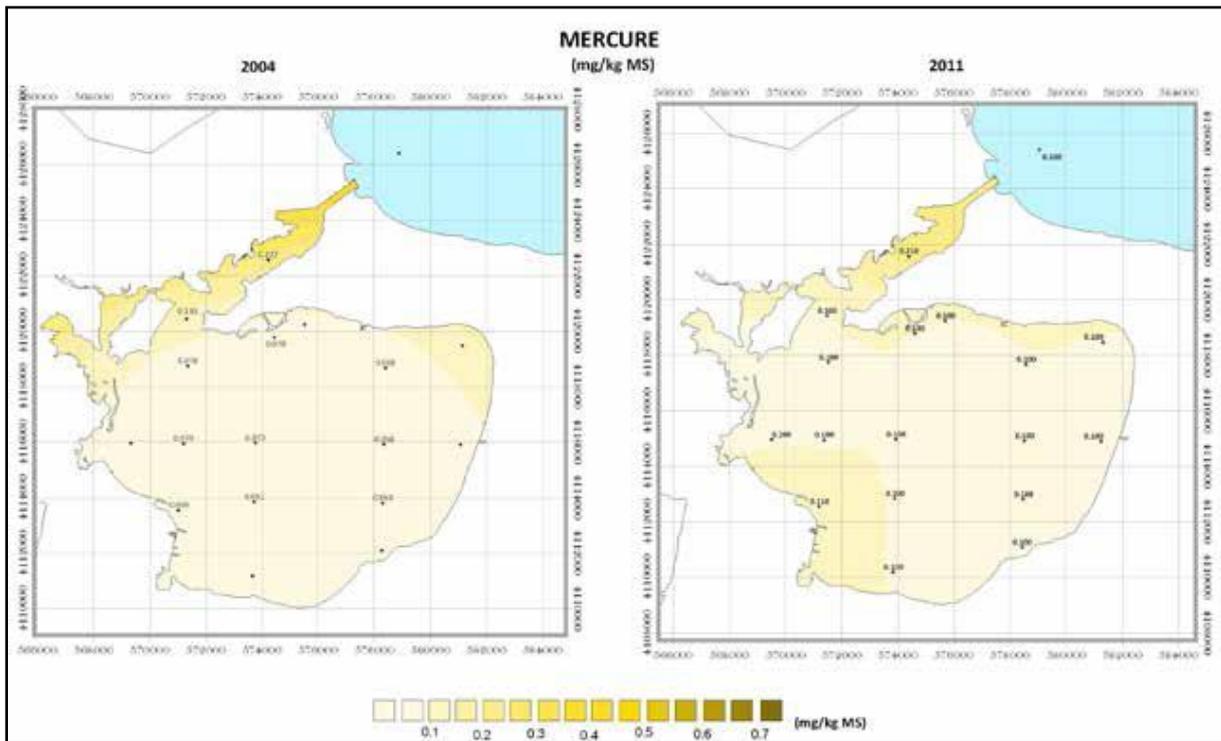
2.2.2 CONTAMINATION DES SEDIMENTS DE LA LAGUNE

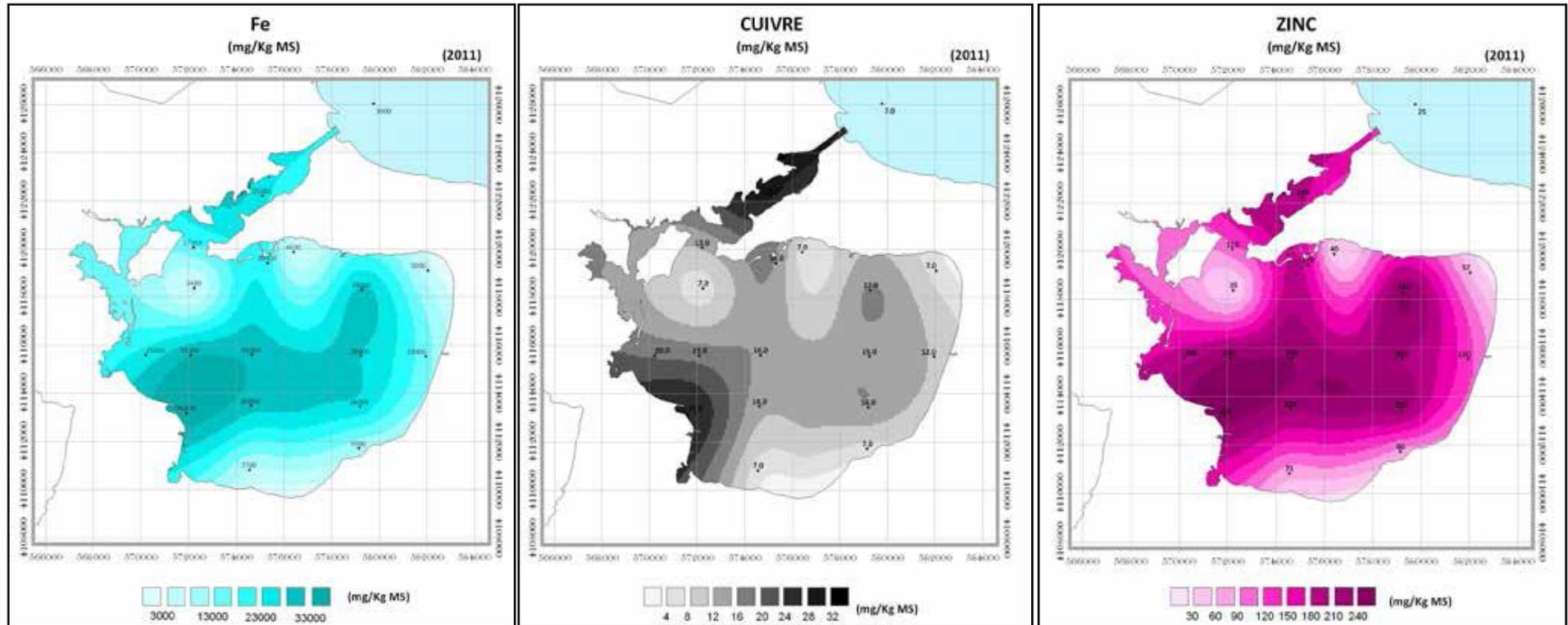
L'ensemble des résultats et conclusions déduits à partir des données bibliographiques et des études sédimentologique, géochimique et biologique, ont permis de dégager les conclusions suivantes :

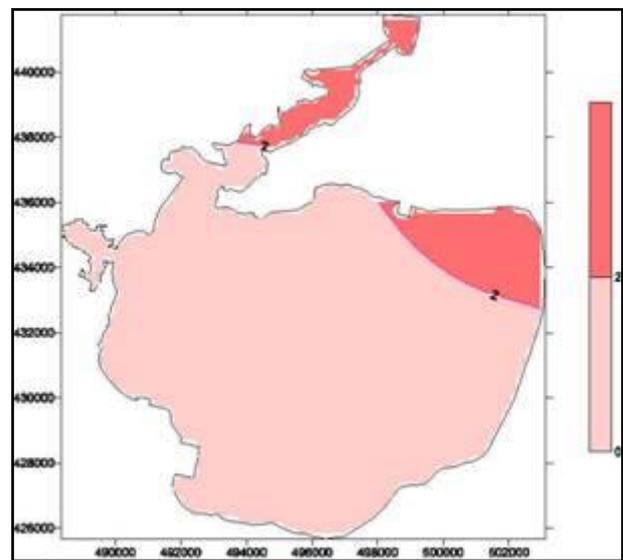
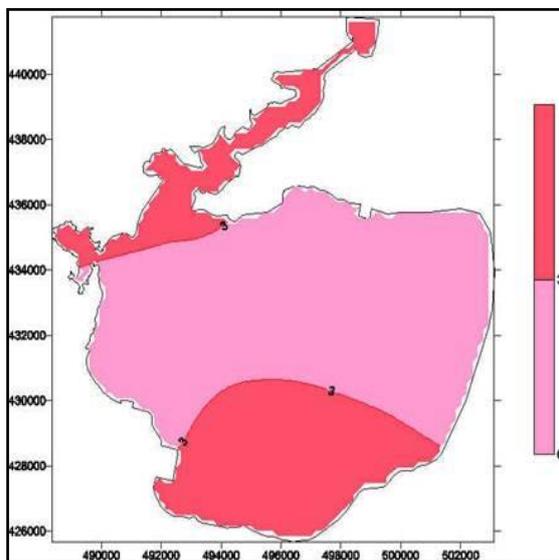
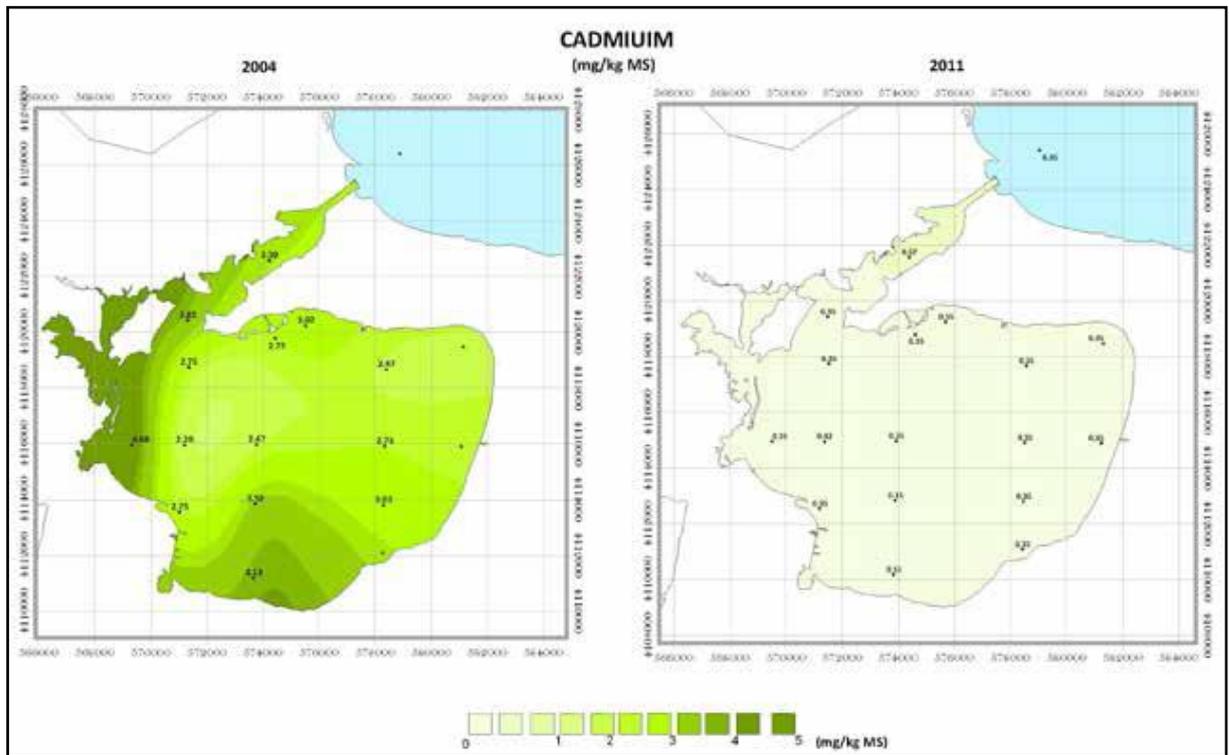
- La charge polluante identifiée au niveau du lac de Bizerte est de deux types :
 - o Une charge minérale représentée principalement par les métaux lourds et nutriments ;
 - o Et une charge organique représentée par la matière organique et les hydrocarbures.
- Une excellente représentation de la charge polluante métallique peut-être illustrée par l'élément Cadmium (Cd) dont la répartition est similaire à celle des autres éléments métalliques analysés. Cette charge polluante en Cadmium montre l'existence de deux zones particulièrement contaminées par cet élément:
 - o Une zone nord, représentée par le Canal de Navigation (le Goulet) et l'aire du lac qui lui est contiguë. Cette zone reçoit plus de 50% du Cadmium déversé dans tout le lac ;
 - o Et une zone sud et sud-est, représentée par l'aire limitrophe de la ville de Menzel Bourguiba. et Menzel Jémil. Cette zone reçoit environ 12,5 % de la quantité totale de Cadmium arrivant au lac ;
 - o Ces deux zones polluées sont séparées par une aire centrale très faiblement polluée.

- La charge polluante organique du lac, exprimée à travers le paramètre Carbone Organique Total (COT), affecte principalement la partie sud est du lac du côté des parcs de conchylicultures de Menzel Jemil. Cette charge organique tire son origine de trois sources possibles :
 - o D'une forte productivité biologique primaire et d'un début de stratification des eaux dans les zones les plus abritées du lac, ce qui occasionne l'installation d'une forte anoxie dans le sédiment et donc la concentration d'importantes quantités de matières organiques. Cette cause constitue la principale source de contamination organique ;
 - o Des apports occasionnés par les rejets urbains des villes et pôles industriels de la région ;
 - o De la mortalité parfois importante de l'espèce crustacée produite dans les parcs de conchyliculture.
- Enfin, La charge polluante en Hydrocarbures présente une répartition particulière avec un maximum enregistré dans la zone centrale et dans le canal de navigation. Cette charge polluante semble être en rapport surtout avec l'activité de navigation du lac, mais aussi avec les rejets au niveau du goulet, issus probablement de la zone industrielle de Zarzouna.

Au niveau du sédiment, les charges polluantes en métaux, en matière organique et en hydrocarbures s'étendent à une profondeur aux alentours de 60 cm. Jusqu'à cette profondeur, le sédiment se présente sous forme d'une vase noirâtre gluante, dégageant une forte odeur d'hydrogène sulfureux (H₂S), témoin sans équivoque de l'installation de l'anoxie dans le sédiment.







Zones rouges ayant une concentration en Cd dans les sédiments >3ppm et des concentrations de Zn >500 ppm

Zones rouges ayant une charge de matières organiques des sédiments > 2%.

Figure 4 : Cartes de comparaison des métaux lourds dans les sédiments de surface (2004 – 2011)

2.2.3 ANALYSE DES RESULTATS

A partir du diagnostic de l'état de pollution du lac de Bizerte il y a lieu de noter tout d'abord que l'état général de celui-ci n'est pas très alarmant, car les éléments polluants minéraux et organiques ne sont pas présents dans des concentrations élevées; dans tous les cas, celles-ci varient entre le "seuil sans effet" et le "seuil a effet mineur".

La carte de la pollution, ainsi dressée, a fait ressortir trois zones de pollution dans le lac. Cette répartition correspond à celle relative aux apports du bassin versant comme suit :

- Une zone eutrophisée, moyennement polluée par le Cadmium de 1000 hectares dans le goulet de Bizerte. Cette pollution provient d'une part, des rejets urbains de la ville de Bizerte dont une grande partie est représentée par l'effluent de la station d'épuration ONAS et, d'autre part, des unités industrielles de Bizerte tels que Tunis Acier, STABYL, Mondher El Ghoul et la Cimenterie de Bizerte (éléments nutritifs N etP, MES, métaux lourds);
- Une zone eutrophisée de 1000 hectares dans le goulet de Bizerte du côté du lac. Ce type de pollution provient essentiellement de la station d'épuration ONAS de Bizerte, des eaux de surface de la ville et de la décharge contrôlée;
- Une zone moyennement polluée par le Cadmium et par le Zinc de 2500 hectares à Menzel Bourguiba. C'est essentiellement d'origine d'El Fouladh et de la zone industrielle Menzel Bourguiba (Rejet en Zinc de 0,9 Kg/jour);
- Une zone eutrophisée de 1500 hectares à Menzel Jemil et au débouché de l'oued Guenniche. Cette pollution correspond à la zone de Menzel Jemil qui reçoit les rejets d'origine industrielle, urbaine et agricole provenant essentiellement de la plaine et de la STEP ONAS d'El Alia. Ces rejets drainés par oued Guennich sont actuellement déchargés dans le lac.
- Une zone non polluée et non eutrophisée de 9000 hectares au centre du lac. Ce sont les zones ayant une profondeur plus de 8m et qui sont loin des zones d'influence urbaines et industrielles.

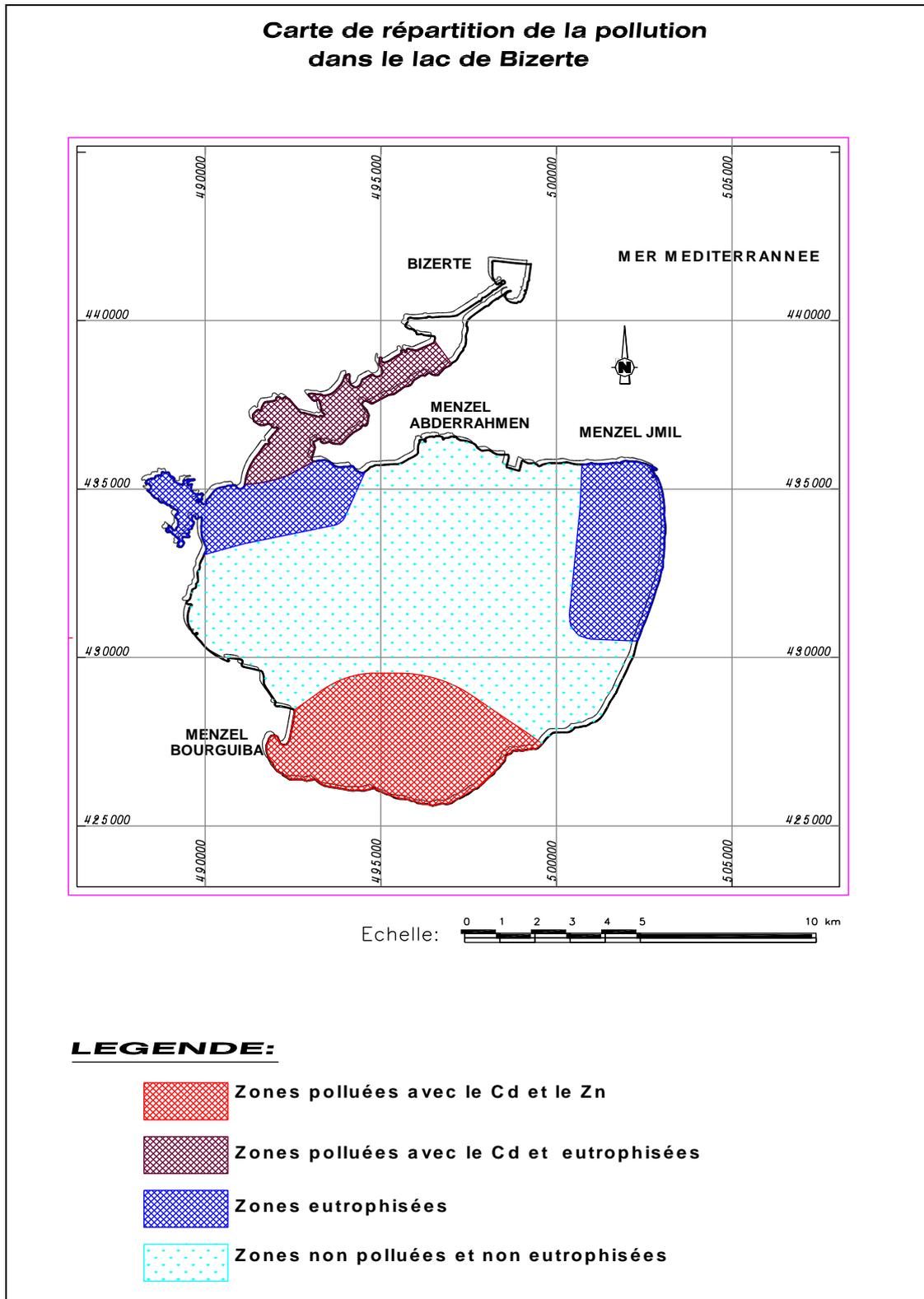


Figure 5 : Carte de répartition de la pollution dans le lac de Bizerte

2.3 PROGRAMMES D'INVESTIGATIONS COMPLEMENTAIRES

Il est à noter que les conclusions et recommandations parvenus dans les études antérieures (citées en références) sont fondées sur un nombre limité d'échantillons notamment à Menzel Jemil. Pour mieux caractériser et cerner la zone d'intervention, nous avons proposés des programmes d'investigations complémentaires.

2.3.1 LEVES TOPO-BATHYMETRIQUES

Pour la région de Menzel Abderrahmane, nous avons proposés un levé topo-bathymétrique couvrant une superficie d'environ 25 ha selon des radiales espacés de 10 à 30 m, pour les levés topographiques et des radiales espacés de 50 m pour les levés bathymétriques.



Figure 6 : Programme des levé topo-bathymétriques de la région de Menzel Abderrahmane

Pour la région de Menzel Jemil, le programme d'investigation couvre une superficie d'environ 1050 ha selon des radiales espacés de 30 à 50 m pour les levés topographiques (fonction de la morphologie est l'accessibilité du terrain) et des radiales espacés de 50 m pour les levés bathymétriques.

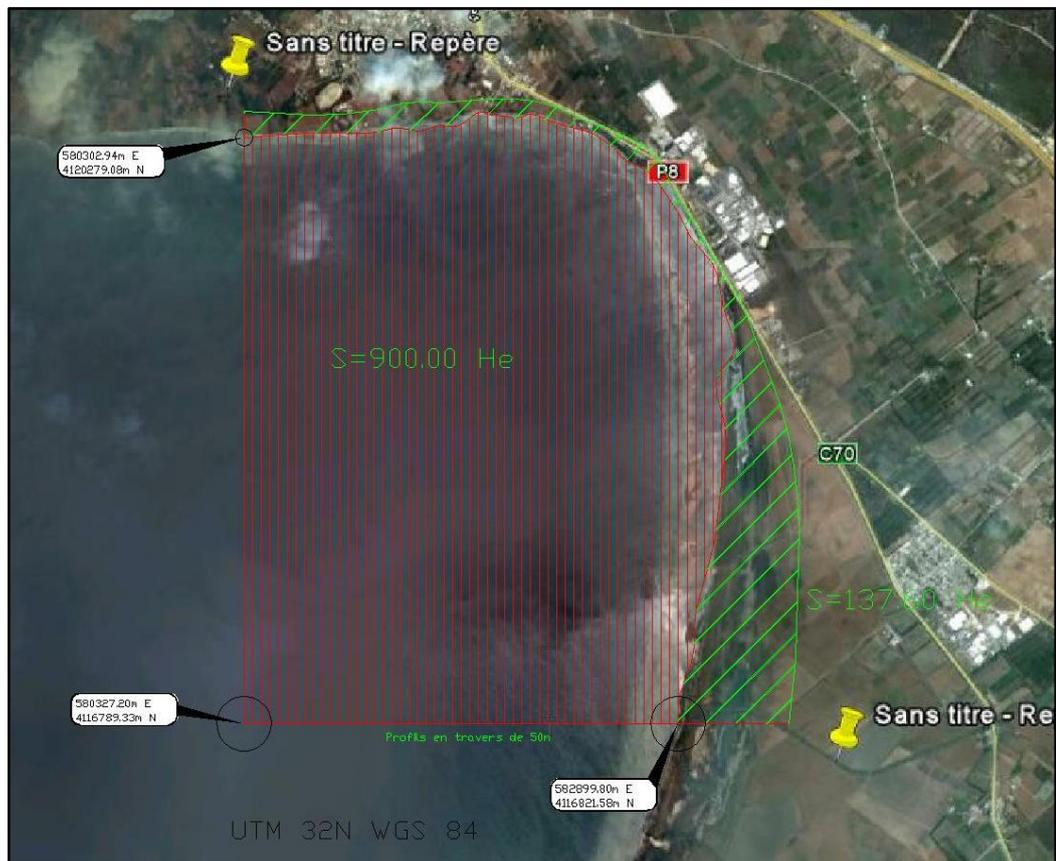


Figure 7 : Programme des levé topo-bathymétriques de la région de Menzel Jemil

2.3.2 PROGRAMME D'INVESTIGATION GEOCHIMIQUE

Le programme d'investigation géochimique proposé comprend le prélèvement de (figure 7) :

- 18 échantillons de sédiments de surface repartis selon 5 radiales équidistantes de 600m, composées de 2 à 4 points de prélèvements positionnés selon un gradient côte-large, en allant du nord vers le sud;
- Trois carottes de 1m de longueur, situées au nord et au sud de la zone d'étude.

Les analyses chimiques des sédiments prélevés comprendront (tableau 2):

- Analyse granulométrique, Carbone Organique Total (COT) et Azote, et ce, pour tous les échantillons ;
- Analyse des Métaux lourds à savoir : l'Arsenic (As), le Mercure (Hg), le Cadmium (Cd), le Plomb (Pb) le Zinc (Zn) et le Nickel (Ni), et ce, pour les échantillons : E1, E3, E5, E8, E11 et E13 ;

- Les Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP par GCMS) à savoir : Benzopyrène (BaP), Acénaphène (ACE), Anthracène (ANT) et le Naphtalène (NAPH) et ce, pour les échantillons : E1, E3, E5, E8, E11 et E13 ;

Deux échantillons de chaque carotte seront recueilli (1 échantillon chaque 50 cm), et subiront des analyses (tableau 3):

- Analyse granulométrique, Carbone Organique Total (COT), Azote, Métaux lourds (l'Arsecnic, le Mercure, le Cadmium, le Plomb, le Zinc et le Nickel), Hydrocarbures aromatiques polycycliques (Benzopyrène, Acénaphène, Anthracène et le Naphtalène).

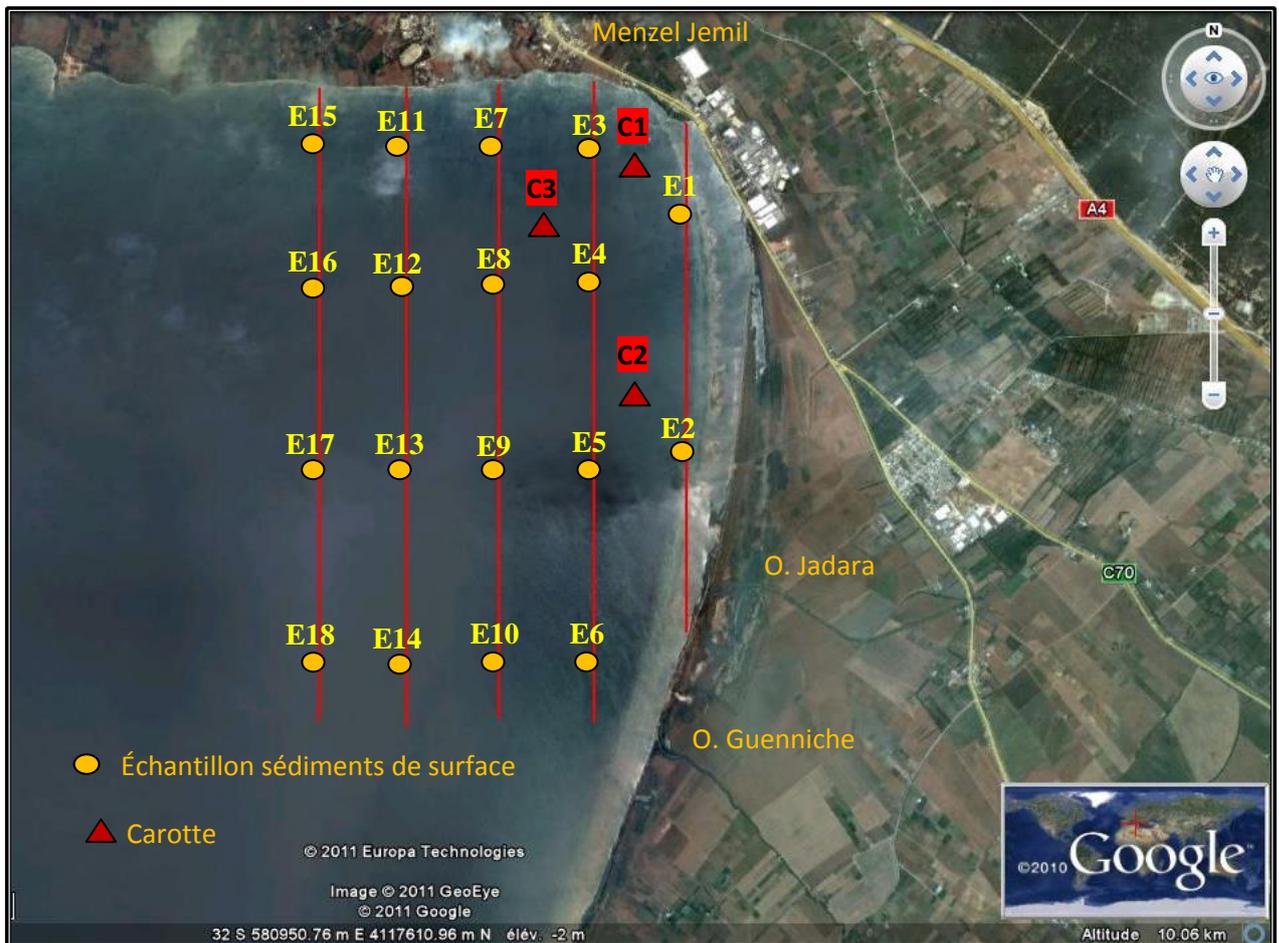


Figure 8 : Carte de localisation des échantillons

Tableau 1: Récapitulatif du programme d'analyses pour les sédiments de surface

Echantillons	Coordonnées (UTM, 32 WGS 84)	Granulométrie	Carbone Organique Total (COT) + AZOTE	Métaux lourds (As, Hg, Cd, Pb Zn et Ni)	Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (BaP, ACE ANT, NAPH)
E1	582780.22 m E	X	X	X	X
	4119155.13 m N				
E2	582797.57 m E	X	X		
	4118053.68 m N				
E3	582155.18 m E	X	X	X	X
	4120091.67 m N				
E4	582150.12 m E	X	X		
	4119120.18 m N				
E5	582171.99 m E	X	X	X	X
	4118125.56 m N				
E6	582181.08 m E	X	X		
	4116197.13 m N				
E7	581503.86 m E	X	X		
	4120046.09 m N				
E8	581520.01 m E	X	X	X	X
	4118827.88 m N				
E9	581526.04 m E	X	X		
	4117614.49 m N				
E10	581539.09 m E	X	X		
	4116201.20 m N				
E11	580875.99 m E	X	X	X	X
	4120049.75 m N				
E12	580885.04 m E	X	X		
	4118833.25 m N				
E13	580897.17 m E	X	X	X	X

Echantillons	Coordonnées (UTM, 32 WGS 84)	Granulométrie	Carbone Organique Total (COT) + AZOTE	Métaux lourds (As, Hg, Cd, Pb Zn et Ni)	Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (BaP, ACE ANT, NAPH)
	4117608.93 m N				
E14	580912.59 m E	X	X		
	4116118.89 m N				
E15	580279.34 m E	X	X		
	4120110.19 m N				
E16	580291.74 m E	X	X		
	4118839.84 m N				
E17	580300.52 m E	X	X		
	4117593.97 m N				
E18	580314.09 m E	X	X		
	4116100.76 m N				

Tableau 2: Récapitulatif du programme d'analyses pour les échantillons des carottes

Carottes	Coordonnées (UTM, 32 WGS 84)	Granulométrie	Carbone Organique Total (COT) + AZOTE	Métaux lourds (As, Hg, Cd, Pb,Zn et Ni)	Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (BaP,ACE ANT, NAPH)
C1	582497.37 m E	X	X	X	X
	4119774.33 m N				
C2	582502.27 m E	X	X	X	X
	4118207.00 m N				
C3	581592.39 m E	X	X	X	X
	4119441.60 m N				

3 ETUDE GÉOCHIMIQUE

Dans le cadre de cette étude, nous avons étudié la répartition du carbone organique total (COT), de l'azote, des métaux lourds (Cd, Pb, Zn, Ni, As, Hg) et des hydrocarbures aromatiques polycycliques. Nos résultats seront comparés aux études antérieures.

3.1 CARBONE ORGANIQUE TOTAL (COT)

Les dosages du carbone organique total effectués dans le cadre de cette étude par la méthode d'oxydation sulfochromique (ISO 14235 (1998)) montrent que les teneurs en COT dans les sédiments superficiels de la partie Est de la lagune varient de 0,49% à 2,37% avec une concentration moyenne de 1,6% (tableau 4).

Tableau 3: concentration du COT dans la lagune de Bizerte – Menzel Jemil

Stations	Menzel Jemil										
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11
COT (%)	1,88	1,99	0,79	1,94	1,87	1,09	1,37	1,87	2,37	1,71	1,54
Stations	Menzel Jemil										
	E12	E13	E14	E15	E16	E17	E18	C1	C2	C3	
COT(%)	1,3	1,74	1,5	1,38	1,67	2,27	1,8	0,49	1,36	1.08	

La carte de répartition du COT dans la zone de Menzel Jemil montre l'individualisation de trois zones principales (figure 8):

- Zone 1, à teneur relativement faible, située dans la partie Nord-Est de la lagune avec des teneurs en COT $\leq 1\%$ (E3, C1 et C3) ;
- La zone 2 est formée de deux sous domaines situés au Nord et au Sud de la zone d'étude avec des teneurs en COT comprises entre 1 % et 1,8% ;
- La zone 3, à teneur élevée en COT, couvre la partie centrale de la lagune. Les concentrations en COT fluctuent entre 1,8% et 2,4%.

Les courbes d'isoteneurs en carbone organique total (COT) montrent que les fortes concentrations (>1.8%) sont localisées dans la partie centrale de la lagune, zone de stagnation des eaux où la vitesse de courant est de l'ordre de 0,5cm/s. Considérée comme zone de dépôt (INSTM, 2012), la partie centrale de la lagune au niveau de Menzel Jemil est dominée par un faciès argilo-silteux, dans cette zone, les fortes teneurs se répartissent selon une direction Est-Ouest. A prédominance d'un faciès sablo-silteux où la fraction fine n'est que de 13%, la partie Nord-Est de la lagune de Bizerte présente les teneurs les plus faibles en COT ($\leq 1\%$). De part et d'autre de la partie centrale, où

l'hydrodynamisme est plus important, les teneurs en COT sont relativement modérées ($1 < \text{COT} < 1,8$) notamment avec l'alternance d'un faciès argilo-silteux dominant et un faciès argilo-silto-sableux.

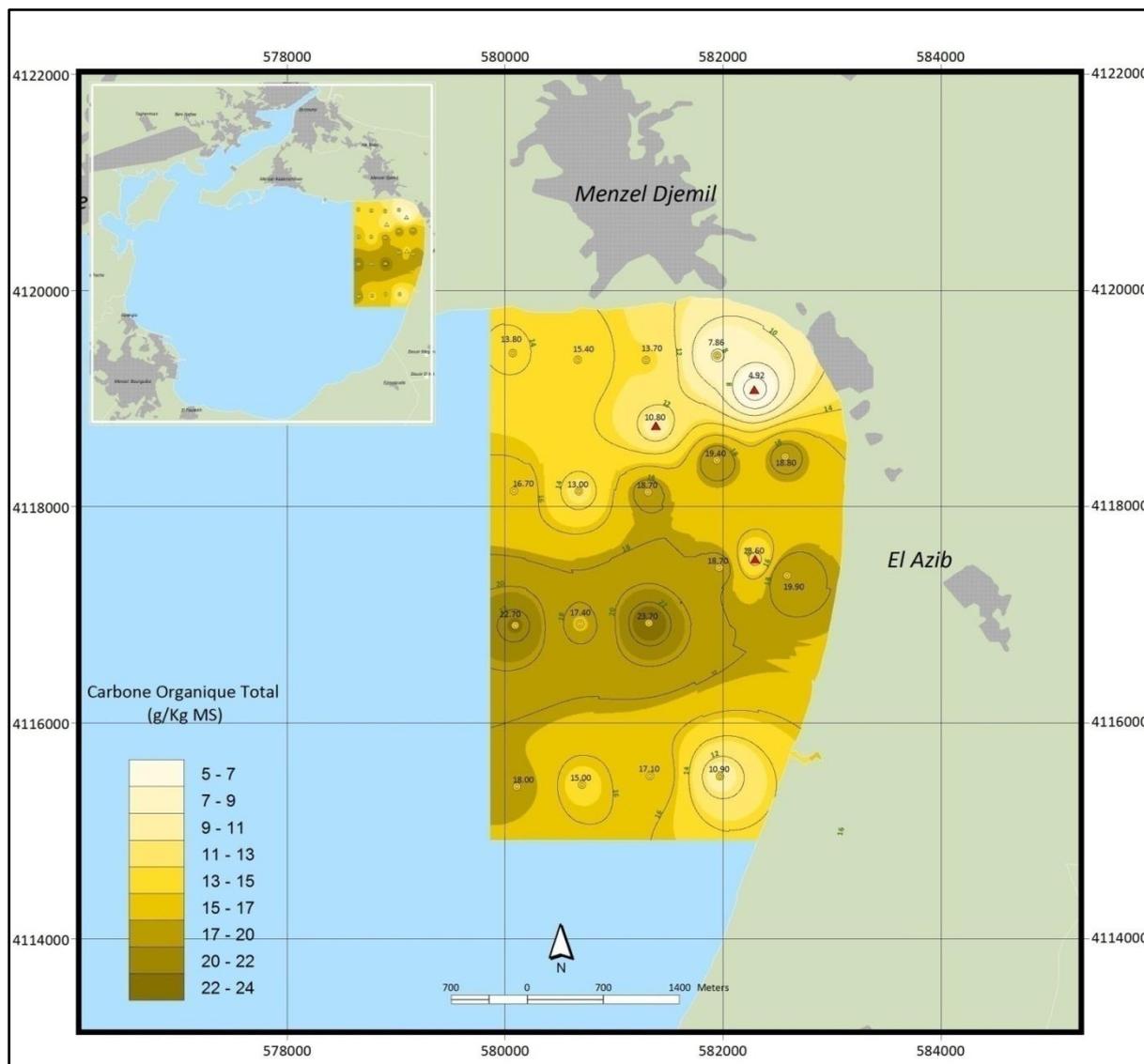


Figure 9 : Carte de répartition du COT

Les teneurs en COT et la répartition spatiale obtenue dans le cadre de cette étude sont différentes de celles des études antérieures.

En comparant les teneurs en COT obtenues dans le cadre de cette étude aux données bibliographiques, nous constatons que les teneurs minimales et maximales sont du même ordre de grandeur. Toutefois, les cartes d'iso valeurs de COT montrent quelques particularités pour chaque étude. Ceci peut être expliqué par la répartition spatiale des stations de prélèvements. Néanmoins, nous retrouvons dans les différentes études la même tendance générale de répartition du COT (tableau 5).

Le dosage du Carbone Organique Total réalisé par IHE-Comète Engineering (2004) sur deux échantillons prélevés dans les sédiments de surface de la lagune au niveau de Menzel Jemil, montre des teneurs variant de 1,2% à 3,25%.

D'après cette étude, la répartition spatiale des teneurs du COT est décroissante du Nord vers le Sud, la source probable de cette contamination serait l'installation des parcs de conchyliculture.

Ben Garali et al. 2010, dans un article publié en Arab Journal of Geoscience, a étudié la contamination de lagune de Bizerte par la matière organique à travers l'analyse quelques échantillons de sédiment de surface. Au niveau de la zone d'étude, deux échantillons ont subi le dosage du COT, le premier à Menzel Jemil, le deuxième à l'embouchure de l'Oued Guenniche. Les résultats proposés par cette étude sont du même ordre de grandeur que la présente étude, avec une fluctuation du COT entre un minimum de 0,8% et un maximum de 2,4%.

Dans le même contexte, Essid et al. 2007 (in ATKINS, 2011) a proposé une valeur du COT de 2,5% dans les sédiments de surface aux alentours des fermes conchyliques de la lagune où les sédiments sont fortement dominés par la fraction fine (78-83%).

Tableau 4: Comparatif des teneurs du COT à Menzel Jemil

Carbone Organique Total COT -Menzel Jemil	
Références	COT (%)
La présente étude - Campagne 2012	0,49 <COT< 2,37
Ben Garali et al-2010	0,8 <COT< 2,4
Essid et al-2007	2,5
IHE-Comète Engineering (2004)	1,2 <COT< 3,25

La classification des échantillons sur la base de leur charge polluante organique n'est pas aisée à dresser et ce pour les différentes raisons suivantes :

- Il n'existe pas de standard tunisien sur la base desquels nous pouvons dresser une classification des sédiments ;
- Dans la région d'étude, nous ne disposons pas de fond géochimique caractérisant les sédiments non affectés par la pollution.

Cependant nous avons essayé de faire une comparaison des résultats avec celles des écosystèmes lagunaires similaires pour en déduire le degré de contamination organique de la lagune de Bizerte – Menzel Jemil.

La lagune de BOUGHRARA, située au Sud-est de la Tunisie, est un milieu soumis à une forte influence marine susceptible de posséder un taux de biodiversité élevé. L'analyse de quelques échantillons de sédiments de surface a montré que les teneurs du carbone organique total (COT) varient entre 0% et 13,37%.

Les taux élevés en matière organique résulteraient principalement d'une accumulation appréciable de débris végétaux auxquels s'ajoutent d'autres charges organiques dont les plus significatives sont liées à l'activité de la pêche et de l'aquaculture, l'activité portuaire et les rejets directs de l'abattoir de Guellala (Scet Tunisie-Eco-ressources International, 2000).

Une autre lagune qui présente des caractéristiques écologiques similaires à celle de la lagune de Bizerte, située au Nord-est de la Tunisie, est la lagune de Ghar El Meleh, cette dernière présente des teneurs en COT qui varient de 0,05% à 9,66%. La distribution du COT dans le milieu ne se fait pas au hasard. Elle est due aux rejets urbains, aux déversements de la zone de drainage et de l'oued El Kherba et à l'oxydation qui se fait in-situ (Scet Tunisie-Eco-ressources International, 2001).

En comparant les teneurs du COT dans les sédiments de surface des trois lagunes, nous constatons que la lagune de Bizerte-Menzel Jemil présente les concentrations les plus faibles avec un maximum de 2,37%, la lagune de Ghar El Meleh avec 9,66% alors que la lagune de Boughrara est la plus contaminée avec des teneurs de 13,37% (tableau 6).

Tableau 5: Teneurs en COT de trois différents systèmes lagunaires

Ecosystème lagunaire	COT %	
	min	max
Lagune de Bizerte -Menzel Jemil	0,49	2,37
Lagune de Ghar El Meleh	0,05	9,66
Lagune de Boughrara	0	13,37

Il en ressort de cette comparaison, que la lagune de Bizerte bien que contaminée par la pollution organique, sa situation n'est pas critique. Pour la définition d'un seuil limite, on s'est basé sur l'interprétation des résultats des analyses et sur les caractéristiques propres de la lagune. Nous admettons dans cette étude la teneur 1,8% comme valeur seuil acceptable de la qualité du sédiment.

3.2 AZOTE TOTAL

Les dosages de l'Azote total par Titrimétrie (NFISO 11261 (1995)) montrent que les teneurs de cet élément dans les sédiments superficiels de la partie Est de la lagune fluctuent nettement entre des teneurs inférieures à 60 mgN/kg et 2,9.103 mgN/kg.

Tableau 6: concentration de l'Azote total dans la lagune de Bizerte – Menzel Jemil

Stations	Menzel Jemil										
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11
Azote total (mgN/kg)	2,99 .10 ³	<60	<60	<60	2,90 .10 ³	<60	<60	2,53 .10 ³	2,86 .10 ³	2,28 .10 ³	1,03 .10 ³
Stations	Menzel Jemil										
	E12	E13	E14	E15	E16	E17	E18	C1	C2	C3	
Azote total (mgN/kg)	1,66 .10 ³	2,56 .10 ³	2,09 .10 ³	1,57 .10 ³	1,42 .10 ³	2,59 .10 ³	2,27 .10 ³	656	486	1.42 .10 ³	

La carte de répartition de l'azote total dans les sédiments de surface de la lagune de Bizerte - Menzel Jemil présente une variabilité spatiale remarquable, ainsi 3 zones principales se distinguent (figure 9):

- Zone 1, englobe principalement la zone côtière de Menzel Jemil et la côte Est de la lagune jusqu'à Oued Guenniche. Elle est caractérisée par des teneurs faible en Azote total <100 mgN/kg, indice d'une eutrophisation faible du milieu ;
- Zone 2, formée de deux sous domaines situés au Nord et au Sud de la zone d'étude avec des teneurs en Azote total comprises entre 100 mgN/kg et 1500 mgN/kg, ces concentrations sont caractéristiques d'un milieu moyennement eutrophisé;
- Zone 3, zone centrale de la lagune, largement eutrophisée où les teneurs sont très élevées (env. 3000 mgN/kg). La zone de plus forte concentration étant située dans la partie centrale de la lagune et localement au Nord-est de la lagune.

Les valeurs très fortes, notamment dans la partie centrale de la lagune, indiquent l'existence d'une eutrophisation relativement élevée essentiellement d'origine organique.

Les résultats des analyses de l'azote mettent en évidence la faible activité bactérienne responsable de la décomposition de l'azote. Cette faible activité bactérienne est due probablement à l'anoxie des sédiments du milieu. De ce fait, nous pouvons conclure que l'azote présent en grande quantité se décompose lentement notamment dans la partie centrale de la lagune.

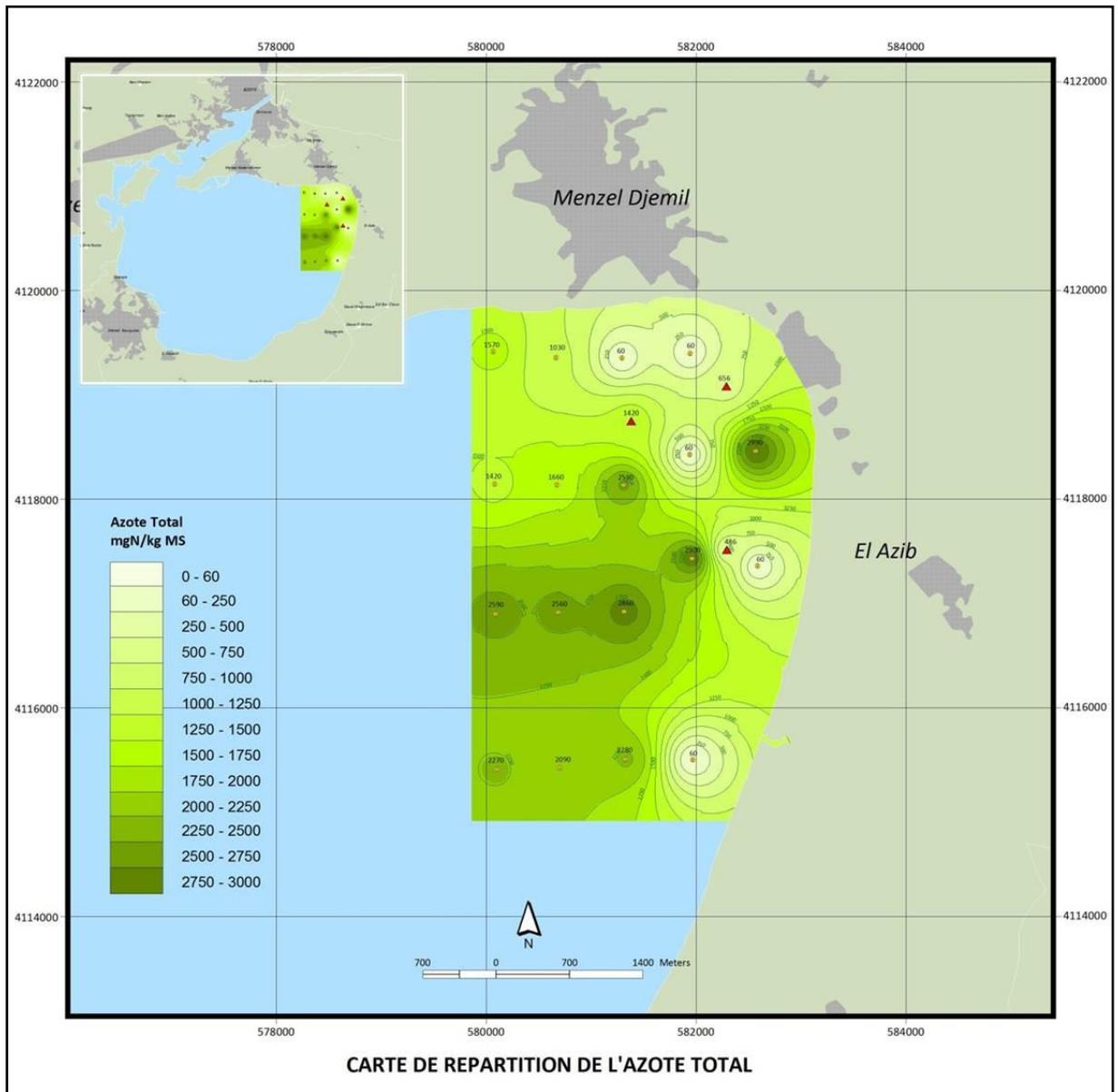


Figure 10 : carte de répartition de l'Azote total

3.3 LES METAUX LOURDS

3.3.1 LE CADMIUM

Les teneurs en cadmium sont insignifiantes. Elles sont en dessous de 0,6 mg/kg, elles oscillent entre un minimum de 0,154 mg/kg et un maximum de 0,577 mg/kg, la concentration moyenne est de 0,365 mg/kg (tableau 8).

Tableau 7: concentration du Cadmium dans la lagune de Bizerte – Menzel Jemil

Stations	Menzel Jemil								
	E1	E3	E5	E8	E11	E13	C1	C2	C3
Cadmium (mg/kg MS)	0,503	0,154	0,497	0,293	0,284	0,577	0,169	0,435	0,375

Les teneurs en cadmium sont en ligne avec les résultats de la campagne de 2011 et notamment avec les résultats de l'étude de Yoshida (Yoshida et al.2002). Ces teneurs sont aussi en dessous des limites admissibles par les normes Canadiennes CCME pour la concentration des polluants dans les sédiments marins (tableau 14).

La répartition spatiale du cadmium montre une concentration des fortes teneurs au centre de la lagune de Bizerte –Menzel Jemil où domine un facies argilo-silteux.

3.3.2 LE PLOMB

Par comparaison avec les résultats de l'étude de Yoshida (Yoshida et al.2002) et les résultats de la campagne de 2011, les teneurs en plomb dans les sédiments superficielles de la lagune de Bizerte – Menzel Jemil, sont dans la même fourchette, ces teneurs sont de loin inférieures aux normes canadiennes CCME 2002 (tableau 14).

Les teneurs du Plomb fluctuent entre un minimum de 2,71 mg/kg et un maximum de 46,5 mg/kg, la teneur moyenne est de 21mg/kg (tableau 9). Comme pour le Cadmium, la répartition spatiale de cet élément montre que la partie centrale de la lagune est sujet des concentrations les plus élevées.

Tableau 8: concentration du Plomb dans la lagune de Bizerte – Menzel Jemil

Stations	Menzel Jemil								
	E1	E3	E5	E8	E11	E13	C1	C2	C3
Plomb (mg/kg MS)	31,8	5,76	36,7	15,7	13,9	46,5	2,71	23,6	11,7

3.3.3 LE ZINC

Les teneurs en zinc fluctuent entre 12,6 et 159 mg/kg, la concentration moyenne est de 74 mg/kg MS. Les teneurs du zinc enregistrées lors de la campagne de 2012 sont en ligne avec celles de la campagne de 2011 et largement inférieures aux résultats de l'étude de Yoshida. Ces teneurs insignifiantes, sont au dessous des normes canadiennes CCME 2002 pour la concentration des polluants dans les sédiments marins (tableau 14).

Les zones de fortes concentrations du zinc coïncident approximativement avec celles du plomb et du cadmium.

Tableau 9: concentration du Zinc dans la lagune de Bizerte – Menzel Jemil

Stations	Menzel Jemil								
	E1	E3	E5	E8	E11	E13	C1	C2	C3
Zinc (mg/kg MS)	124	22,7	132	55	42,3	159	12,6	79,8	39

3.3.4 LE MERCURE

Les échantillons analysés ne montrent pas de concentrations significatives en Mercure. Celles ci sont très faibles ; elles sont comprises entre 0.004 mg/kg et 0.33 mg/kg (tableau 11).

Ces résultats sont en parfaite concordance avec celles de la campagne de 2011 et 2004, elles sont aussi dans la fourchette parvenue dans l'étude de Yoshida et sont en dessous des normes CCME 2002 (tableau 14).

Tableau 10: concentration du Mercure dans la lagune de Bizerte – Menzel Jemil

Stations	Menzel Jemil								
----------	--------------	--	--	--	--	--	--	--	--

	E1	E3	E5	E8	E11	E13	C1	C2	C3
Mercure (mg/kg MS)	0,333	0,006	0,315	0,129	<0,004	0,294	<0,006	0,168	0,03

3.3.5 L'ARSENIC

Les teneurs en cadmium sont faibles. Elles sont en dessous de 12 mg/kg, elles oscillent entre un minimum de 0,154 mg/kg et un maximum de 11,4 mg/kg, la concentration moyenne est de 10,5 mg/kg (tableau 12).

Les teneurs enregistrées au niveau de la lagune de Bizerte – Menzel Jemil sont en dessous des limites admissibles par les normes Canadiennes pour la concentration des polluants dans les sédiments marins, fixées à 41,6 mg/kg.

Tableau 11: concentration de l'Arsenic dans la lagune de Bizerte – Menzel Jemil

Stations	Menzel Jemil									Normes Canadiennes CCME, 2002
	E1	E3	E5	E8	E11	E13	C1	C2	C3	
Arsenic (mg/kg MS)	11	0,154	9,34	7,33	4,17	11,4	4,06	10,5	6	41,6

3.3.6 LE NICKEL

Les teneurs du Nickel dans les sédiments de surface de la lagune de Bizerte – Menzel Jemil oscillent entre 2,92 mg/kg et 22,8 mg/kg, la concentration moyenne est de 12,5 mg/kg. Ces teneurs sont rencontrées, avec la même ampleur, dans l'étude de Yoshida, 2004, avec des teneurs allant de 10 à 25 mg/kg.

La répartition spatiale du Nickel montre une concentration des fortes teneurs notamment au centre de la lagune de Bizerte –Menzel Jemil où domine un facies argilo-silteux, cette répartition est caractéristique de tous les métaux lourds analysés.

Tableau 12: concentration du Nickel dans la lagune de Bizerte – Menzel Jemil

Stations	Menzel Jemil									Yoshida 2004	
	E1	E3	E5	E8	E11	E13	C1	C2	C3	Min	Max
Nickel (mg/kg MS)	18,7	2,92	22,8	8,41	6,72	19,6	13,2	15,8	4,87	10	25

Tableau 13: Comparaisons des résultats d'analyses de sédiments superficiels

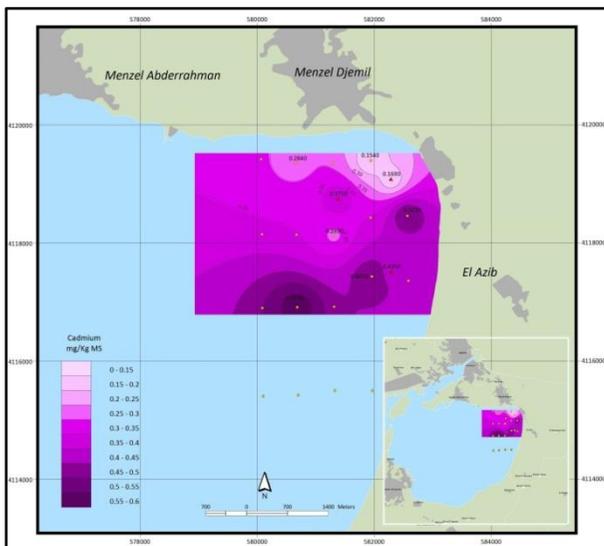
Paramètres	Mercure			Cadmium			Zinc			Plomb		
Campagne	2012	2011	2004	2012	2011	2004	2012	2011	2004	2012	2011	2004
Unité de mesure	mg/kg MS			mg/kg MS			mg/kg MS			mg/kg MS		
Min	0,004	<0,1	0,07	0,154	<0,35	2,2	12,6	<28	-	2,71	<11	24
Max	0,33	0,25	0,22	0,5	0,71	3,85	159	250	-	46,5	140	474
Fourchette Min-Max étude 2002*	0,08 à 0,43			0,3 à 1,5			250 à 2000			35 à 350		
Limite CCEM 2002**	0,7			4,2			271			112		
Background	0,004 à 0,051			0,1 à 0,3			7 à 38			4 à 17		
Concentrations naturelles estimées dans le golfe de Tunis***	n.d			3			114			37		

*Yoshida et al. 2002- Contamination of Potentially Toxic Elements (PTEs) in Bizerte lagoon bottom sediments, surface sediment and sediment repository

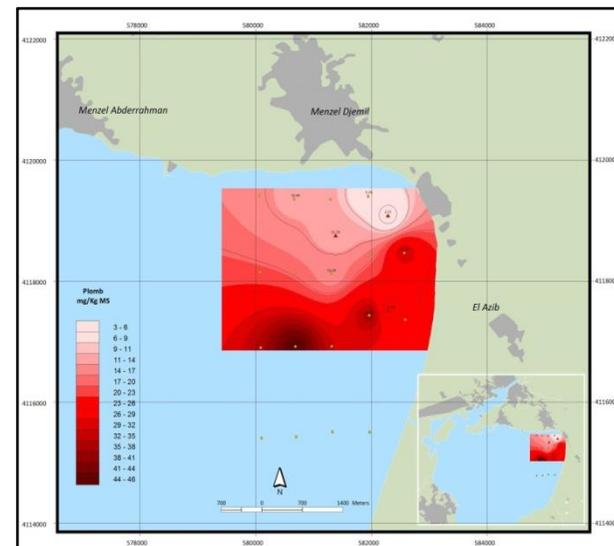
** (Canadian Environmental Quality Guidelines, Canadian Council of Ministers of the Environment 2002)

*** Etude du projet de dépollution du lac de Bizerte, 2004

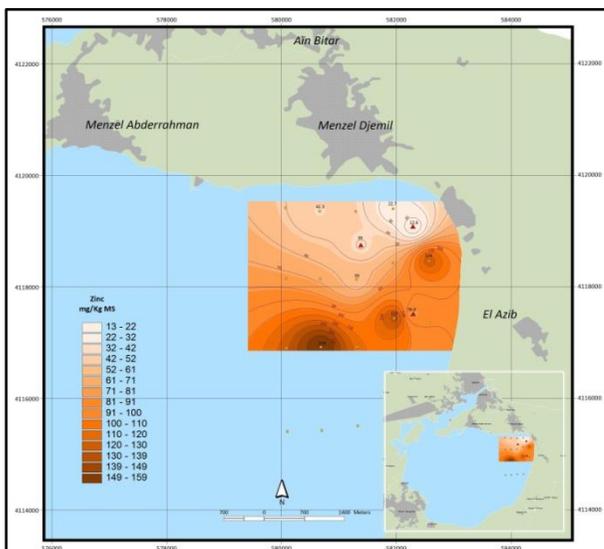
**Carte de répartition
du Cadmium**



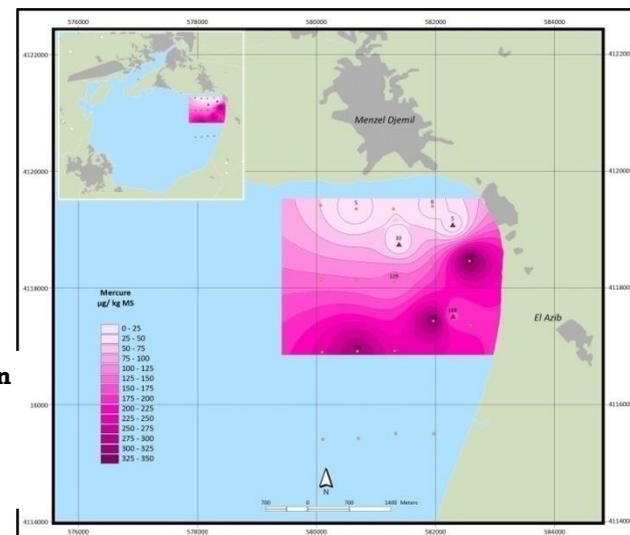
**Carte de répartition
du Plomb**



**Carte de répartition
du Zinc**



**Carte de répartition
du Mercure**



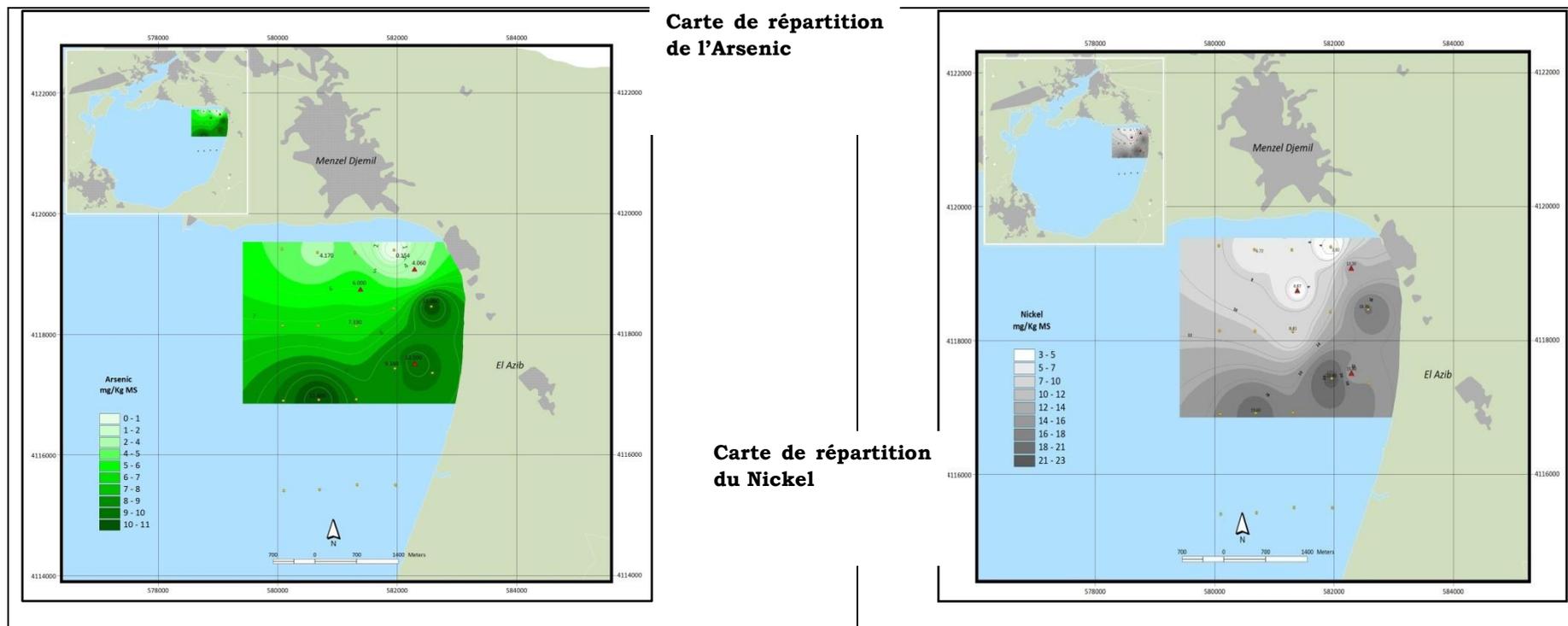


Figure 11 : Cartes de répartitions des métaux lourds dans les sédiments de surface de la lagune de Bizerte – Menzel Jemil

3.4 LES HYDROCARBURES AROMATIQUES POLYCYCLIQUES

Pour l'interprétation des valeurs issues de l'analyse des HAPs dans les sédiments et en l'absence de norme en Tunisie, nous nous sommes basés sur les limites de qualité définies par les normes canadiennes (CCME) pour la concentration des polluants dans les sédiments marins.

3.4.1 LE NAPHTALÈNE

Les teneurs en Naphtalène dans les sédiments superficiels de la partie Est de la lagune de Bizerte sont insignifiantes, elles oscillent entre 0,011 µg/kg et 0,76 µg/kg. Les teneurs enregistrées sont inférieures au seuil sans effet défini par les normes canadiennes CCME, 2002 pour la concentration des polluants dans les sédiments marins, fixé à 34,6 µg/kg (tableau 15).

3.4.2 L'ACÉNAPHTÈNE

Dans les sédiments superficiels de la lagune de Bizerte – Menzel Jemil les teneurs en Acénaphène sont négligeables et sont <0,011 µg/kg dans 80% des échantillons analysés. La teneur maximale enregistrée est de 0,44 µg/kg, largement inférieur aux normes CCME 2002 (tableau 15).

3.4.3 L'ANTHRACÈNE

Tout comme le Naphtalène et l'Acénaphène, l'Anthracène est présents dans les sédiments superficiels de la lagune en faibles quantités, ces teneurs fluctuent entre 0,011 et 1,33 µg/kg et sont inférieures au seuil sans effet fixé à 46,9 µg/kg par la CCME (tableau 15).

3.4.4 LE BENZO (A) PYRÈNE

Les teneurs du Benzo(a)pyrène dans les sédiments superficiels de la lagune, au niveau de Menzel Jemil, sont faibles et inférieures au seuil sans effet fixé par la CCME à 88,8 µg/kg.

En effet la concentration maximale (11,8 µg/kg) est enregistrée au niveau de la station d'échantillonnage E8 située au centre de la lagune (tableau 15).

Les teneurs en Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques se répartissent sur deux aires assez distinctes qui coïncident approximativement avec les zones de distributions des teneurs en COT. On distingue ainsi :

- Zone 1, à teneurs négligeables, située sur la rive Nord – Est et Est de la lagune de Bizerte – Menzel Jemil ;
- Zone 2, où les teneurs en HAPs sont relativement élevées, localisée au niveau de la partie centrale de la lagune.

Tableau 14: Teneurs des HAPs dans les sédiments superficiels de la lagune de Bizerte

Stations		Menzel Jemil									Normes canadiennes CCME 2002 (Seuil Sans Effet)
HAPs	Unité	E1	E3	E5	E8	E11	E13	C1	C2	C3	
Naphtalène	(µg/kg MS)	0,76	0,3	0,64	0,52	0,54	0,76	0,27	0,01	<0,011	34,6
Acénaphène		<0,011	<0,011	0,44	<0,011	<0,011	<0,011	0,18	0,04	<0,011	6,71
Anthracène		<0,011	<0,011	0,83	<0,011	1,33	0,63	0,48	0,02	0,5	46,9
Benzo (a) pyrène		7,72	<0,011	6,73	11,8	2,82	2,84	1,45	0,77	8,08	88,8

Il apparaît donc que la répartition des teneurs en HAPs analysées dans les sédiments de la lagune serait liée à la phase organique et sont par conséquent dans la même phase.

3.5 CONCLUSION

Il en ressort de l'interprétation des résultats des analyses, que les sédiments de la lagune de Bizerte – Menzel Jemil manifestent un enrichissement notable en carbone organique total et en azote notamment dans la partie centrale de la lagune, partie profonde et envasée. Ces conditions favoriseraient une eutrophisation du milieu surtout en saison estivale, marquée par des hausses prononcées de la température et pendant la période des mortes eaux.

L'analyse des métaux lourds dans les sédiments de la lagune, au niveau de Menzel Jemil, n'a révélé aucune pollution métallique. Les différentes teneurs enregistrées sont très faibles voire insignifiantes. Elles sont très en dessous des seuils fixés par les normes canadiennes CCME 2002 pour la concentration des polluants dans les sédiments marins.

La répartition spatiale des éléments analysés à savoir le COT, Azote total, métaux lourds et HAPs, est identique avec, en particulier, l'individualisation de la zone centrale de la lagune comme zone de concentration. Cette répartition confirme que ces différents polluants sont dans la même phase et par conséquent proviennent de la même origine.

3.6 MENZEL BOURGUIBA – ORIGINE PROBABLE DE LA POLLUTION DE MENZEL JEMIL

L'étude hydrodynamique réalisée dans le cadre de ce projet a montré que les eaux de surface, soumises à des tensions du vent du secteur Nord-Ouest (situation dominante dans la région de Bizerte), se déplacent vers le Sud-Est en longeant principalement les côtes Nord et Sud. La

composante Nord du courant longe la côte de Menzel Abderrahmane, Menzel Jemil puis se réoriente vers le Sud-est alors que la composante Sud longe la côte de Menzel Bourguiba et se propage vers l'Est voire Nord-est.

Les deux composantes du courant se rencontrent à l'Est de la lagune, au niveau de la zone d'étude, le sens de la circulation s'inverse vers la direction Nord-Ouest : en effet, les courants les plus forts se trouvent au niveau des bords Nord, Ouest et Sud. Au centre et à l'Est de la lagune, les courants sont relativement faibles. Une fois que les deux composantes du courant se rencontrent, les eaux se plongent vers le fond et se redirigent vers le secteur Nord-Ouest.

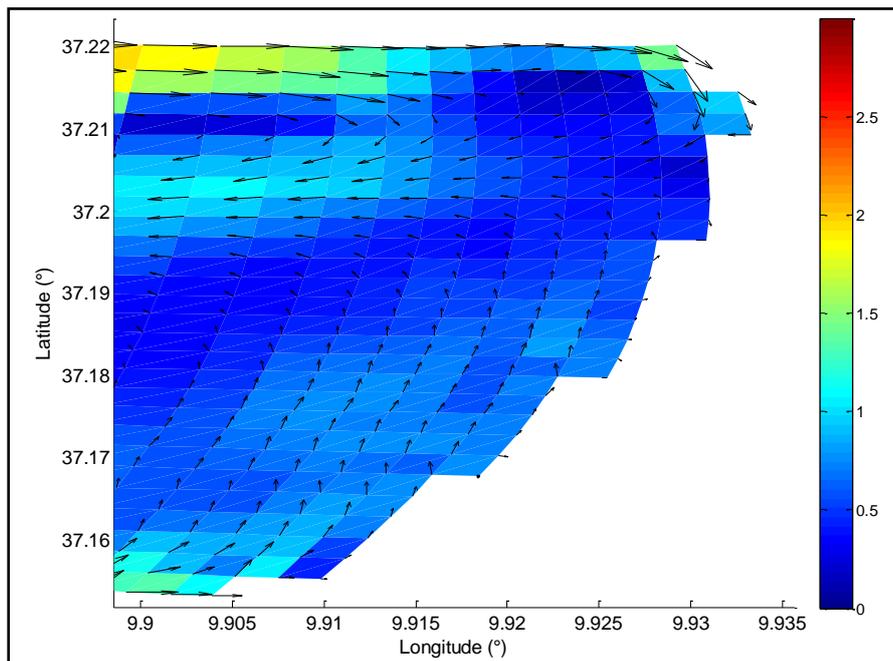


Figure 12 : Répartition et intensité des courants barotrope moyen du secteur Nord-Est

Le déplacement des masses d'eaux avec une vitesse moyenne de 5cm/s, notamment pour la composante Sud, entraîne une dynamique sédimentaire assez importante : les sédiments contaminés (pollution organique et métallique) de Menzel Bourguiba se déplacent par suspension vers le Sud-est de la lagune où prédomine un faciès argilo-silteux (Ouakad, 2007).

Les sédiments contaminés se déposent par décantation dans la partie Est de la lagune, au niveau de la zone d'étude, où la vitesse du courant est la plus faible avec moins de 0,5cm/s en période estivale. La zone d'étude, caractérisée par un faible hydrodynamisme (zone de stagnation des eaux), serait donc la zone de dépôt (zone d'accumulation) des polluants de la lagune de Bizerte.

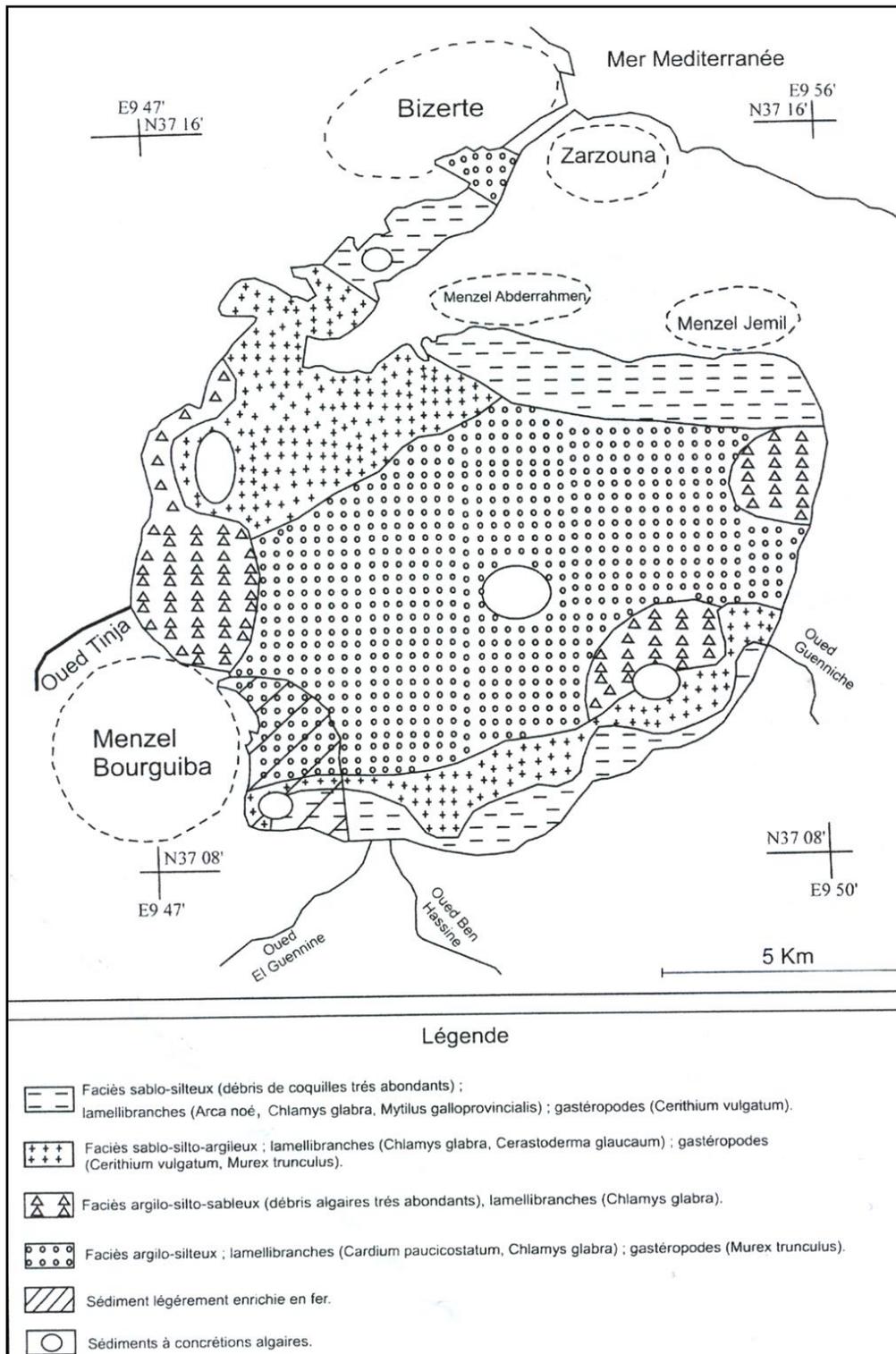


Figure 13 : Carte des sédiments superficiels de la lagune de Bizerte (Ouakad, 2007)

4 DONNÉES HYDROGRAPHIQUES ET MÉTÉOROLOGIQUES

4.1 NIVEAUX DE REFERENCE

Le niveau de référence des Cartes Marines (ou Zéro Hydrographique) est un niveau conventionnel. La position du ZH par rapport au Niveau Général de la Tunisie (NGT) varie beaucoup depuis le Nord jusqu'au Sud de la Tunisie. En face de la lagune de Bizerte, la différence entre les deux niveaux (NGT-ZH) est de 0.53 m (H.P, 1995).

Bien que le niveau moyen de la surface de la mer soit situé à environ 0 m NGT, les variations de ce niveau (dues à la marée, à la variation de la pression atmosphérique, au vent et à la houle) peuvent être importantes. Néanmoins, ces variations ont des périodes très différentes, de quelques secondes à plusieurs mois, selon l'effet.

4.2 NIVEAUX D'EAU

4.2.1 AU NIVEAU DU GOULET DE BIZERTE

Le goulet de Bizerte est un grand canal de navigation, dont la longueur est d'environ six kilomètres, liant la lagune de Bizerte à la mer. La largeur de ce canal varie de 300 m à 190 m seulement sous le pont de Bizerte, sa profondeur atteint 12 mètres. C'est donc à travers ce canal de navigation (ou goulet) que les variations du niveau de la mer se transmettent jusqu'à la lagune de Bizerte.

Les mesures de niveau les plus récentes, dans le goulet de Bizerte, dont nous disposons, sont celles de l'INSTM (2002). Un marégraphe a été placé au bord est du goulet, coté lagune, pendant la période du 28 septembre 1999 au 19 octobre 1999. Les résultats de ces mesures montrent que le niveau varie principalement à cause de la marée et la variation de la pression atmosphérique. L'analyse harmonique de ces enregistrements a montré que la marée est dominée par la composante semi-diurne (de type M₂ de période 12.42 h), dont le marnage est d'environ 0.18 m, qui est modulée avec d'autres modes secondaires. L'amplitude de la marée (ou marnage) a atteint 0.26 m.

La variation du niveau de la surface d'eau, à l'extrémité du goulet de Bizerte, due à la marée est présentée sur la figure suivante (INSTM, 2002).

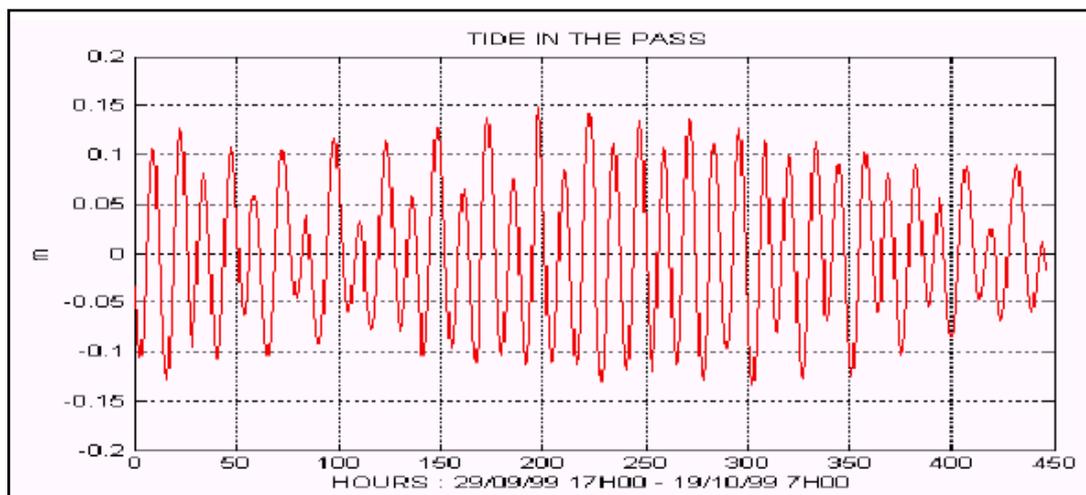


Figure 14 : Variation du niveau dans le goulet due à la marée (INSTM, 2002)

Ces enregistrements montrent que la marée en mer se transmet jusqu'à l'extrémité du goulet sans amortissement appréciable, ceci est dû à la grande profondeur du canal de navigation. Néanmoins, un retard d'environ 1h30 a été observé lors de l'analyse comparative des deux enregistrements (INSTM, 2002). La figure ci-dessous montre une comparaison des marées observées aux deux extrémités du canal de Bizerte, le retard de marée d'environ 1h30 entre les points est noté.

Les variations lentes du niveau de l'eau, dues à la variation de la pression atmosphérique, sont aussi observées jusqu'à l'embouchure du goulet vers la lagune.

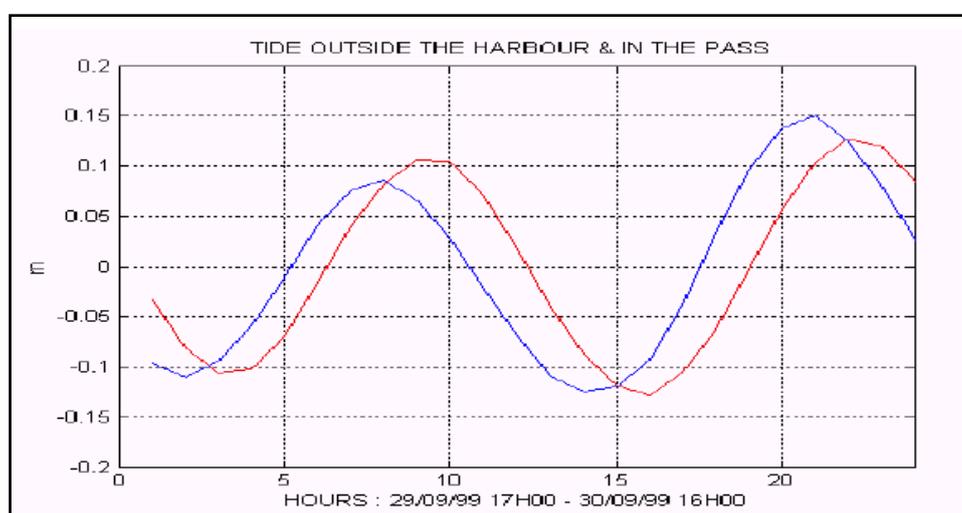


Figure 15 : Comparaison des marées en mer (en bleu) et dans le goulet (en rouge) (INSTM, 2002)

4.2.2 AU NIVEAU DE LA LAGUNE DE BIZERTE

Les niveaux d'eau dans la lagune de Bizerte, comme le montre les mesures du niveau réalisées par l'INSTM (2002) à l'extrémité du goulet, reflètent la marée en mer avec un retard de phase. L'amortissement de la marée dans la lagune de Bizerte devrait être faible comme c'est le cas entre

la mer et le goulet (figure 15). Les simulations du fonctionnement hydrodynamique de la lagune de Bizerte sous l'effet de la marée, réalisées par l'INSTM (2002), confirment que l'amortissement de la marée est négligeable à l'intérieur de la lagune et qu'à partir de la sortie du goulet le retard de phase est aussi faible. En effet, le décalage principal est observé entre la mer et la sortie du goulet.

Par ailleurs, les variations lentes du niveau de l'eau suivent de près celles de l'inverse de la pression atmosphérique suggérant qu'à l'intérieur de la lagune, comme dans la mer, le niveau de l'eau agisse comme un baromètre inversé: les hautes pressions atmosphériques font baisser le niveau dans la lagune par sortie d'eau vers la mer, et les basses pressions atmosphériques font monter le niveau dans la lagune par entrée d'eau marine (INSTM, 2002). L'amplitude de ces variations est relativement importante et atteint 5 cm.

Le basculement du plan d'eau sous l'effet du vent (ou dû au cisaillement interfacial généré par le vent) peut être important. Il peut atteindre la dizaine de centimètres pour les forts vents. Ceci est confirmé par les résultats de la simulation de l'hydrodynamique de la lagune de Bizerte sous l'effet du vent de l'INSTM (2002) : Le modèle montre une dénivellation de 10 cm entre les bords est et ouest de la lagune.

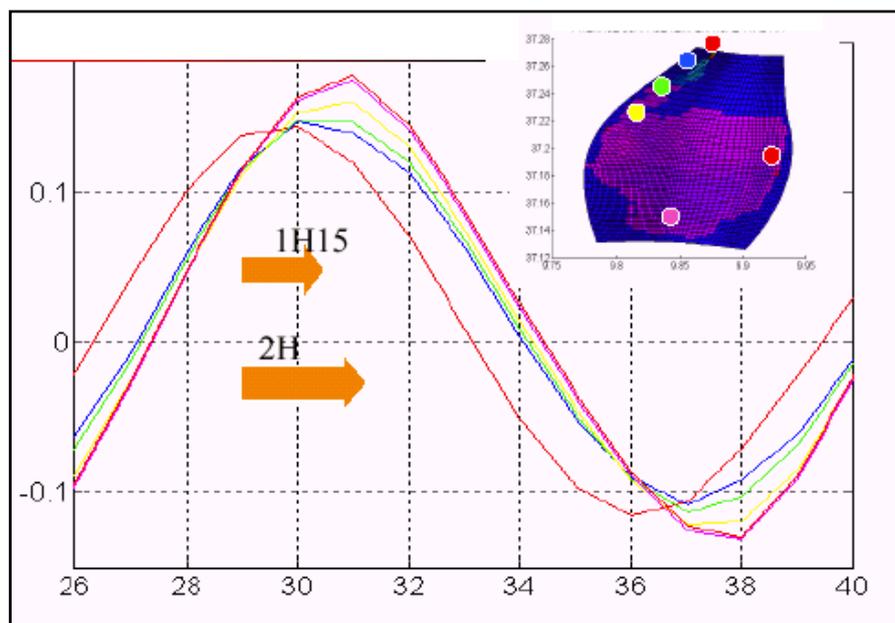


Figure 16 : Niveaux simulés en divers endroits du lac de Bizerte (INSTM, 2002)

4.3 SURCOTES ET DECOTES

La surcote est la différence entre le niveau de mer observé $Z_{obs}(t)$ et le niveau de la mer imposé par la marée d'origine astronomique $Z_{marée}(t)$. Si cette différence est négative, elle est alors appelée décote. Les surcotes sont dues aux effets hydrostatiques (variation de la pression atmosphérique) et aux effets du vent. Les situations de tempête sont les causes principales des surcotes importantes.

En se basant sur les données météorologiques dans des stations côtières, des estimations des surcotes en 17 points, répartis le long des côtes tunisiennes, ont été réalisées en 1995 par "Hidrotécnica Portuguesa". Cette étude montre que, au point le proche de la lagune de Bizerte (noté GTA par H.P. 1995), les surcotes maximales varient de 0,40 m pour une période de retour de 5 ans, jusqu'à 0,50 m pour une période de retour de 50 ans. La décote maximale estimée ne dépasse pas - 0,30 m.

4.4 COURANTS ET CIRCULATIONS DES EAUX

Très peu de travaux traitant la circulation des eaux dans la lagune de Bizerte sont disponibles. Les travaux récents conduits par l'INSTM (2002), Harzallah (2003), Béjaoui et al. (2008) et Béjaoui (2009) à ce propos sont très importants. Ces études ont été complétées dans le cadre du présent projet par l'INSTM (Béjaoui et Sammari, 2012). Le fonctionnement hydrodynamique de la lagune, sous l'effet de la marée et/ou du vent, a été simulé à l'aide d'un modèle à 3 dimensions. Ces simulations donnent des indications importantes concernant la répartition des courants à l'intérieur de la lagune.

En effet, les eaux de surface (figure 16a), soumises à des tensions du vent du secteur Nord-Ouest (situation dominante dans la région de Bizerte), se déplacent vers le Sud-Est pour toutes les régions de la lagune. Les courants les plus forts se trouvent au niveau des bords nord, ouest et sud. Au centre de la lagune, les courants sont relativement faibles. Au fond (figure 16b), l'effet du vent diminue et le sens de la circulation s'inverse vers la direction Nord-Ouest. L'eau ramenée vers la direction Sud-Est, par cisaillement du vent, retourne vers le Nord-Ouest en traversant le centre de la lagune (figure 16b).

Sur les figures 17 sont présentés les courants de surface, les courants de fond et la composante barotrope du courant en été (moyenne des mois de juin, juillet et août). La circulation moyenne des eaux est similaire à celle de la circulation hivernale. Néanmoins, l'intensité des courants est moins importante en conséquence de la diminution de l'intensité du vent. Notons que le vent moyen pendant la période estivale est aussi du secteur Nord-Ouest ce qui justifie la similarité de la structure des courants pendant les deux périodes estivale et hivernale.

En conclusion la circulation des eaux de la lagune peut être schématisée comme suit : les eaux de surface se déplacent, sous l'effet du vent, vers le secteur Sud-Est en longeant principalement les côtes Nord et Sud. Une fois qu'elles atteignent le secteur Sud-Est, les eaux se plongent vers le fond et se redirigent vers le secteur Nord-Ouest pour se diriger finalement vers l'extérieur de la lagune. Une particularité importante de la circulation des eaux dans la lagune est l'apparition de trois cellules de circulation giratoire (Béjaoui, 2009). Une située au Nord, une seconde située au Sud et une troisième moins importante située à l'Ouest. Le sens et l'intensité de l'écoulement dans chaque cellule sont fonction de l'intensité et le sens de l'écoulement moyen.

L'effet de la marée sur la structure des courants à l'intérieur de la lagune est négligeable. La marée intervient particulièrement sur l'échange des masses d'eaux entre la mer et la lagune à travers le goulet (Harzallah, 2003). A cause du mouvement oscillatoire de la marée, ce sont sensiblement les mêmes masses d'eau qui font l'aller et le retour entre la mer et la lagune. Ce mouvement oscillatoire

a un effet important sur le temps de résidence d'une pollution dans la lagune. Rappelons, que l'échange entre la lagune et la Méditerranée dépend, entre autre, des apports en eaux douces dans la lagune. Dans le cas où la précipitation n'arrive pas à équilibrer l'évaporation, l'écoulement dans le goulet est dirigé vers la lagune.

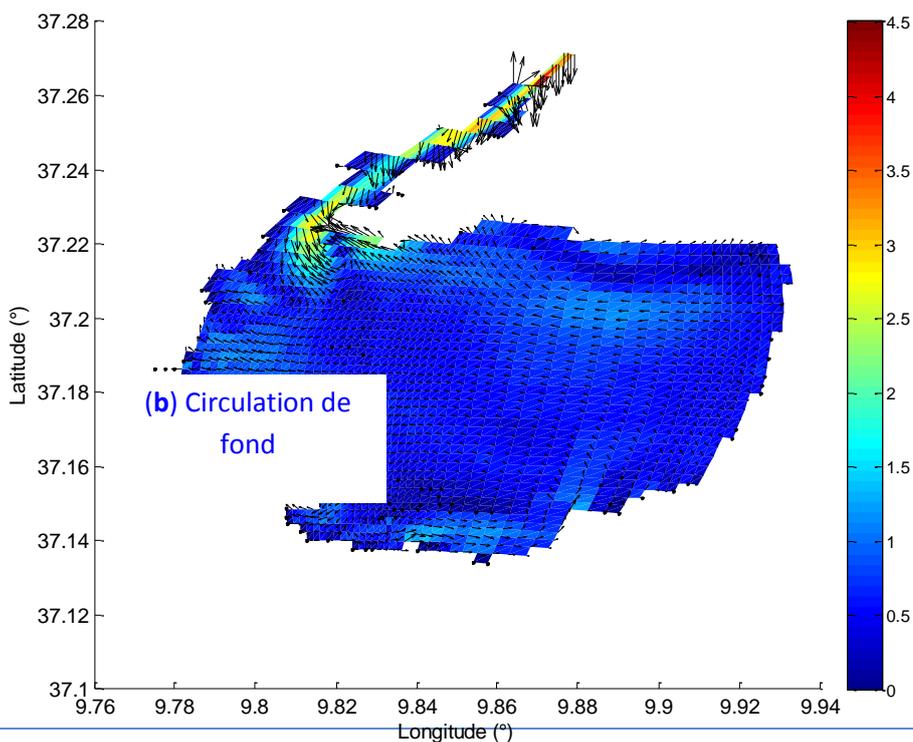
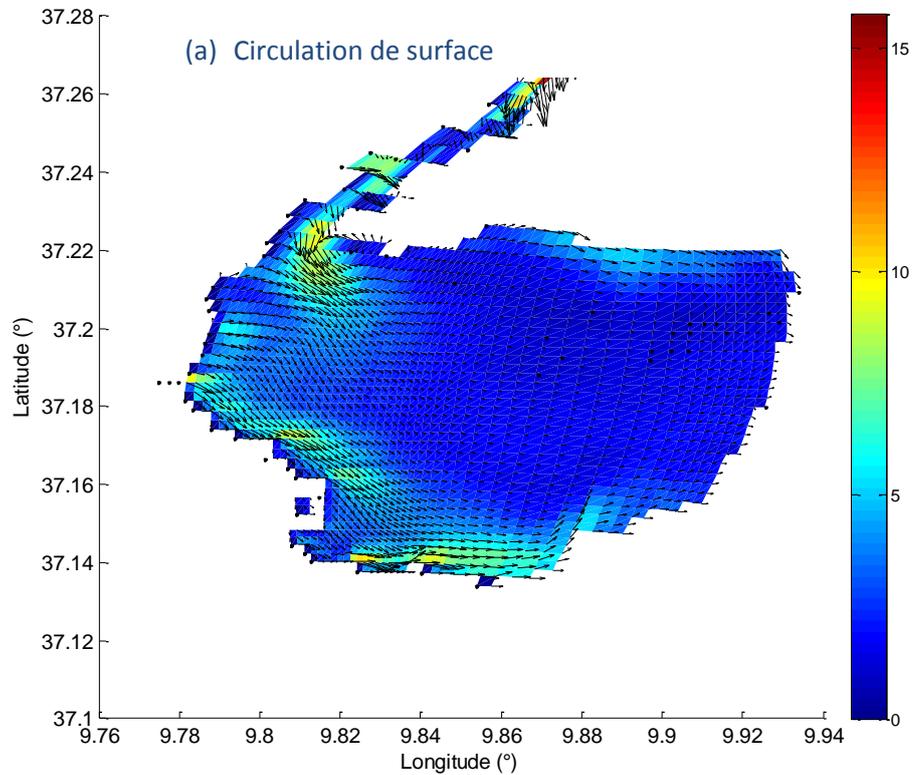
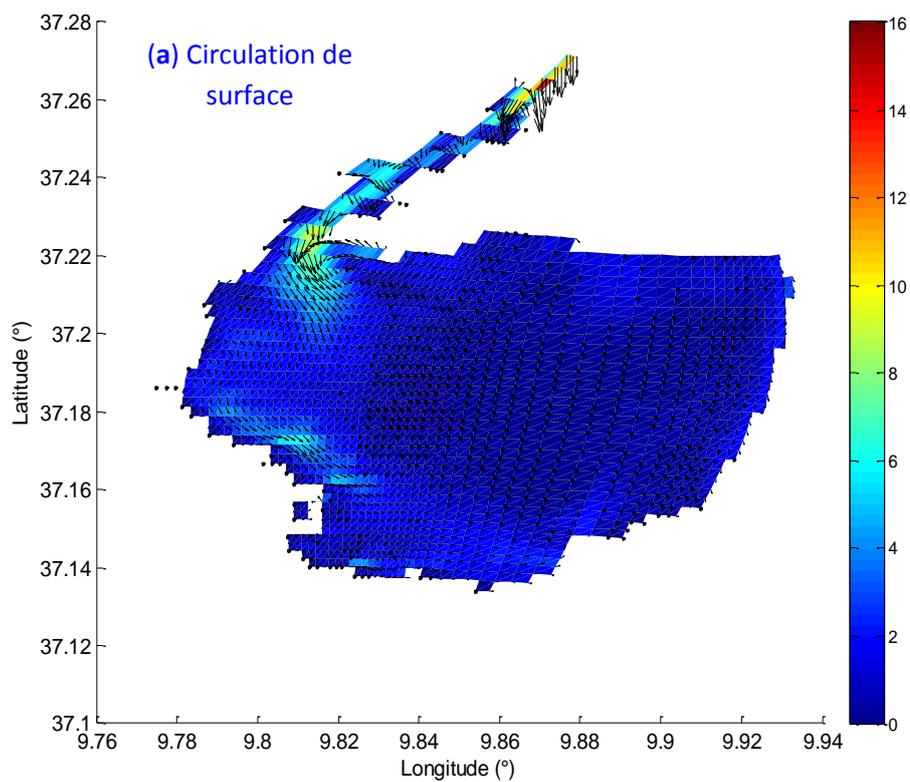


Figure 17 : Circulation hivernale (Direction & Intensité) des eaux dans la lagune de Bizerte. La circulation de surface (a) est plus intense en comparaison à la circulation de fond (b)



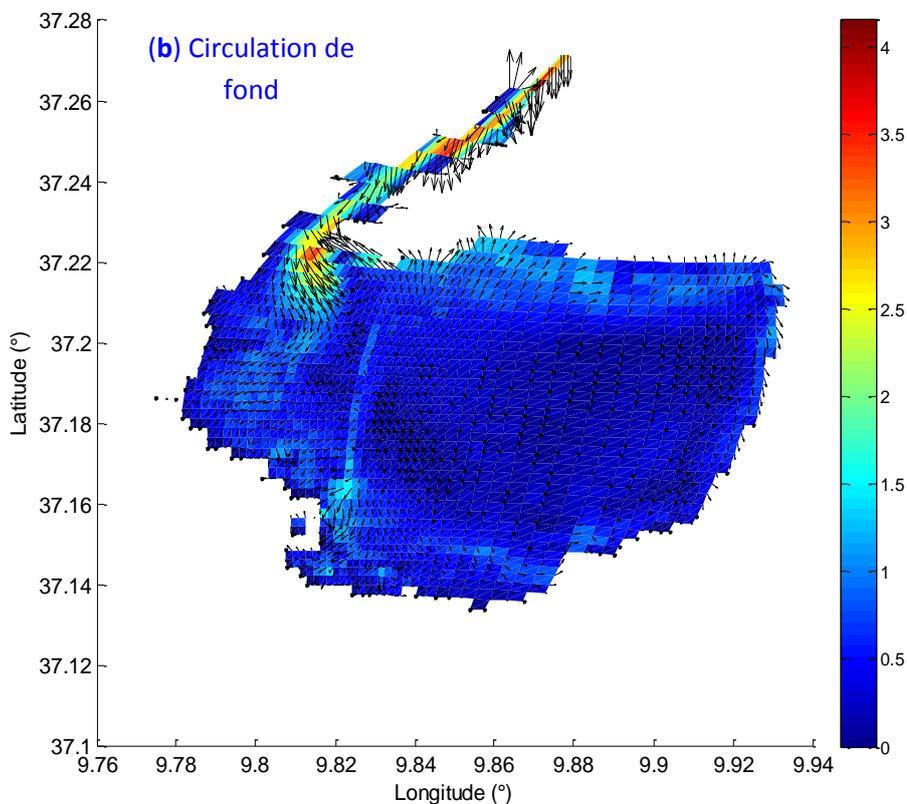


Figure 18 : Circulation estivale (Direction & Intensité) des eaux dans la lagune de Bizerte. La circulation de surface (a) est plus importante en comparaison à la circulation de fond (b)

4.5 PLUVIOMETRIE

Le climat de la région de Bizerte est de type méditerranéen appartenant à l'étage bioclimatique sub-humide. La pluviométrie annuelle varie entre 450 et 650 mm. Les mois de juillet et août sont les mois les plus secs, ils sont caractérisés par des précipitations inférieures à 10 mm et une importante évaporation. Les pluies sont généralement de type averse. Elles ont tendance à lessiver le sol, provoquant des crues et des inondations.

Selon les données climatiques de la station de Bizerte de 1996 à 2006 relevées à l'INM, la pluviométrie mensuelle varie entre un maximum de 108 mm en novembre et un minimum qui ne dépasse pas les 0.8 mm en juillet (Figure 18). Le minimum absolu (0 mm) a été enregistré 9 fois notamment durant les mois de juillet. Le maximum absolu a été atteint en février 1996 avec plus de 251 mm. La moyenne annuelle de cette période est de 536 mm.

4.6 TEMPERATURE

La région de Bizerte se caractérise par des températures élevées en été (27°C en août) et des températures plus clémentes en hiver (11°C en janvier et février) (Figure 19). Les températures les

plus faibles sont enregistrées durant les mois de Décembre et Janvier (11,2°C en moyenne), alors que les températures les plus importantes sont mesurées en Août (26,2°C en moyenne). En été, le climat est tempéré par des brises de mer qui adoucissent les températures. Toutefois, des irrptions de masse d'air très chaud peuvent survenir avec l'avènement du Chhili, vent de secteur Sud, très sec et qui fait monter le thermomètre à plus de 40°C. Les maxima absolus s'élèvent ainsi à 44,8°C en Juillet, 45°C en Septembre et 48°C en Août.

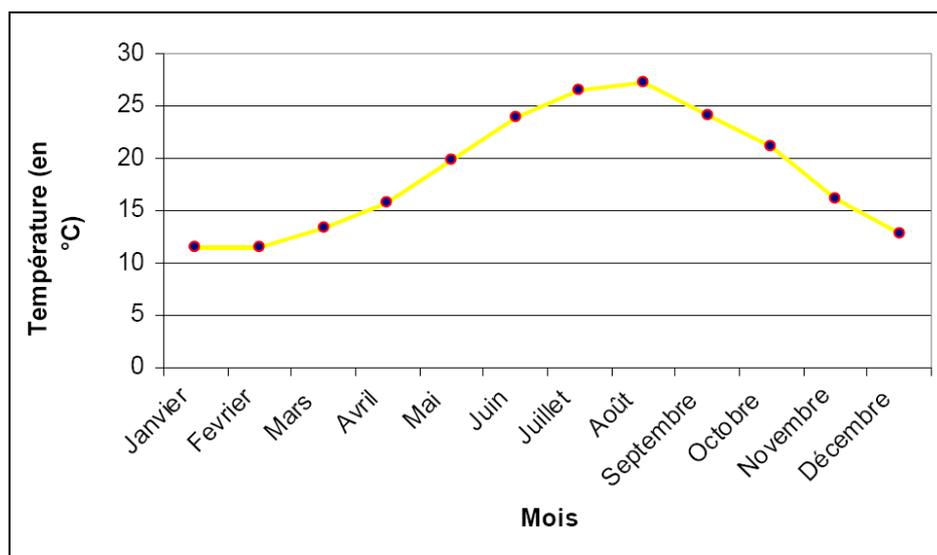


Figure 19 : Evolution mensuelle moyenne de la température à Bizerte entre 1996 et 2006 (INM, 2007)

4.7 INSOLATION

L'insolation au niveau de la ville de Bizerte varie énormément entre les mois. En effet, en juillet l'insolation atteint 377 heures alors qu'elle ne dépasse pas les 155 heures en décembre. La moyenne mensuelle enregistrée entre les années 1996 et 2006 est de 254 heures.

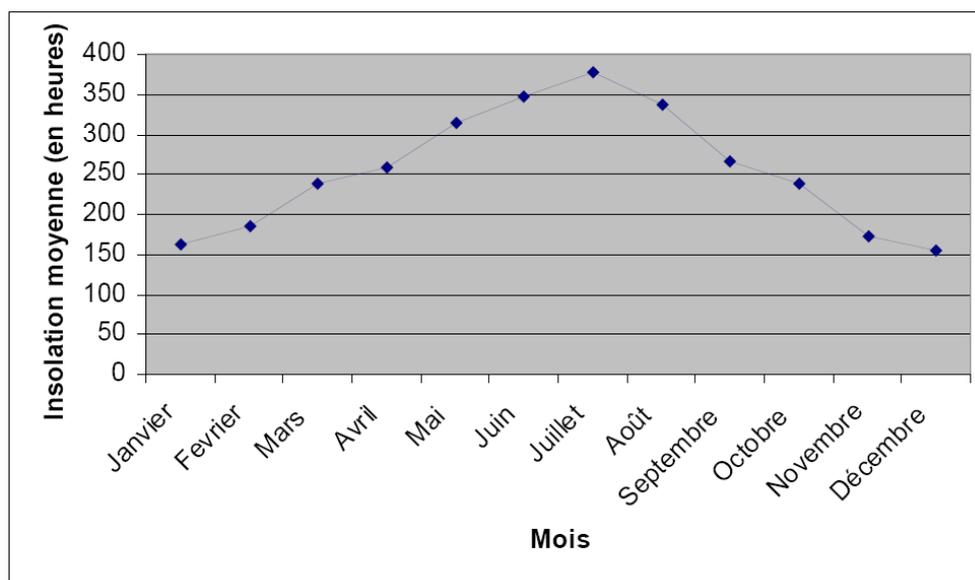


Figure 20 : Evolution mensuelle moyenne de l'insolation à Bizerte entre 1996 et 2006 (INM, 2007)

4.8 ÉVAPORATION

L'évaporation dans le lac de Bizerte est inférieure à celle mesurée dans la ville de Bizerte et au niveau de Tinja et ce à cause des caractéristiques thermiques et du pouvoir évaporant différent de l'air. L'évaporation présente une moyenne annuelle de 1230 mm/an. En été, on assiste à une forte évaporation par suite des températures élevées et de la faible humidité relative de l'air. Le tableau 16 résume les valeurs de l'évaporation pour le lac mesurées à la station météorologique de Bizerte.

Tableau 15: Evaporation à Bizerte

Mois	Sept.	Oct.	Nov	Dec	Janv	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août
Évaporation (mm)	121	87	65	159	62	70	76	84	103	128	169	173

4.9 HUMIDITE ATMOSPHERIQUE

L'humidité relative de la région de Bizerte est élevée, ce qui traduit une forte influence de la mer, elle oscille entre 67,0% (Juillet) et 77,3 % (Janvier). Décembre et Janvier sont les mois les plus humides avec une moyenne de 77,3% alors que la moyenne annuelle est de 72,7 %.

Tableau 16: Humidité en % (Bizerte)

	Janv	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Sept.	Oct.	Nov	Dec
Moyenne	77,3	75,0	74,3	73,3	70,7	67,3	67,0	68,3	72,0	75,3	74,3	77,3

4.10 VENT

Le vent est un élément particulièrement important à Bizerte et sa région. Cette importance se manifeste à travers la fréquence et la vitesse des différentes masses d'air mais aussi à travers leur impact sur les formes de vie et la dynamique de différents compartiments du milieu naturel.

C'est grâce au vent que la région doit ses champs dunaires parfois étendus et c'est de lui aussi que dépend en bonne partie l'état de la mer de la lagune et les caractéristiques hydro-sédimentaires du site d'étude.

Les vents les plus fréquents soufflent des secteurs septentrionaux. Ceux qui viennent du Nord-Ouest prédominent toutefois à toutes les échelles de temps mais dominant surtout au cours de la saison hivernale. Quant aux vitesses, les moyennes peuvent paraître faibles. Pour la période 1985-1994 par exemple, elles ont varié entre 3,3 et 4,6 m/s. En fait, ceci cache les vents forts. Les coups les plus violents se produisent surtout au début du printemps. C'est ainsi que le 16 avril 1954 a été enregistré un vent de 50 m/s soit 180 km/h; le 26 mars 1983 120 km/h. Les vents des secteurs Est et Sud soufflent surtout pendant la saison estivale sous forme de brises de mer ou de sirocco.

En outre, l'analyse de l'évolution mensuelle de la vitesse moyenne des vents montre que le mois de juillet est le mois le plus venteux avec des vents atteignant les 4.4 m/s et que le mois le moins venteux est octobre avec 3.4 m/s.

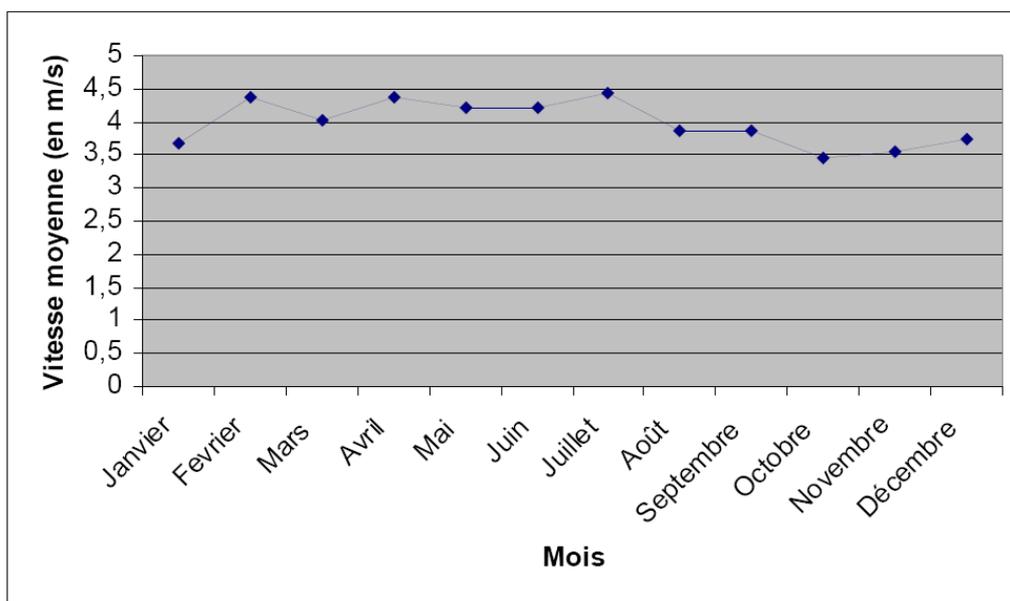


Figure 21 : Evolution mensuelle moyenne de la vitesse moyenne du vent à Bizerte entre 1996 et 2006

La rose des vents de la station de Bizerte de 1981 à 2004 indique une prépondérance des vents de secteur Ouest et Nord-Ouest. Les vents calmes quant à eux ne dépassent pas les 12.4 %.

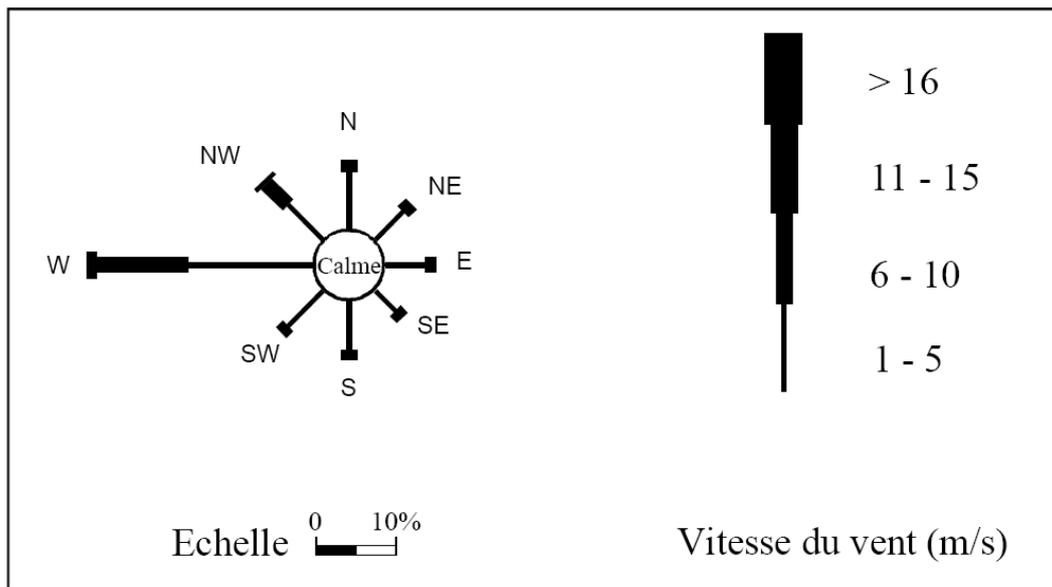


Figure 22 : Rose des vents de la station de Bizerte entre 1981 et 2004 (INM, 2007)

Au niveau de la station de Tunis (aéroport Tunis Carthage), les vitesses et directions de vent et les fréquences d'occurrence par direction observées à la station météorologique de Tunis – Carthage (vitesse moyenne sur 10 minutes – mesures tri horaires) sont reportées dans le tableau suivant :

Tableau 17: Vitesses et directions du vent enregistrées à Tunis-Carthage (1970-90)

Direction	Vitesse du vent (m/s)				Total
	1-5	6-10	11-15	>16	
N	3,1	1,4	0,0		4,5
NNE	2,7	1,1	0,0	0,0	3,9
NE	2,5	0,7	0,0		3,2
ENE	2,2	0,4			2,6
E	6,6	1,5	0,0	0,0	8,2
ESE	4,5	1,2	0,0		5,7
SE	3,0	0,6	0,0		3,6
SSE	2,2	0,3	0,0		2,5
S	4,3	0,2	0,0		4,5
SSW	3,2	0,1	0,0		3,3
SW	7,7	0,5	0,0		8,2
WSW	6,1	1,1	0,0		7,3
W	12,0	7,1	0,9	0,0	20,0
WNW	1,8	1,5	0,4	0,0	3,7
NW	3,8	3,0	0,3	0,0	7,2
NNW	2,4	1,2	0,1	0,0	3,8
Total	68,0	22	1,9	0,1	92,1

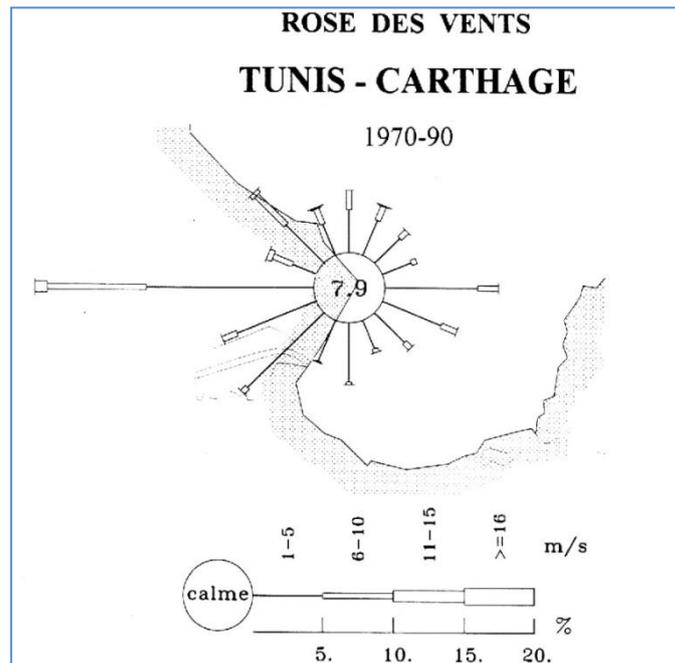


Figure 23 : Rose des vents à la station de Tunis – Carthage

Le tableau suivant représente les vitesses maximums annuelles du vent par secteur sur 20 ans d'observations. Un rapide calcul permet de déterminer la vitesse moyenne maximale sur 10 minutes correspondant à une période de retour annuelle. Ainsi on estime à :

- 14,7 m/s par vent de secteur Ouest ;
- 15,15 m/s par vent de secteur Nord-Ouest.

On peut donc considérer une vitesse de vent provenant de secteur Ouest à Nord-Ouest pour une période de retour annuelle de l'ordre de 15 m/s.

Tableau 18: Maximums annuels sur 20 ans à la station de Tunis-Carthage (1971-90)

Maximums Annuels de la Vitesse du Vent TUNIS-CARTHAGE																	
ANNEE	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	MAX
1971	12	14	12	9	9	9	11	7	8	2	9	10	12	15	14	14	15
1972	10	9	9	8	10	11	9	8	11		7	7	12	16	15	16	16
1973	13	9	9	7	7	9	8	7	6		9	10	17	18	14	11	18
1974	10	9	8	7	7	12	7	5	5		13	15	19	15	15	13	19
1975	13	9	8	6	8	10	8	8	5		8	10	15	14	17	12	17
1976	9	8	8	6	7	7	6	6	5	6	9	12	17	14	13	10	17
1977	9	9	8	6	10	7	8	6	4	6	10	9	15	13	11	11	15
1978	10	9	8	7	7	7	5	4	5	7	10	13	14	18	15	13	18
1979	11	9	8	9	7	9	5	7	6	6	10	12	16	15	13	10	16
1980	14	9	11	8	12	13	9	8	8	7	8	9	11	14	14	12	14
1981	14	10	8	10	10	11	11	7	7	6	7	15	17	20	16	20	20
1982	11	11	8	9	10	10	10	9	10	11	7	11	13	14	16	20	20
1983	16	11	7	7	10	11	8	12	11	9	9	10	15	21	16	14	21
1984	11	17	8	8	9	11	10	8	9	8	9	10	15	16	18	13	18
1985	10	10	8	8	8	11	8	8	9	7	7	10	13	15	15	12	15
1986	14	9	8	7	8	12	13	10	15	8	7	10	15	22	13	12	22
1987	10	10	9	8	8	11	11	10	12	10	13	12	16	21	14	12	21
1988	16	9	9	8	9	14	13	9	9	7	9	14	13	17	21	16	21
1989	11	14	8	8	12	16	11	11	10	7	13	12	16	17	15	13	17
1990	11	10	9	10	12	11	10	9	8	8	10	10	15	17	14	11	17
MAX	16	17	12	10	12	16	13	12	15	11	13	15	19	22	21	20	22

Maximums annuels de la vitesse moyenne (10 minutes) du vent - m/s - observations trihoraires

Les périodes de retour pour toutes directions confondues sont déterminées en appliquant la distribution de Gumble (tableau ci-dessous):

Tableau 19: Vitesse moyennée sur 10 minutes – m/s

Station	Période de retour (année)					
	1	5	10	25	50	100
Vitesse du vent (m/s)	15	19,7	21,3	23,2	24,7	26,1

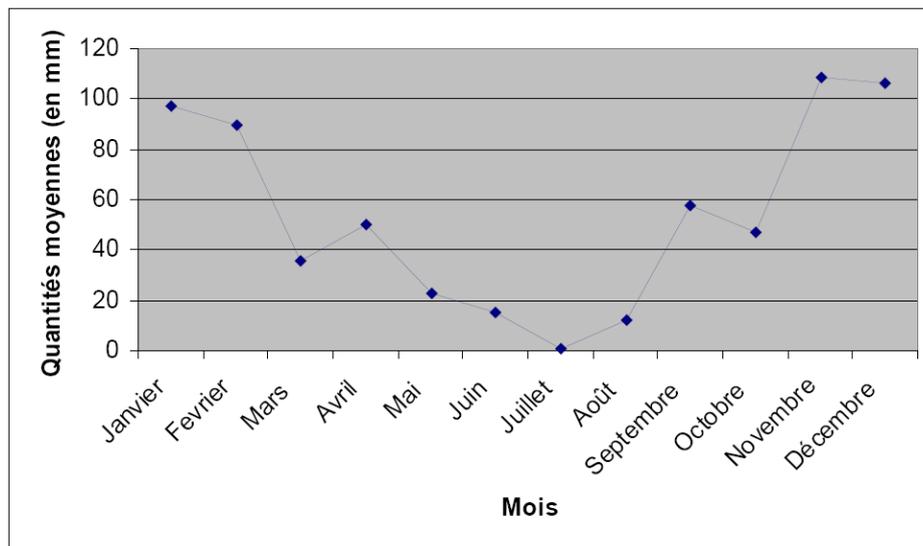


Figure 24 : Evolution mensuelle moyenne de la pluviométrie à Bizerte entre 1996 et 2006 (INM, 2007)

4.11 FETCHS ET CLAPOTS

Les directions du vent qui concernent la zone d'étude varient entre le ESE et le WSW (Figure 24). Les fetchs possibles pour un niveau moyen de la surface libre pour la partie Nord de la lagune de Bizerte sont limités par les côtes de Louata à l'Ouest, Menzel Bourguiba au Sud et la région d'el Azib à l'Est.

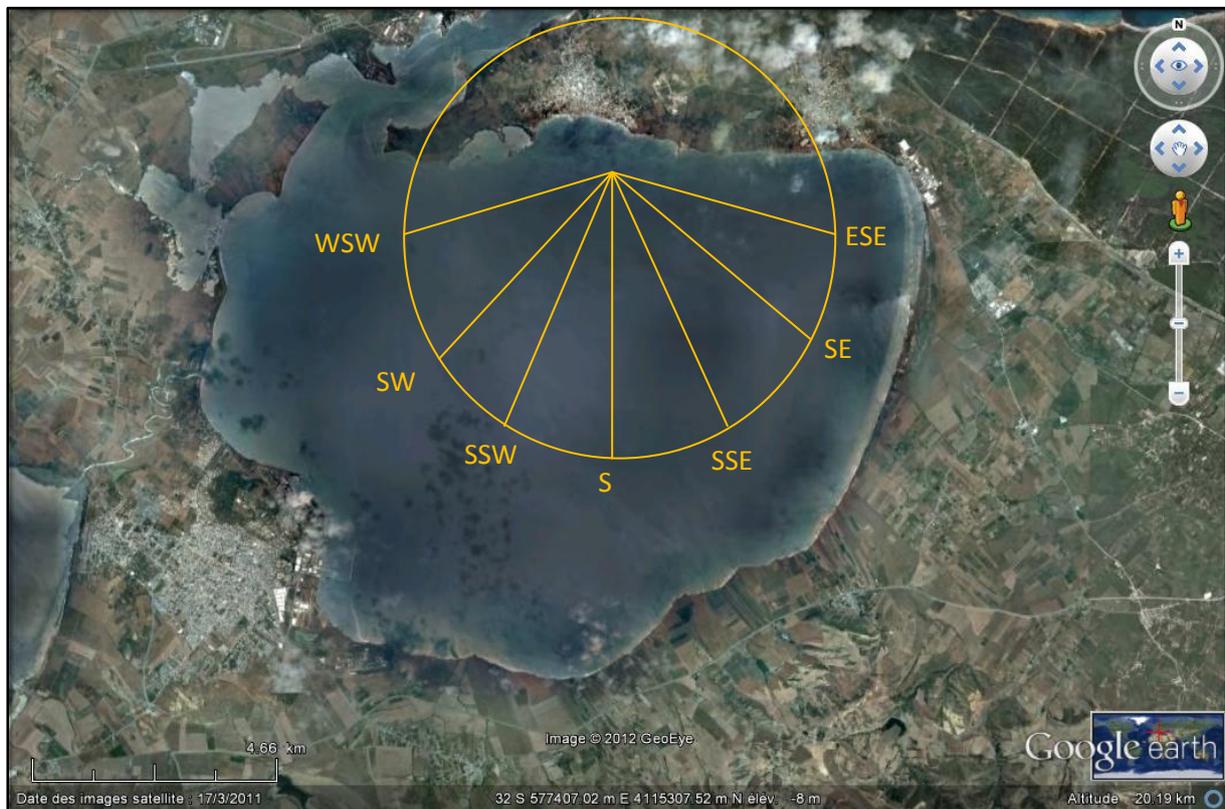


Figure 25 : Directions des vents influents sur la zone d'étude

En se limitant au secteur susceptible d'intervenir dans la génération des clapots sur le site de l'étude, les directions du vent varient entre l'ESE et le WSW. En revenant aux statistiques données par INM (2007), la direction des vents les plus dominants provient :

- Du Sud-Ouest ;
- Du Sud-Est ;
- Du Sud.

Ainsi la direction des vents dominants est celle qui provient du Sud Ouest et Sud Est. Les longueurs des fetchs pour la zone d'étude s'arrêtent au niveau des limites Ouest, Sud et Est de la lagune et sont données comme suit :

- 8 km dans la direction Sud-Est;
- 10 km dans la direction du Sud ;
- 9 km dans la direction du Sud-Ouest.

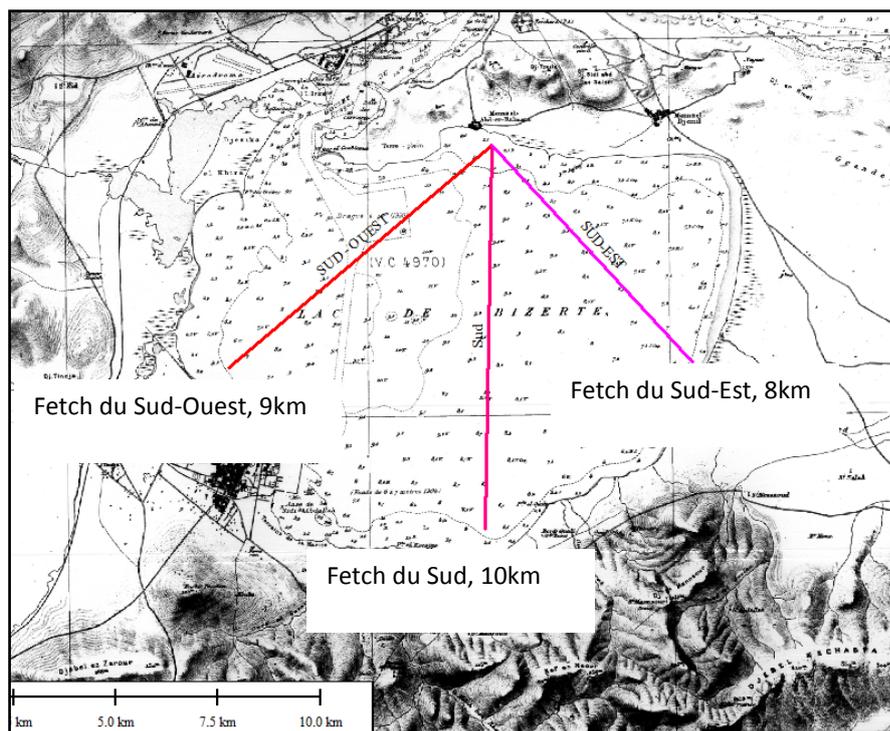


Figure 26 : Fetchs par direction

À l'aide des abaques du Shore protection Manual, nous déterminons les hauteurs de clapots et leurs périodes. Les paramètres pour lesquelles nous présentons les résultats sont :

- La vitesse du vent: en absence d'étude statistique pour la vitesse du vent à différente période de retour au niveau de la station de Bizerte, nous nous sommes basés sur les données de la station de Tunis ; pour une période de retour cinquantennale, la vitesse du vent considérée est 25m/s ;

- Les longueurs des fetchs citées plus hauts ;
- La profondeur maximale par fetch.

Les résultats sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau 20: Détermination de la hauteur maximale des clapots

Fetch			Vitesse du vent (m/s)	Période (s)	Hauteur Max du Clapot (m)
Direction	Longueur (km)	Profondeur (m)			
Sud-Ouest	9	10	25	6.5	1.25
Sud-Est	8	9	25	6	1
Sud	10	10	25	6.5	1.25

Nous retenons, pour ce qui suit, la houle du projet suivante: $H_s = 1,25$ m, $T = 6,5$ s

5 OUVRAGE PORTUAIRE ET AQUACULTURE

5.1 OUVRAGE PORTUAIRE

Situé dans la lagune de Bizerte, le port de pêche de Menzel Abderrahmane a été construit en 1970 et a fait l'objet de travaux d'extension en 1997. Il comprend les infrastructures et les superstructures suivantes :

- Une digue principale de longueur 213 ml,
- Une digue secondaire de longueur 75 ml,
- Un plan d'eau de 1 ha à -2,0 m hydro,
- Un appontement de longueur 63 ml,
- Une estacade en mauvais état,
- Un terre-plein de 0,46 ha, comportant un bâtiment de l'APIP d'une superficie de 48 m², et un marché de gros.



Figure 27 : Port de pêche de Menzel Abderrahmane

L'examen de l'état actuel du port dégage un certain nombre d'insuffisances :

- Forte agitation pénétrant directement à l'intérieur du bassin par vents Sud Est, provoquant des dommages aux embarcations et obligeant les pêcheurs à accoster le long de la digue principale,
- Estacade en très mauvais état, et encombrement assez prononcé au site,
- Absence des installations frigorifiques : chambre froide, fabrique et silos à glace, etc,
- Absence de moyens de manutention obligeant les marins à se déplacer aux autres sites de la région, notamment Bizerte,
- Rejet d'eaux usées à l'enracinement de la digue Est. Ce rejet devrait toutefois être raccordé au réseau de l'ONAS.

Le port de pêche de Menzel Abderrahmane a bénéficié récemment d'un projet achevé en 2008 et comprenant la construction d'un marché de gros et d'une clôture.

5.2 AQUACULTURE

Dans la première phase (phase diagnostic) de la présente étude, il a été démontré que l'aquaculture dans la lagune de Bizerte est plutôt spécifique aux mollusques bivalves : la conchyliculture. Elle concerne deux espèces les moules et les huîtres avec une prépondérance des moules bases sur les captages des naissains a partir du stock naturel.

Cette activité a débuté depuis un siècle environ (1914) en prenant en compte l'huître plate autochtone (*Ostrea edulis*), mais ce n'est que vers 1951 que le premier parc conchylicole est installé au large de Menzel Jemil à 950 m du littoral avec l'introduction de deux souches de naissains d'huître :

- Huitres portugaises en provenance d'Arcachon ;
- Huitres plates en provenance de Cancale ;

Vers les années 1960, avec l'instauration de l'Office National des Pêches (ONP), une quinzaine de parcs sont installés, avec l'adoption des cultures suspendues sur cordes pour les moules (*Mytilus galloprovincialis*) et bouchots pour les huîtres. Ces parcs sont installés dans une zone bien abritée du vent dont la profondeur varie entre 3 et 5 m.

Jusqu'à 1998, la seule exploitation conchylicole est celle hérité de l'ex ONP privatisée et entreprise par la Société Tunisie Lagunes, avec un abandon de plusieurs parcs et la focalisation sur la production des moules. A l'heure actuelle le nombre des fermes conchylicoles a atteint 10 sociétés :

- Société Mejdi Ben Fredj ;
- Société Tunisie Lagune ;
- Société Fermes Marines de Bivalves ;
- Société Tunisie Cultimer ;

- Société M A Trad ;
- Société Talbi Malek (Délices de mer)
- Société Mali Jibtou ;
- Société Azzedine Boukoum ;
- Société Othmen et Makram Boukoum ;
- Société Tunisie Aqualog.

Les concessions couvrent pratiquement toutes les zones de la lagune avec une adoption des techniques de cultures sur filières et non celles des parcs. La mytiliculture est basée sur le captage des naissains en milieu naturel, l'ostréculture sur les importations des naissains (généralement à partir de la France).

Sur le plan biologique, la lagune de Bizerte offre des conditions potentielles vis-à-vis de la croissance qui permet d'absorber autant cette activité, notamment vers les profondeurs de 3 à 9 m.

Le Plan Directeur de l'Aquaculture réalisé en 1994 et révisé périodiquement, écarte toute forme d'élevage de poisson, il focalise par contre sur la conchyliculture avec une estimation du potentiel aquacole de la lagune de l'ordre de 2000 tonnes par an.

La production conchylicole, reste toutefois assez réduite, durant la période 1989-2009, elle a fluctué autour de 119 tonnes pour les moules et seulement 5 tonnes pour les huîtres. Ce sont, en premier lieu, les fermetures dues à la présence de biotoxines et aux contraintes sanitaires et de commercialisation, qui freinent le développement de cette activité. En second lieu, viennent les crises dystrophiques du milieu liées en particulier avec les chaleurs estivales excessives.



Figure 28 : Carte des concessions aquacoles: STL : Société Tunisie Lagunes, FMB :Société Fermes Marines de Bivalves, SCM : Société Tunisie Cultimer, MAT : Société M A Trad, STM : Société Talbi Malek, SMJ : Société Mali Jibtou, EB : Société Ezzdine Boukoum, OMB :Société Othmen et Makram Boukoum, TA :Société Tunisie Aqualog

En effet, les fermes aquacoles sont les plus touchés par l'état environnemental de la lagune du fait qu'ils subissent directement l'un des effets de la pollution organique, qui se manifestent par l'eutrophisation et les efflorescences de phytoplancton dont plusieurs espèces sont toxiques.

Il faut aussi remarquer que la conchyliculture dans le lac Bizerte contribue fortement à la pollution du milieu par les déchets d'élevage (moules, filets et cordage) par échouage ou abandon, ces déchets sont de plus en plus présents le long des rivages et sur les fonds de la lagune.



Figure 29 : Photographies illustrant les zones de conchyliculture au Nord-Est de la lagune de Bizerte

6 CADRE SÉDIMENTOLOGIQUE

6.1 DISTRIBUTION HORIZONTALE

Nombreuses sont les études qui ont traitées l'aspect sédimentologique de la lagune de Bizerte, la plus récente est celle réalisée par Garali et al., 2010. Dans l'objectif de déterminer la nature, l'origine et le faciès lithologique des sédiments de la lagune, 5 carottes ont été prélevés au niveau de Menzel Abderrahmane, Oued Guenniche, Oued Ben Hassine, Oued Tinja et au centre de la lagune.

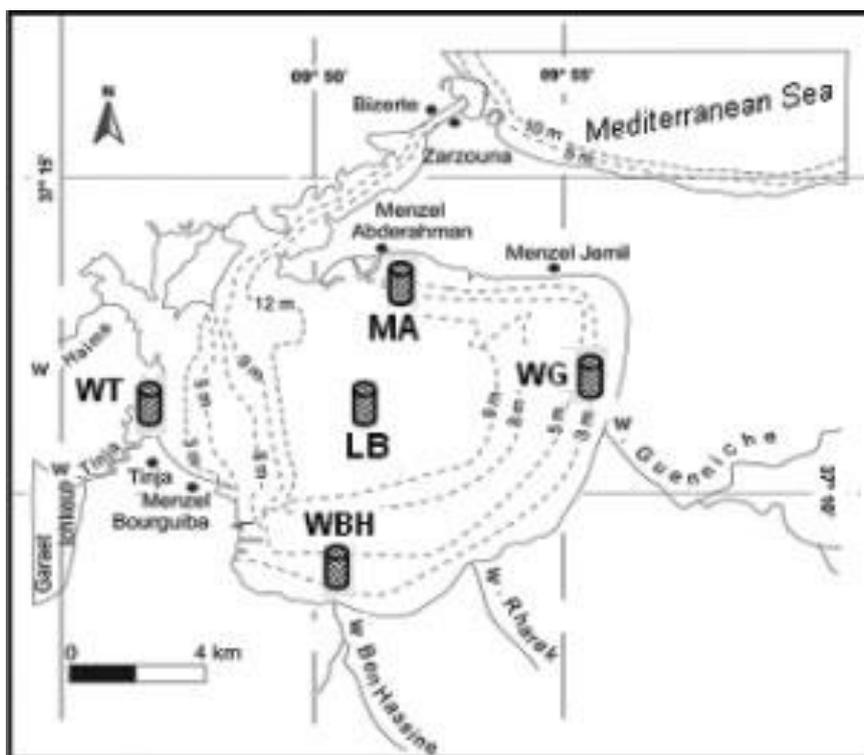


Figure 30 : Localisation des sédiments carottés

L'analyse des sédiments de surface de la lagune de Bizerte montre une variation saisonnière de la lithologie, par secteur. Pendant la période hivernale, les sédiments de surface des secteurs Nord et Est de la lagune sont riches en fraction vaseuse, la fraction fine représente de 20 à 40% de la fraction totale de l'échantillon. Durant la même saison, le secteur Sud de la lagune montre, lui aussi, un enrichissement en fraction fine (50 à 70 %), le faciès est vaso-limono-sableux. Cet enrichissement en fraction vaseuse est attribué à l'important apport des sédiments fins par les nombreux Oueds et cours d'eaux, qui déversent dans la lagune.

Durant la période estivale, l'analyse des sédiments de surface au Nord et à l'Est de la lagune montre la dominance du faciès limono-sablo-vaseux à sablo-limono-vaseux (fraction $>63 \mu\text{m}$; 80–90% de la fraction totale). A l'embouchure des Oued : Ben Hassine et Rharek, le faciès sédimentaire est du type limono-sablo-vaseux, avec, respectivement 44% et 34% de fraction fine. Le faciès sédimentaire, au niveau de la station d'échantillonnage de Menzel Bourguiba est du type limono-vaso-sableux, avec

51% de fraction fine. Dans la zone d'embouchure d'Oued Tinja, le faciès sédimentaire et de type vaso-limono-sableux, avec 64% de fraction fine.

Au niveau de la zone centrale ainsi qu'à l'Ouest de la lagune, le faciès est de type vaso-limoneux à vaseux est reste inchangé au cours des saisons. La fraction fine au niveau de ces compartiments de la lagune est supérieure à 98% du total (Ben Garali et al. 2008)

6.2 DISTRIBUTION VERTICALE

L'étude de la distribution verticale des sédiments carottés au niveau de Menzel Abderrahmane montre deux faciès différents. Le premier faciès de 0 à 16 cm avec une prédominance des sédiments grossiers alors que le deuxième faciès de 17 à 34 cm, montre une prédominance des sédiments fins.

A l'embouchure de Oued Guenniche, l'étude a démontré l'existence de trois niveaux différents :

- De 0 à 10 cm, 29% fraction fine ;
- De 10 à 30 cm, prédominance de la fraction grossière 80% ;
- De 30 à 46 cm, prédominance de la fraction fine 60%.

Au sud de la lagune, à l'embouchure d'Oued Hassine, l'analyse des sédiments carottés a montré l'existence de trois niveaux:

De 0 à 10 cm, dominance de la fraction fine 40% ;

- De 10 à 30 cm, niveau moins riche en fraction fine, 30 % ;
- De 30 à 68 cm, niveau très riche en fraction fine, 70%.

L'analyse du carottage de sédiments réalisé au centre de la lagune montre une distribution verticale homogène des sédiments avec une prédominance de la fraction fine (90%)

Quatre niveaux différents ont été observés lors de l'analyse du carottage de sédiments collecté au niveau de l'embouchure d'Oued Tinja:

- De 0 à 10 cm, un niveau riche en matériaux vaseux (70% fraction fine) ;
- De 10 à 40 cm niveau riche matériaux plastiques vaseux (80% fraction fine);
- De 40 à 85 cm, niveau moins riche en fraction fine, 30% ;
- De 85 à 90 cm, niveau riche en fraction fine, 60%

La majorité des sédiments des différents niveaux étudiés de la lagune de Bizerte montre deux types de faciès :

- Un premier faciès contient une prédominance de la fraction grossière, signe d'une dynamique sédimentaire locale ;

- Un second faciès avec un pourcentage élevé en fraction fine témoignant de différent épisode sédimentaire qui correspond à un dépôt ancien. Cette fraction fine largement observée dans les sédiments carottés est le résultat d'une sédimentation précoce.

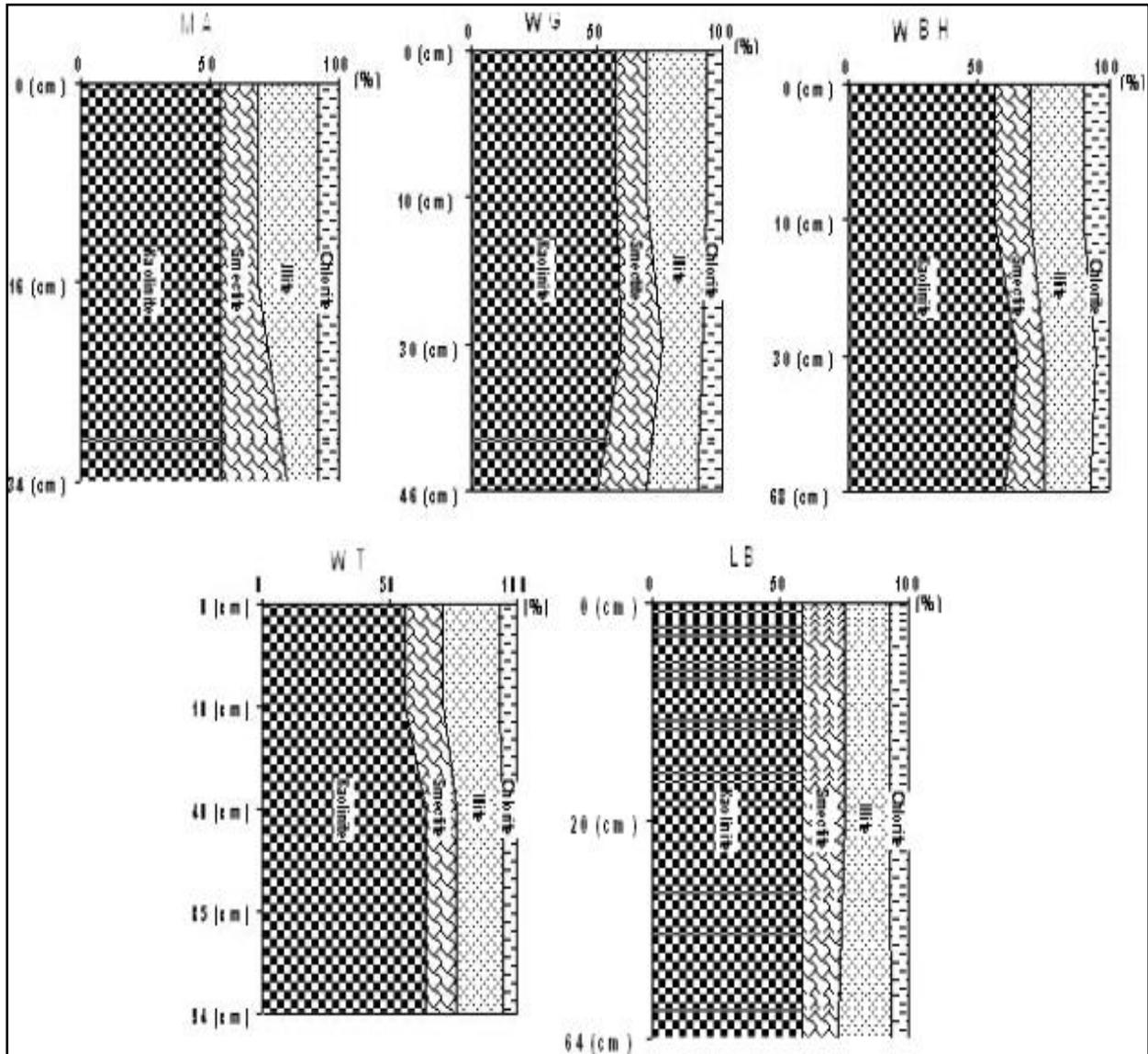


Figure 31 : Distribution verticale des minéraux argileux dans la lagune de Bizerte (Ben Garali et al. 2010)
MA-Menzel Abderrahmane, WG-Oued Guenniche, WBH-Oued Ben Hassine, WT-Oued Tinja, LB-centre de la lagune

7 MORPHOLOGIE DE LA ZONE DU PROJET

7.1 MORPHOLOGIE DES FONDS

Les caractères morphologiques des fonds de la lagune de Bizerte sont déterminés à partir des cartes marines à l'échelle 1/25000 dressées en 1954 par le service hydrographique de la Marine Nationale Française. Ces cartes marines sont relativement anciennes et nécessitent par conséquent une actualisation. D'après ces cartes, la profondeur moyenne de la lagune est de l'ordre de 7 m. On distingue (figure 31) :

- Une dépression centrale de 9 à 10 m de profondeur traversée par un chenal artificiel de profondeur 12 m reliant le port de Bizerte et celui de Menzel Bourguiba ;
- Une région Est caractérisée par une pente relativement douce ;
- Une formation des hauts fonds situés au niveau de l'embouchure du canal Tinja ;
- Une région Sud-Ouest caractérisée par une pente relativement raide. La profondeur de l'eau passe rapidement de 3 à 9 m ;
- Une région Nord-Est (entre Menzel Abderrahmane et Menzel Jemil) caractérisée par des isobathes régulièrement espacées et une pente relativement douce ;
- Une région Nord-Ouest située en face du Ras Gueblaoui caractérisée par une pente raide.

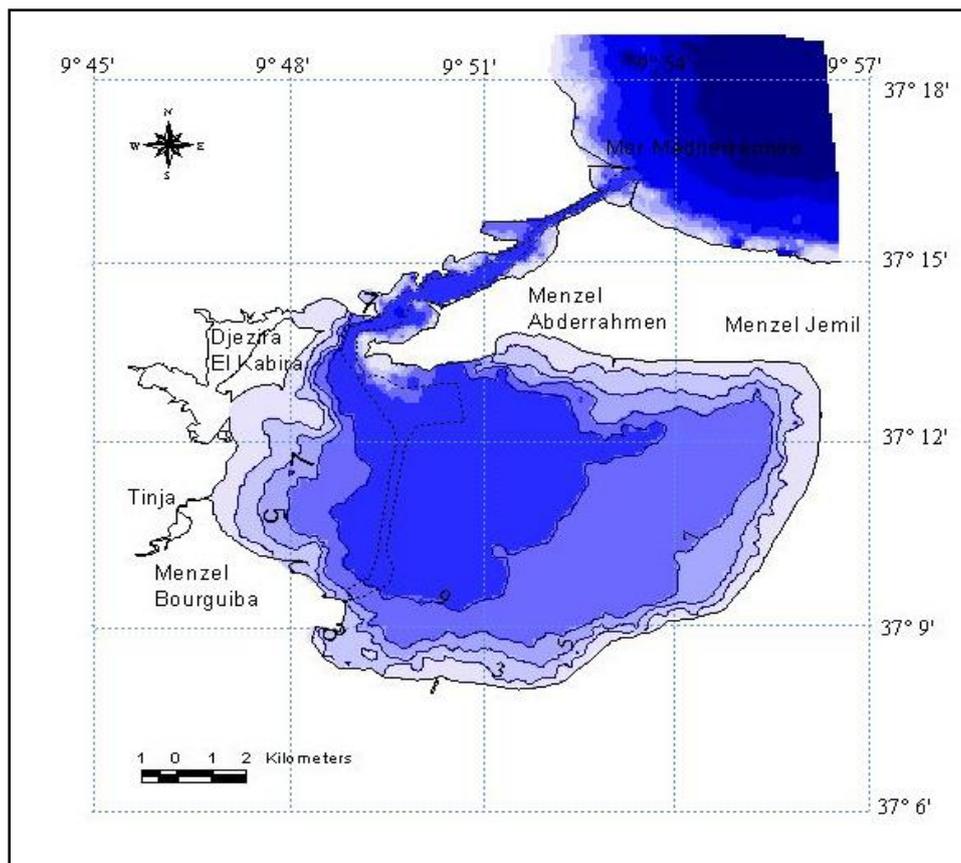


Figure 32 : Bathymétrie de la lagune de Bizerte

7.2 MORPHOLOGIE LITTORALE

Dans cette partie de l'étude, on va exposer l'état morphologique et environnemental actuel du littoral de Menzel Abderrahmane et de Menzel Jemil à travers nos visites de terrain du 5 et 13 Janvier 2012. Cette analyse est indispensable pour justifier les actions d'aménagements proposées.

7.2.1 MENZEL ABDERRAHMANE

Le tronçon de côte de Menzel Abderrahmane, objet de cette étude, s'étend sur 1 km et occupe la partie Nord de la lagune de Bizerte. Cette partie de la lagune, était jusqu'à un temps proche peu urbanisée mais fortement sollicitée par des activités de pêche et de conchyliculture. Aujourd'hui, cette côte est devenue trop urbanisée, l'intervention anthropique à profondément masquer sa morphologie originelle. Entre l'Ouest et l'Est du port de pêche de Menzel Abderrahmane on observe une disparité de la morphologie littorale allant de plage sableuse, quai, mur vertical, mur vertical protégé par des enrochements. De l'Ouest vers l'Est on distingue :

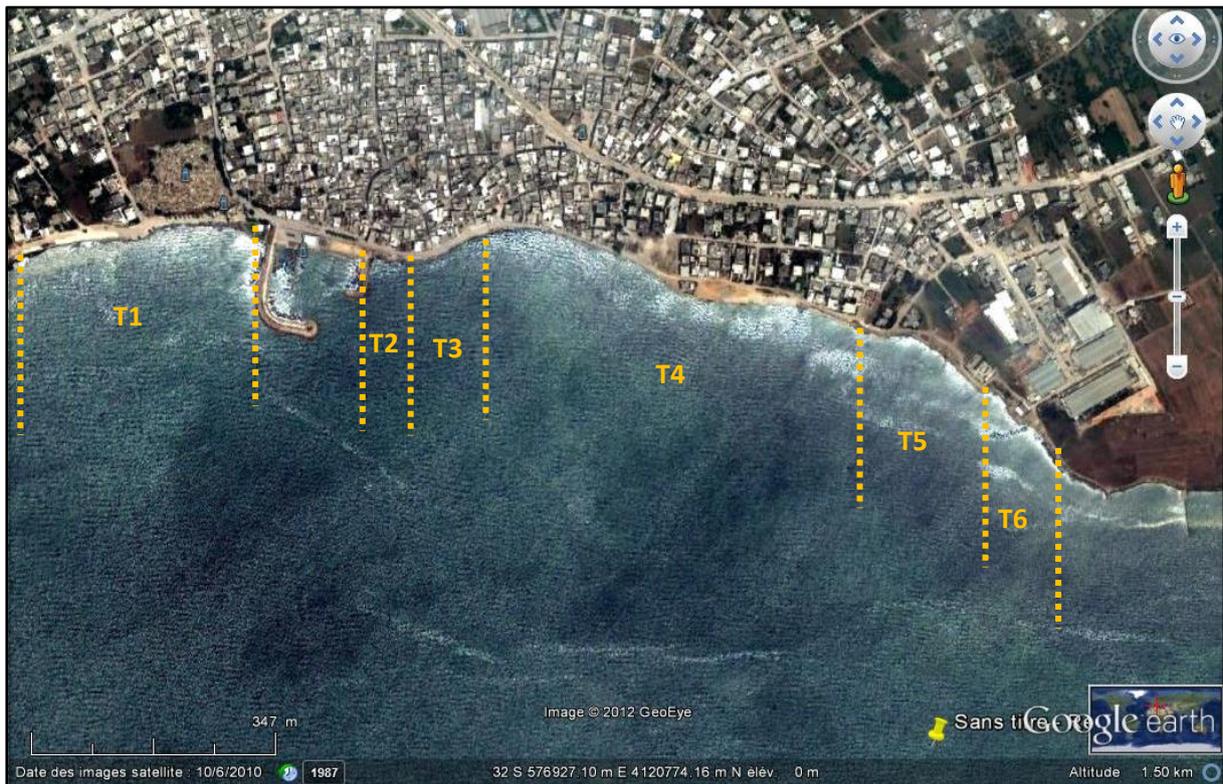


Figure 33 : Menzel Abderrahmane; T1- tronçon 1, T2- tronçon 2, T3- tronçon 3, T4- tronçon 4, T5- tronçon 5, T6- tronçon 6

Tronçon 1

Cette partie du littoral, limitée à l'Est par le port de pêche, est la seule plage sableuse de la région. Elle s'étend sur quelques dizaines de mètres avec largeur variable allant de 1m à 10 m. Le faciès est sableux avec prédominance de la fraction grossière.

Théoriquement le tronçon1, situé en amont du port de pêche, doit bénéficier des sédiments apporté par la dérive Ouest-Est et bloqué par la digue principale du port, ce qui n'est pas le cas.

Sur le plan environnemental la situation n'est pas critique, néanmoins on a noté quelques actions jugées nuisible à l'environnement:

- Une partie de cette plage est utilisée comme un chantier naval; après mise à sec des embarcations, les travaux d'entretien et de peinture s'y déroulent.
- Un point de rejet des eaux pluviales est noté au niveau de ce secteur.



Figure 34 : Etat du tronçon 1 de Menzel Jemil

Tronçon 2

Le tronçon 2 est situé à l'Est du port de pêche. Long de 30 m environ et de quelques mètres de largeur, cette partie est considérée comme un prolongement du port au niveau duquel ce fait les travaux d'entretien des bateaux de pêche.

Il est à noter que ce tronçon est soumis au rejet d'eaux usées à l'enracinement de la digue secondaire du port.



Figure 35 : Travaux d'entretien des barques et rejet d'eaux usées

Tronçon 3

La morphologie originelle de ce tronçon de côte est masquée par la construction d'un quai en béton long de 70 mètres. Des dépôts ménagers et des déchets de constructions sont observés sur ce tronçon et influent directement sur la qualité des eaux et des sédiments de la lagune. Cette anse est une véritable décharge non contrôlée.





Figure 36 : Côte sinueuse- dépôts ménagers et déchets de constructions

Tronçon 4

Au niveau du tronçon 4 de Menzel Abderrahmane, le même cas de figure environnemental que le tronçon précédent est observé, avec aspect morphologique différent.

En effet, au niveau de cette partie de la lagune, on note une alternance entre mur vertical et mur vertical protégé par des enrochements. De l'Ouest vers l'Est on rencontre :

- Protection de la route par un mur vertical, au pied du mur sont déposés toutes sorte de déchets ;
- Au alentour de la station de l'ONAS, le mur vertical et protégé par des enrochements. Au cours de notre visite on a assisté aux travaux d'aménagements du terre-plein et la mise en place des enrochements.
- En allant vers l'Est, on retrouve de nouveau un mur vertical, sans protection, avec un terre-plein aménagé.





Figure 37 : Différents aspects de la côte de Menzel Abderrahmane

Tronçon 5

La morphologie côtière de ce tronçon de la côte de Menzel Abderrahmane est marquée par un ouvrage en enrochements (en cours de construction) pour la protection des habitations installées en front de mer contre les agitations et clapots notamment durant la période hivernale où le vent Sud-Ouest est relativement intense.

Il est à noter que ce tronçon est sujet à des rejets d'eaux usées à deux endroits.





Figure 38 : Photos illustrant la morphologie littorale du tronçon 5

Tronçon 6

Le dernier tronçon de la zone d'étude est un terrain à l'abandon caractérisé par un estran à galet recouvert par des débris de végétaux morts. Ici viennent s'installer tout type de déchets domestiques et de construction.

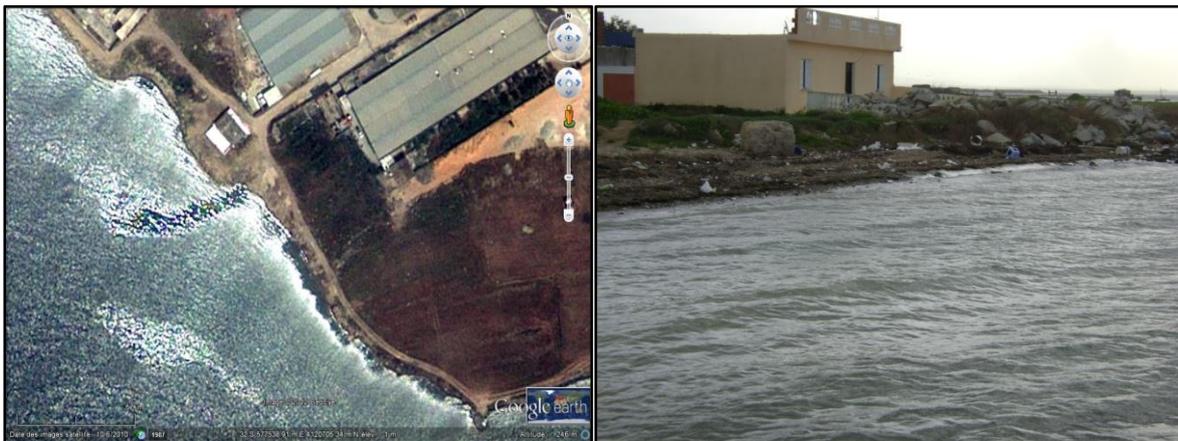


Figure 39 : Morphologie du tronçon 6

7.2.2 MENZEL JEMIL

La côte de Menzel Jemil est située à l'extrémité Nord-Est de la lagune de Bizerte. La morphologie littorale de cette zone est variable, on passe des côtes à microfalaises et côtes à galets au Nord, aux plages sablonneuses et zones marécageuses à l'Est.

Réputée par ses Champs de conchyliculture, Menzel Jemil est soumis à une pollution organique accentuée.



Figure 40 : Menzel Jemil; T-N-tronçon Nord, T-NE-tronçon Nord-Est, T-E-tronçon Est

Tronçon Nord

Ce tronçon de côte s'étend sur environ 2 km, depuis la limite Ouest de Menzel Jemil jusqu'à la STL. La morphologie littorale du tronçon Nord est caractérisée par l'alternance des côtes à microfalaises, de 50 cm de hauteur à facies argilo-sableux, et des côtes à galets.

Le trait de côte est occupé, par endroits, par des déchets de produits de constructions.

Au moins deux points de rejet des eaux usées sont relevés au niveau de ce secteur.



Figure 41 : Morphologie littorale du tronçon Nord de Menzel Jemil

Tronçon Nord-Est

Le tronçon Nord-Est du littoral de Menzel Jemil, situé au Sud de la STL, est long d'environ 200 mètres. Ce secteur est caractérisé par un faciès sableux marqué par la présence de galets, il est bordé du côté de la GP 8 par un mur de protection soutenu par des enrochements, par endroits.

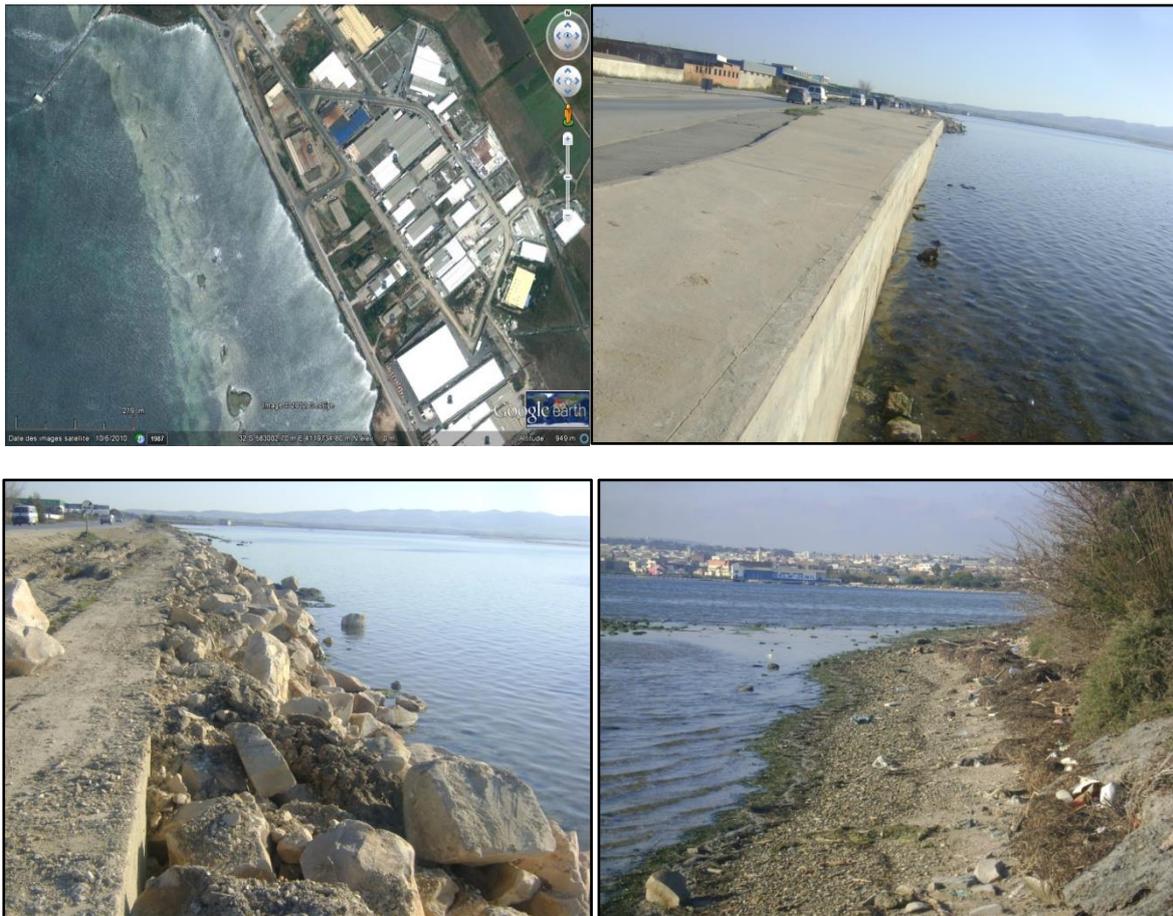


Figure 42 : Morphologie du tronçon Nord-Est

Tronçon Est

Cette partie du littoral s'étend jusqu'à Oued Guenniche fait 7 km de longueur environ, elle est caractérisée par un faciès marécageux. Les marécages sont bordés par des terrains agricoles. Ce littoral est caractérisé par une bathymétrie régulière à pente transversale très douce. Ainsi, à marée haute, à 150 m environ du rivage, la profondeur est de l'ordre de 1m.

En marée basse, cette bande littorale est totalement émergée, on note l'apparition de banc de sables. Cette région est l'unique zone dans laquelle est effectuée la collecte des palourdes.



Figure 43 : Morphologie du tronçon Est

8 VARIANTES D'AMÉNAGEMENT

8.1 OBJECTIFS ET CONTRAINTES D'AMENAGEMENT

L'objectif principal visé par cette étude et l'amélioration du paysage et de la qualité de vie de la zone de Menzel Abderrahmane et la zone de Menzel Jemil. Les objectifs spécifiques sont :

- Elimination de la pollution organique de la zone conchylicole de Menzel Jemil ;
- Elimination des irrégularités du trait de côte, et aménagements des petites baies qui constituent des zones de dépôt de toutes sortes de déchets solides et liquides.
- Elimination des zones de stagnation des eaux et amélioration de la circulation des eaux à Menzel Abderrahmane et Menzel Jemil ;
- Aménagement des berges du lac à Menzel Abderrahmane et création d'une esplanade entre les habitations et le front de mer ;
- Etendre les possibilités d'exploitation du plan d'eau pour d'autres activités de loisir (voile, navigation,...).

8.2 SOLUTIONS D'AMENAGEMENT

8.2.1 MENZEL ABDERRAHMANE

En tenant compte des objectifs et des contraintes cités ci-dessus, Cinq variantes d'aménagement du littoral de Menzel Abderrahmane sont proposées :

Variante 1: la première variante proposée consiste en l'aménagement d'un terre-plein sur environ 1km et jusqu'à une profondeur moyenne de 1m. L'aménagement débute de la digue secondaire du port de pêche et se raccorde avec le nouvel ouvrage en enrochements récemment réalisé au niveau de la station de l'ONAS. Puis de l'extrémité Est de l'ouvrage en enrochements jusqu'à la pointe Est, limite du secteur d'étude (figure 43).

La surface du terre-plein est estimée à 2.9 ha, et sera protégé par un ouvrage à talus en enrochements naturels.

Variante 2 : la variante 2 proposée consiste à (figure 44):

Aménager un terre-plein sur environ 1 km, et occupant une surface de 6,5 ha. La profondeur moyenne d'implantation est de 1.5 m.

Aménager un ouvrage de protection à talus en enrochements naturels.

Variante 3: la variante 3 comprend les mêmes aménagements proposés pour la variante 2 mais en substituant l'ouvrage de protection à talus en enrochements par un quai en blocs (figure 45).

Variante 4 : la quatrième variante proposée pour l'aménagement de Menzel Abderrahmane consiste en la création d'une corniche, entre la chaussée et le front de mer de 10 m de largeur et 280 m de longueur. La corniche, limitée à l'Est par la station de l'ONAS, se raccorde, à l'Ouest avec le quai existant au centre de la baie (figure 46).

Implanté à une profondeur moyenne de -0.5 m, la corniche sera limitée, coté mer, par un quai en blocs, qui, par effet de réflexion augmentera l'agitation et de ce fait améliorera la circulation des masses d'eau, à une échelle locale.

Variante 5 : la cinquième variante propose la création d'une corniche tout au long de la baie de Menzel Abderrahmane. A partir de la station de l'ONAS à l'Est jusqu'au port de pêche à l'Ouest. Long de 410 m et large de 10 m, la corniche sera limitée, coté mer par un quai en blocs pour améliorer la circulation locale des masses d'eau (figure 47).

Aménagement complémentaire à Menzel Abderrahmane : Port de pêche

Situé dans la lagune de Bizerte, le port de pêche de Menzel Abderrahmane a assuré au cours des cinq dernières années, une production moyenne de 125 tonnes dont un volume appréciable en seiche. A l'horizon objectif 2025, il est retenu une production objective en poisson benthique égale aux potentialités estimées sur la base des récents résultats des programmes et documents de recherche de l'INSTM à 150 tonnes.

D'après l'étude réalisée par IDEALCONSULT - plan directeur du port de pêche de Menzel Abderrahmane - une baisse du linéaire théorique des quais sur les horizons futurs est observée compte tenu de la croissance progressive du rendement des équivalents barques côtières et la diminution graduelle de l'effectif des BCNM. L'année 2015 est retenue comme année charnière pour un linéaire supplémentaire acceptable du site entre 2005 et 2015 et un fonctionnement idéal de la plateforme entre 2016 et 2025. Sur cette base, le besoin additionnel en quai de relâche, tout horizon futur confondu, est égal à 140 ml.

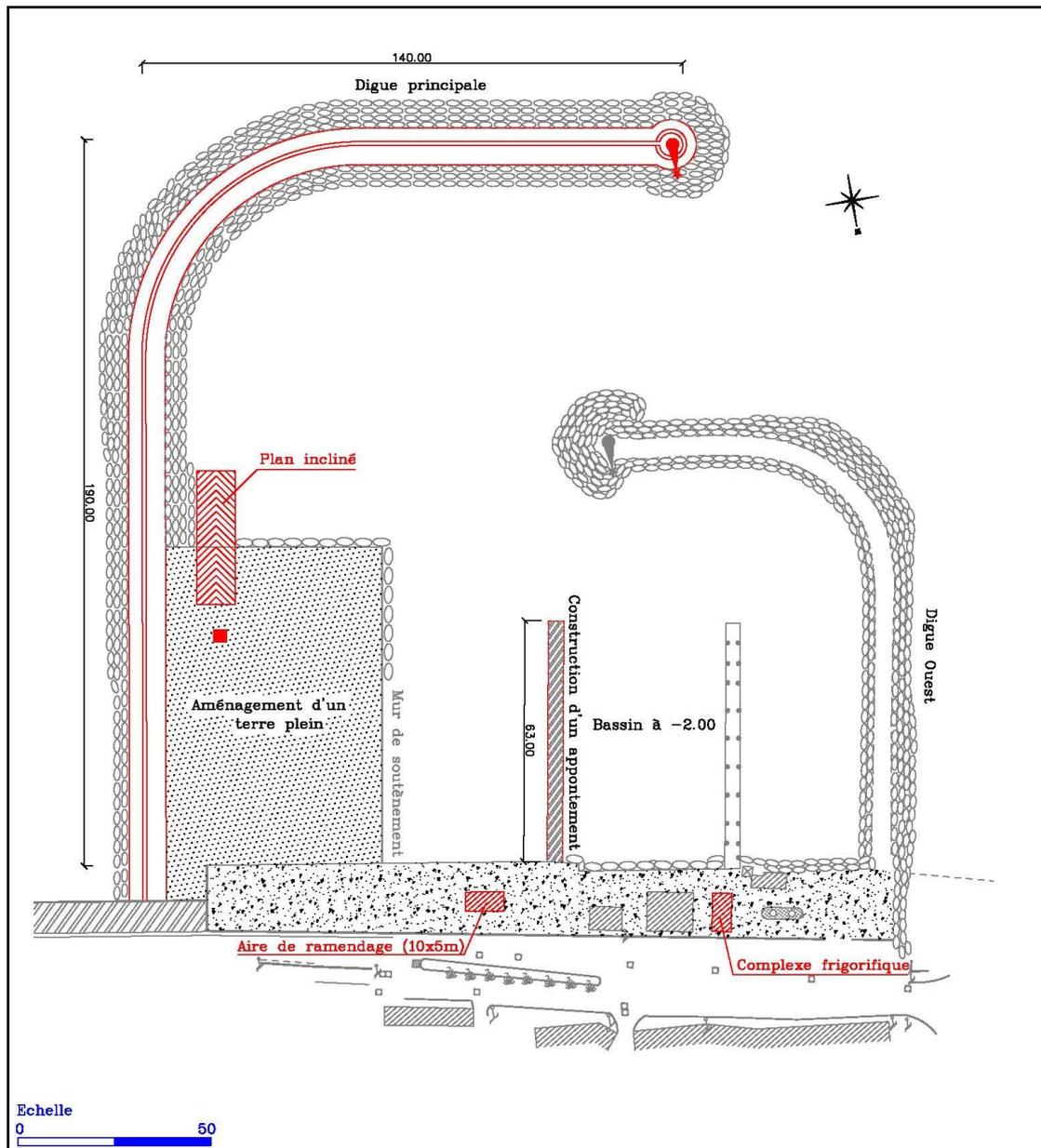
A ce besoin en aménagement s'ajoute les contraintes suivantes :

- Forte agitation pénétrant directement à l'intérieur du bassin par vents Sud Est, provoquant des dommages aux embarcations et obligeant les pêcheurs à accoster le long de la digue principale ;
- Estacade en très mauvais état, et encombrement assez prononcé au site ;
- Absence de moyens de manutention obligeant les marins à se déplacer aux autres sites de la région, notamment Bizerte.

Le principe d'aménagement répondant aux contraintes du site et aux besoins additionnels calculés consiste à agrandir le bassin par la construction d'une nouvelle digue de protection implantée à 50 m de la digue Est actuelle. Ce qui permettra d'aménager un terre-plein répondant aux besoins à l'intérieur du bassin portuaire et de construire un deuxième appontement pour la relâche. Le plan incliné sera ainsi réalisé à l'extrémité du nouveau terre-plein.

Ainsi la solution d'aménagement proposée comprend :

- La construction d'une digue principale sur une longueur de 330 ml pour la protection du port contre les clapots Sud et Sud Est ;
- La construction d'un appontement de 63 ml ;
- Le remblaiement et l'aménagement d'un terre-plein sur une superficie 0,4 ha ;
- La construction d'un plan incliné de largeur 10 m et de pente 10% ;
- La construction d'une aire de ramendage.



**Plan d'aménagement du port de pêche de Menzel Abderrahmane
(IDEALCONSULT, 2008)**

8.2.2 MENZEL JEMIL

Pour répondre aux objectifs cités ci-dessus, deux variantes d'aménagement de Menzel Jemil sont proposées:

Variante 1: la variante 1 proposée pour l'aménagement de Menzel Jemil consiste à (figure 48):

- Remblayer les petites baies et éliminer les irrégularités du trait de côte par l'aménagement d'un terre-plein au niveau du littoral Nord de Menzel Jemil et jusqu'à la STL. Le terre-plein occupera une surface de 6,5 ha, et sera implanté à une profondeur moyenne de 1m. Cette variante prévoit l'avancée du trait de côte de 30 m.
- Aménager un ouvrage de protection à talus en enrochements naturels.
- Dans cette variante nous ne proposons pas de dragage de la partie centrale de la lagune contaminée par la pollution organique. En effet le traitement du problème de pollution organique doit se faire en amont, ceci dit, la dépollution de la partie Ouest de la lagune notamment à Menzel Bourguiba résoudra le problème de pollution en aval, à Menzel Jemil.

Variante 2 : la variante 2 consiste à (figure 49):

- Draguer la partie centrale de la lagune, partie la plus contaminée par les polluants organiques. La superficie de la zone à draguer est estimée à **417 ha**, les quantités de sédiments sont de l'ordre de **2. 500. 000 m³** (figure 48). Ces matériaux seront utilisés pour la création d'un terre-plein à Menzel Jemil
- Aménager un terre-plein, d'une superficie de **98 ha**, au niveau de la côte Nord et Nord-Est de Menzel Jemil, jusqu'à une profondeur moyenne de 3m. La quantité des matériaux de remblaiement nécessaires à cette action est estimée à **2. 500. 000 m³**.
- Aménager un ouvrage de protection à talus en enrochements naturels.

A travers la conception de cette variante, un équilibre a été recherché entre la quantité de matériaux de dragage et la quantité de matériaux de remblaiement.

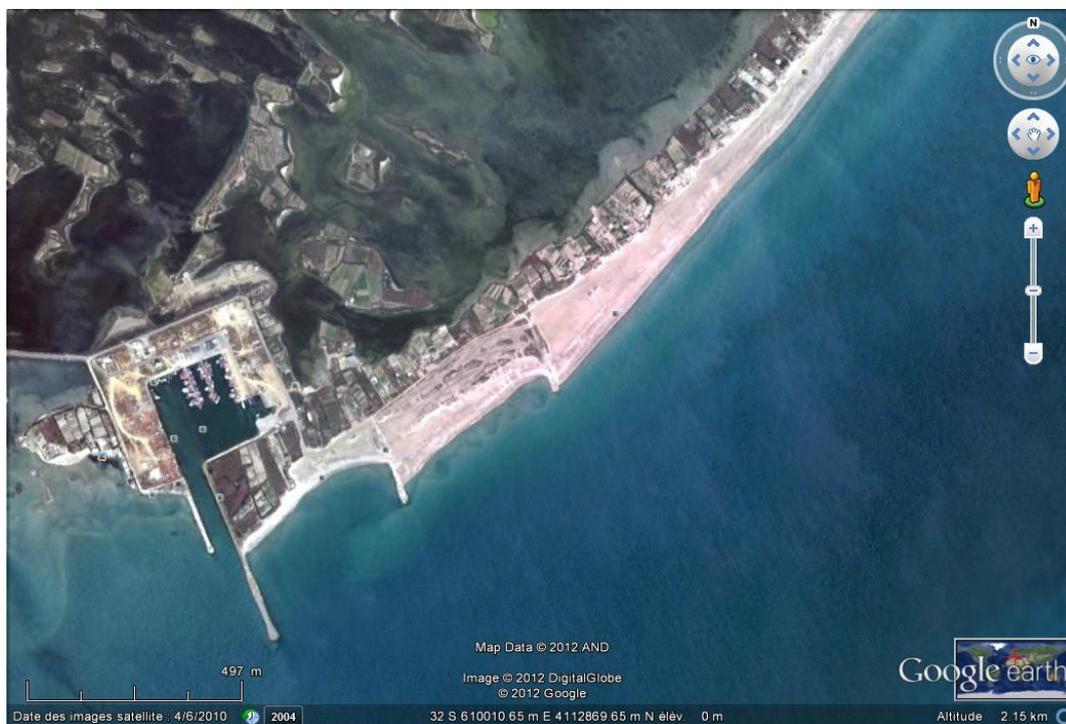
Produits de remblaiement

Pour les variantes 1, 2, 3 de Menzel Abderrahmane et la variante 1 de Menzel Jemil, nous proposons la création de terre-plein dont le produit de remblaiement peut provenir soit :

- Du produit de dragage (si la variante 2 de Menzel Jemil est retenue) ;
- De remblais d'apport : à partir des carrières de la région ou à partir de la plage de Ghar El Melah ou de la flèche de Kalaat Landlous.

En effet la plage de Ghar el Melh, située à environ 35 km au Sud – Est de la zone d'étude est une zone d'accumulation de sédiments en provenance d'une dérive littorale active Nord- Sud. Ces quantités de sédiments, bloquées par des ouvrages de protection (épis), situés au Nord du port de pêche de Ghar el Meleh, risquent de contourner les épis et ensabler le port. MARITEC a proposé dans le cadre de l'étude d'extension et de protection du port de pêche de Ghar El Melh, de draguer les sédiments piégés en amont de ces ouvrages.

Les volumes à extraire ont été estimés à 100 000 m³ correspondant à environ 4 à 5 années d'apports sédimentaires. Les dragages devront être effectués rapidement. Sinon, il y aura un risque élevé de contournement et l'évolution de la situation vers un ensablement rapide.



Plage de Ghar El Meleh : Site d'emprunt probable

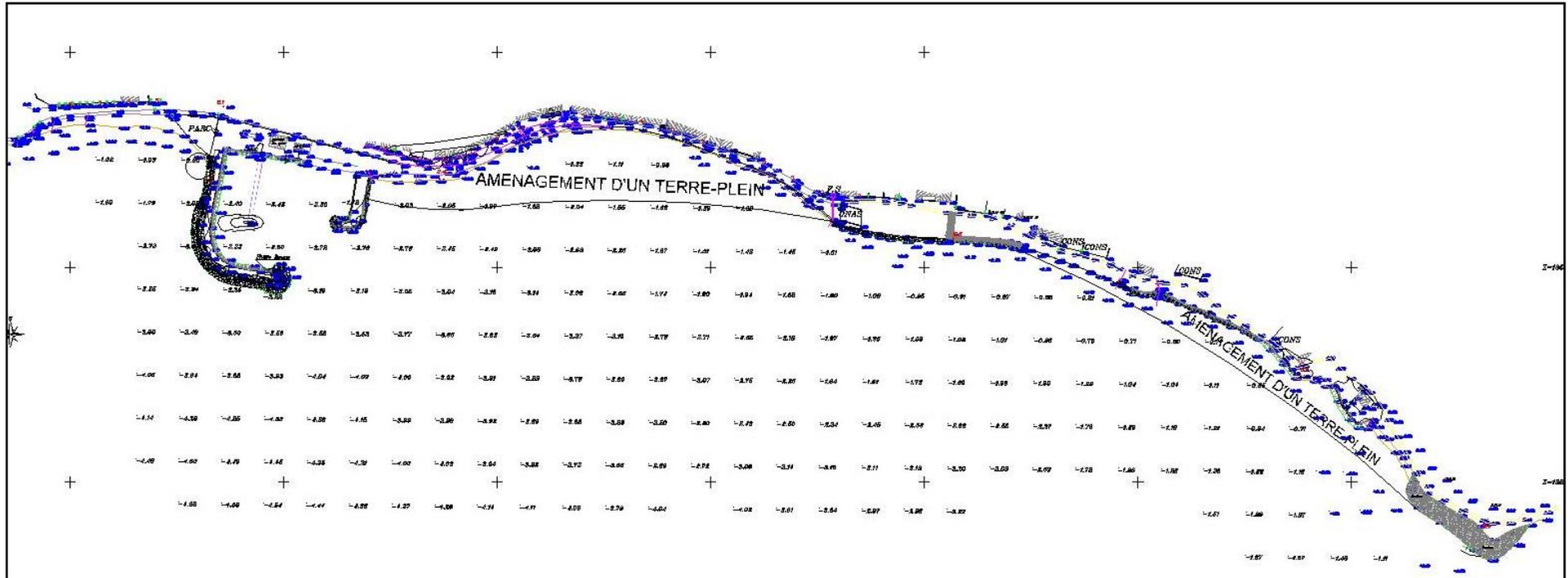


Figure 44 : Esquisse de la variante 1 proposée pour l'aménagement de Menzel Abderrahmane

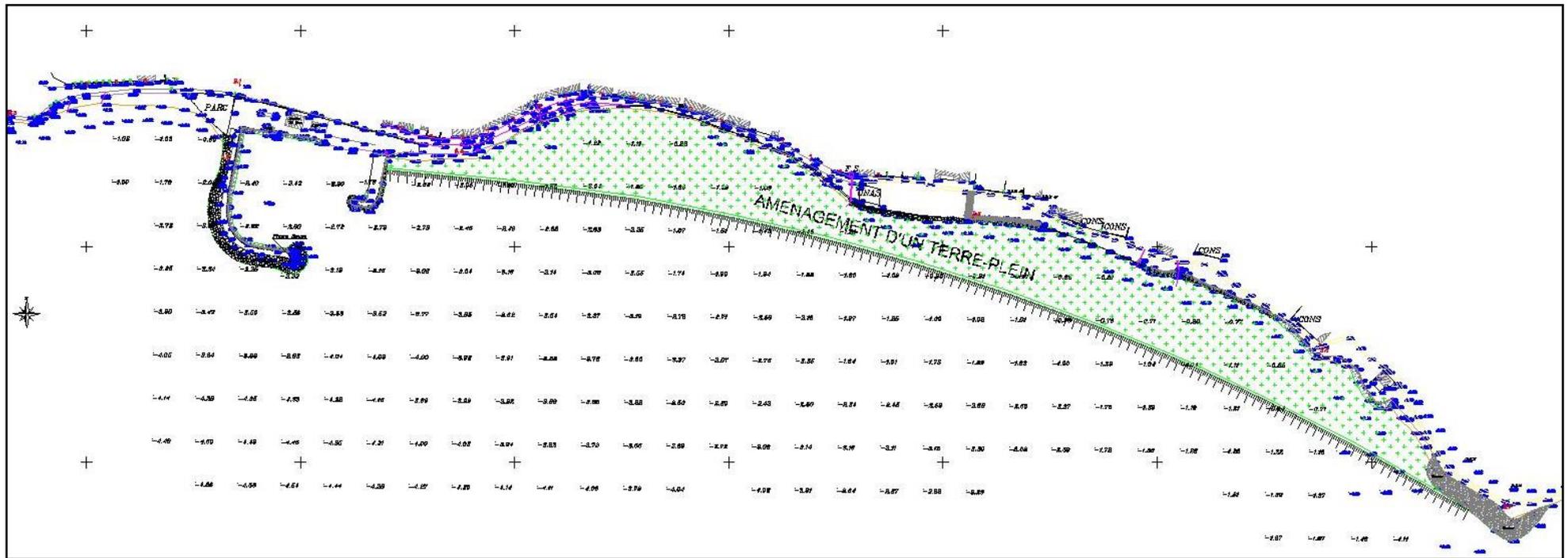


Figure 45 : Esquisse de la variante 2 proposée pour l'aménagement de Menzel Abderrahmane

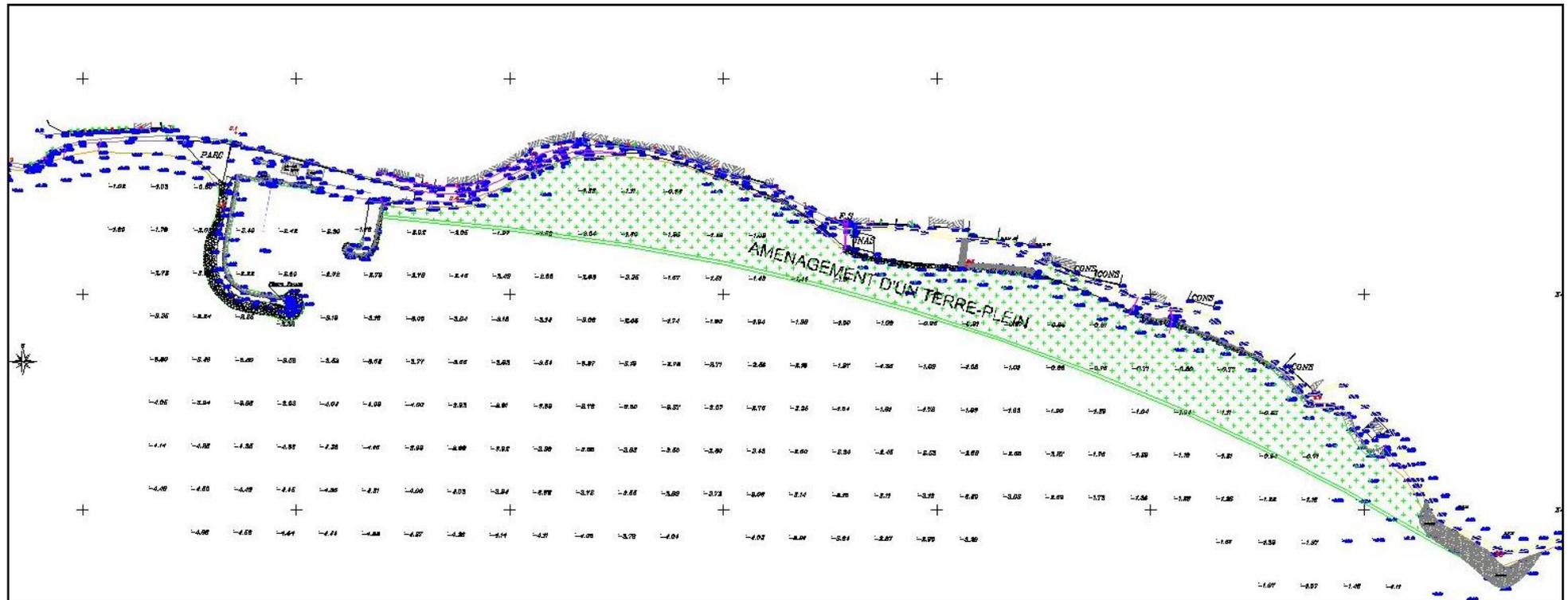


Figure 46 : Esquisse de la variante 3 proposée pour l'aménagement de Menzel Abderrahmane

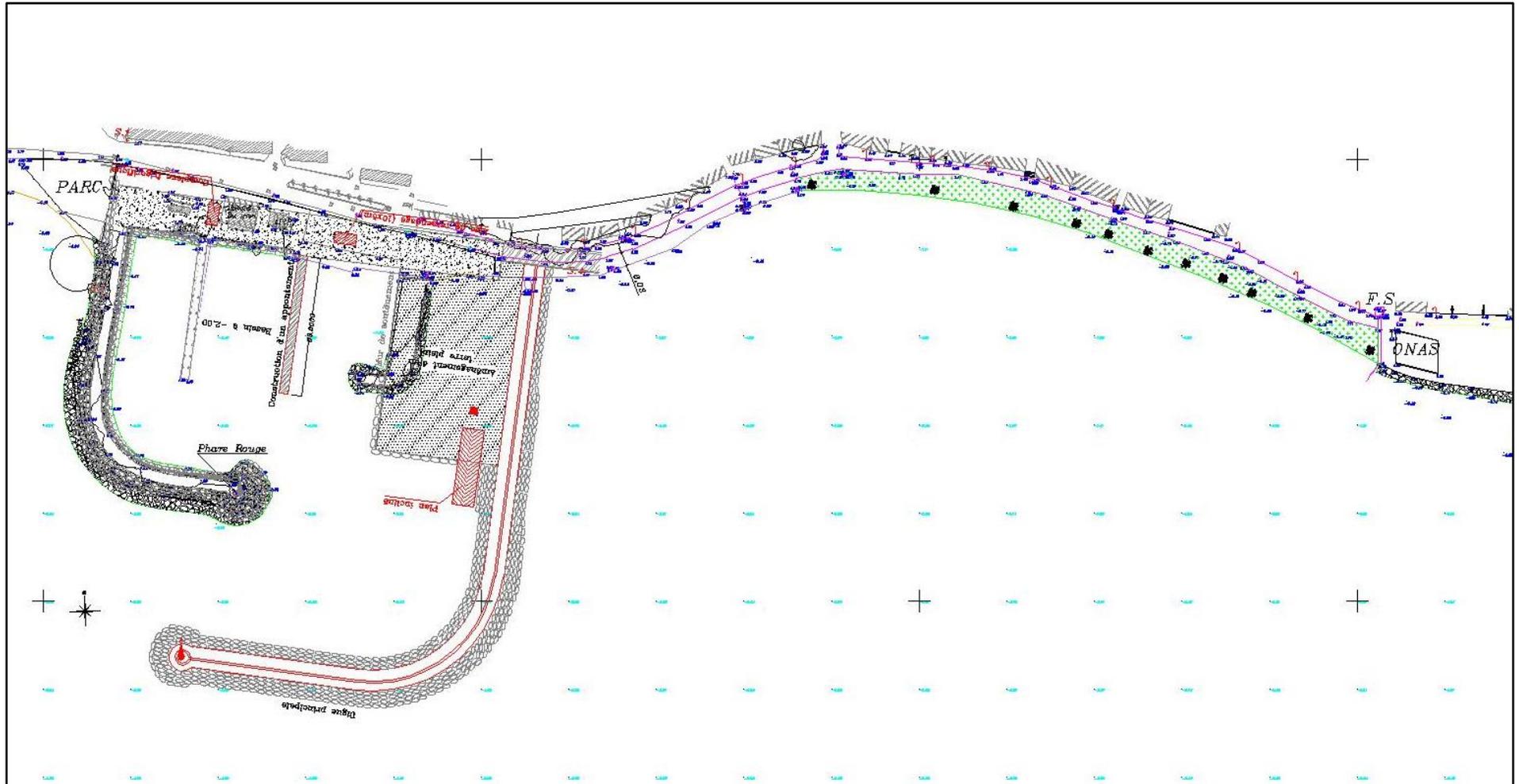


Figure 47 : Esquisse de la variante 4 proposée pour l'aménagement de Menzel Abderrahmane

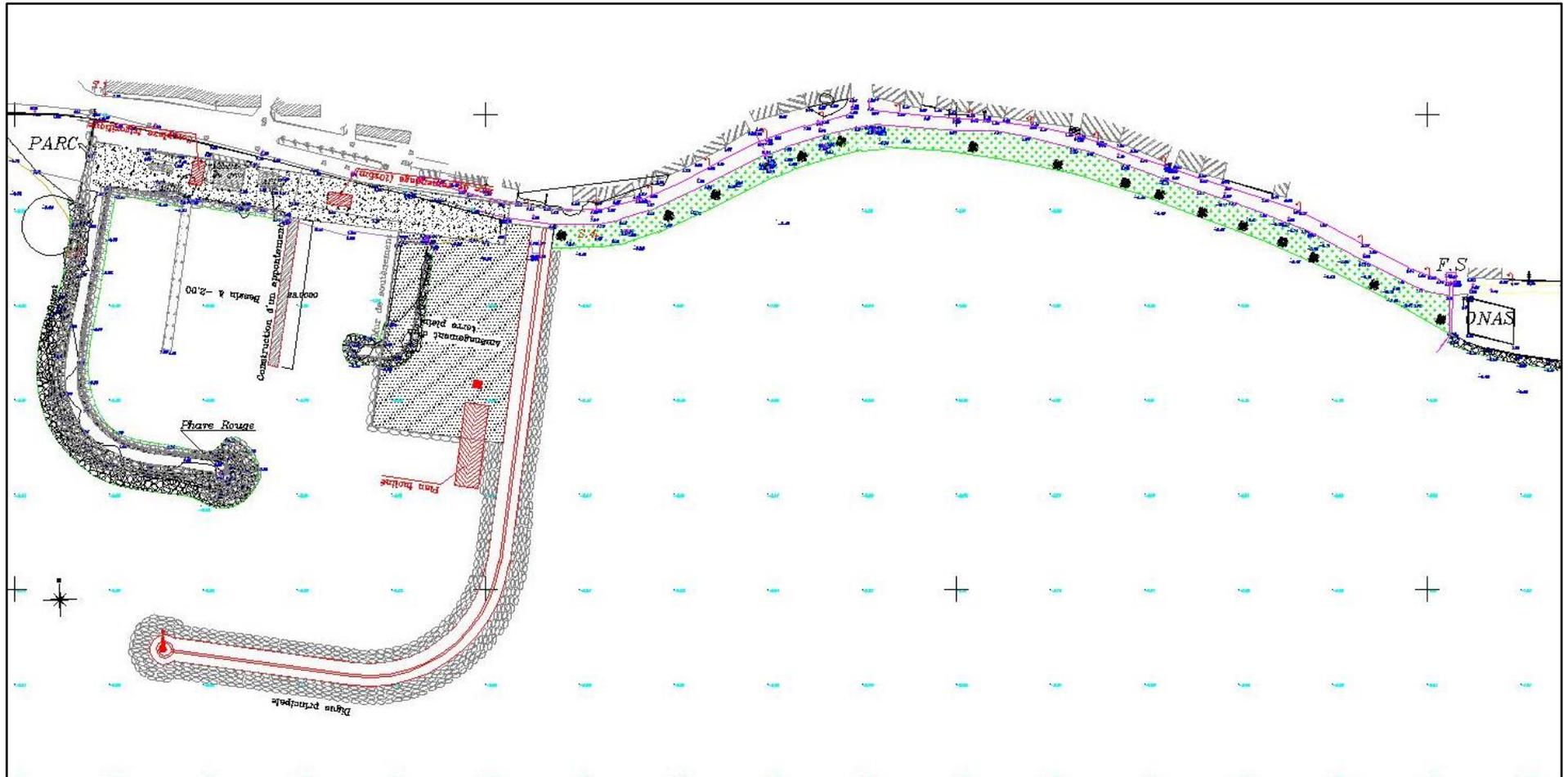


Figure 48 : Esquisse de la variante 5 proposée pour l'aménagement de Menzel Abderrahmane

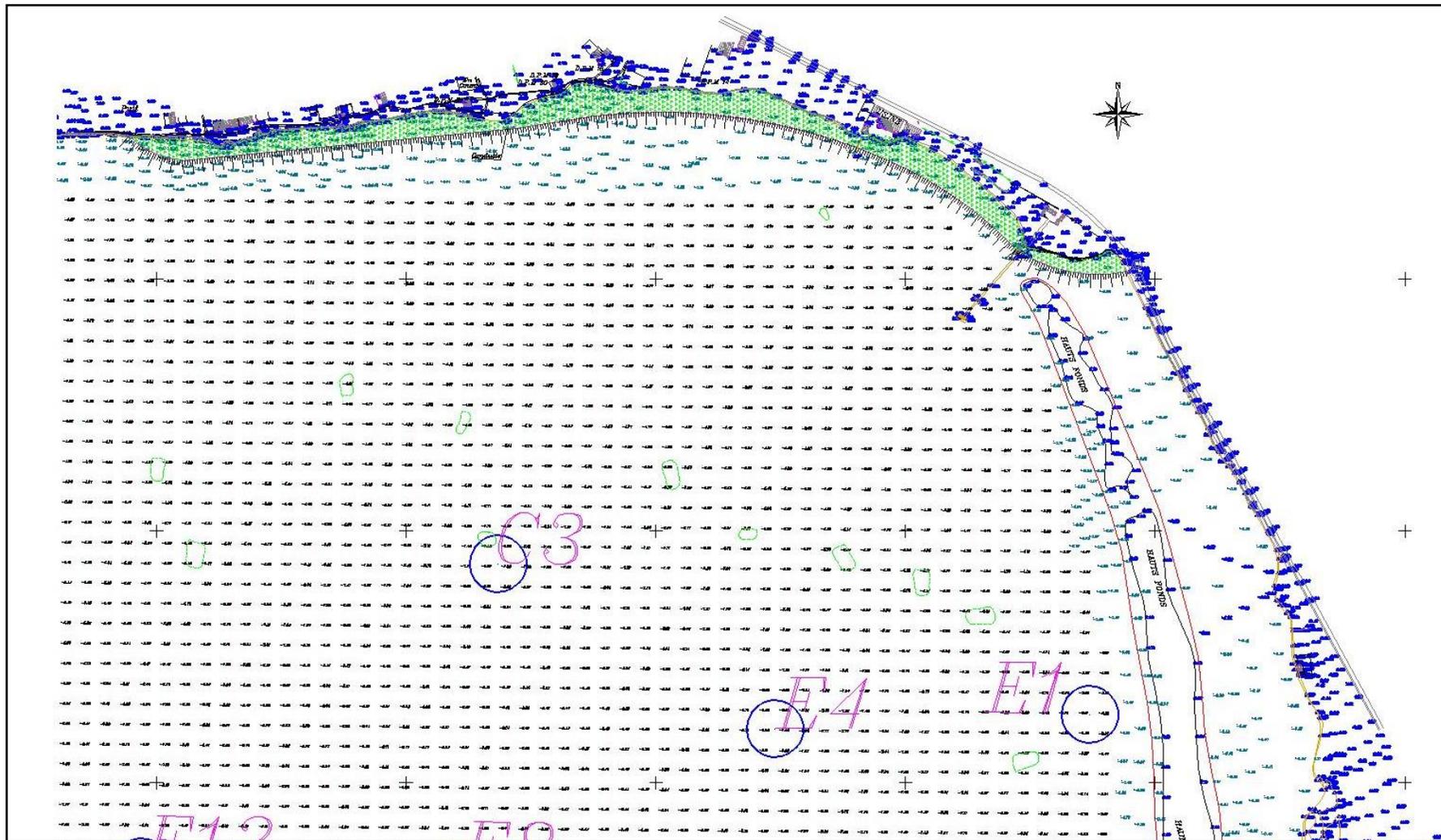


Figure 49 : Esquisse de la variante 1 proposée pour l'aménagement de Menzel Jemil

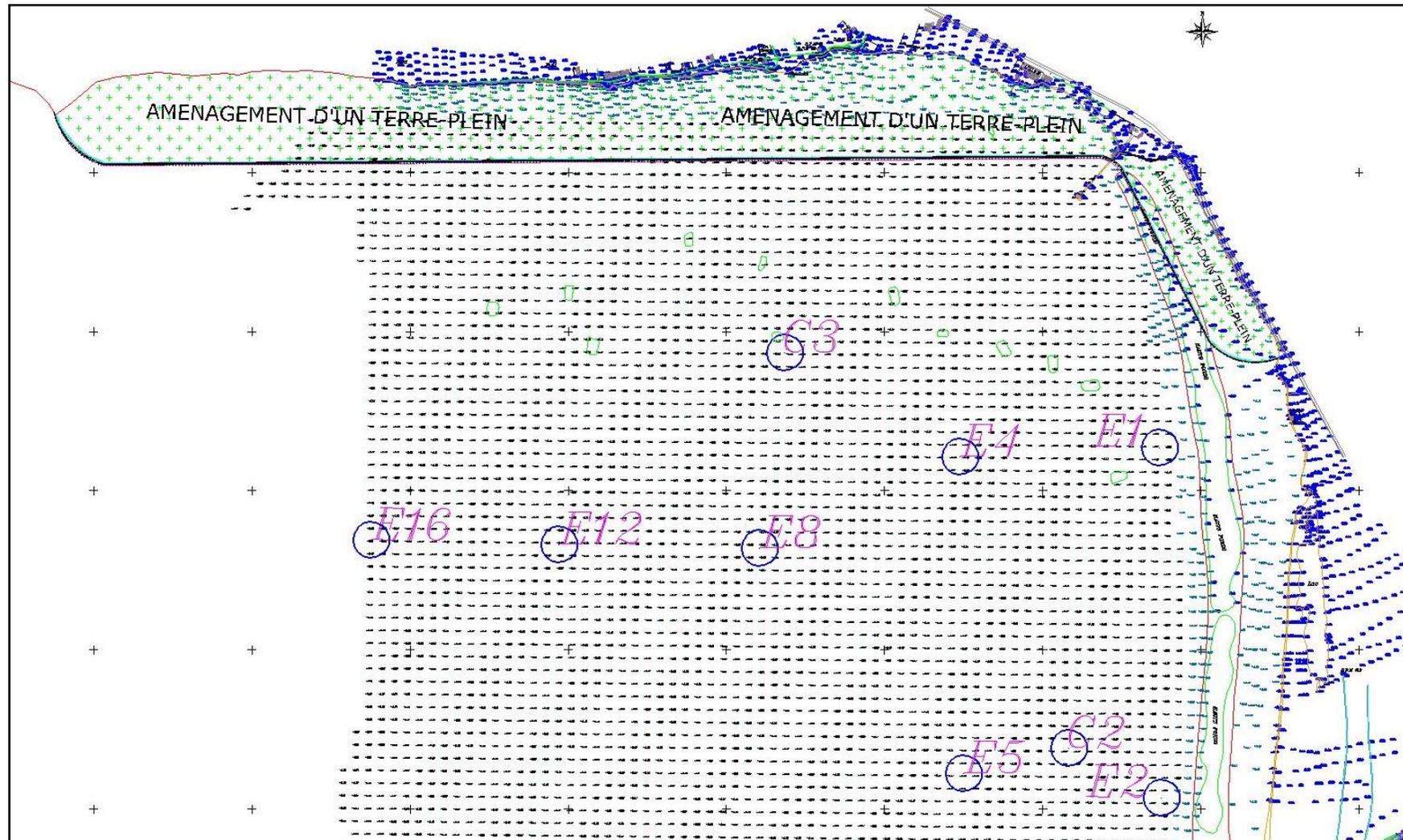


Figure 50 : Esquisse de la variante 2 proposée pour l'aménagement de Menzel Jemil

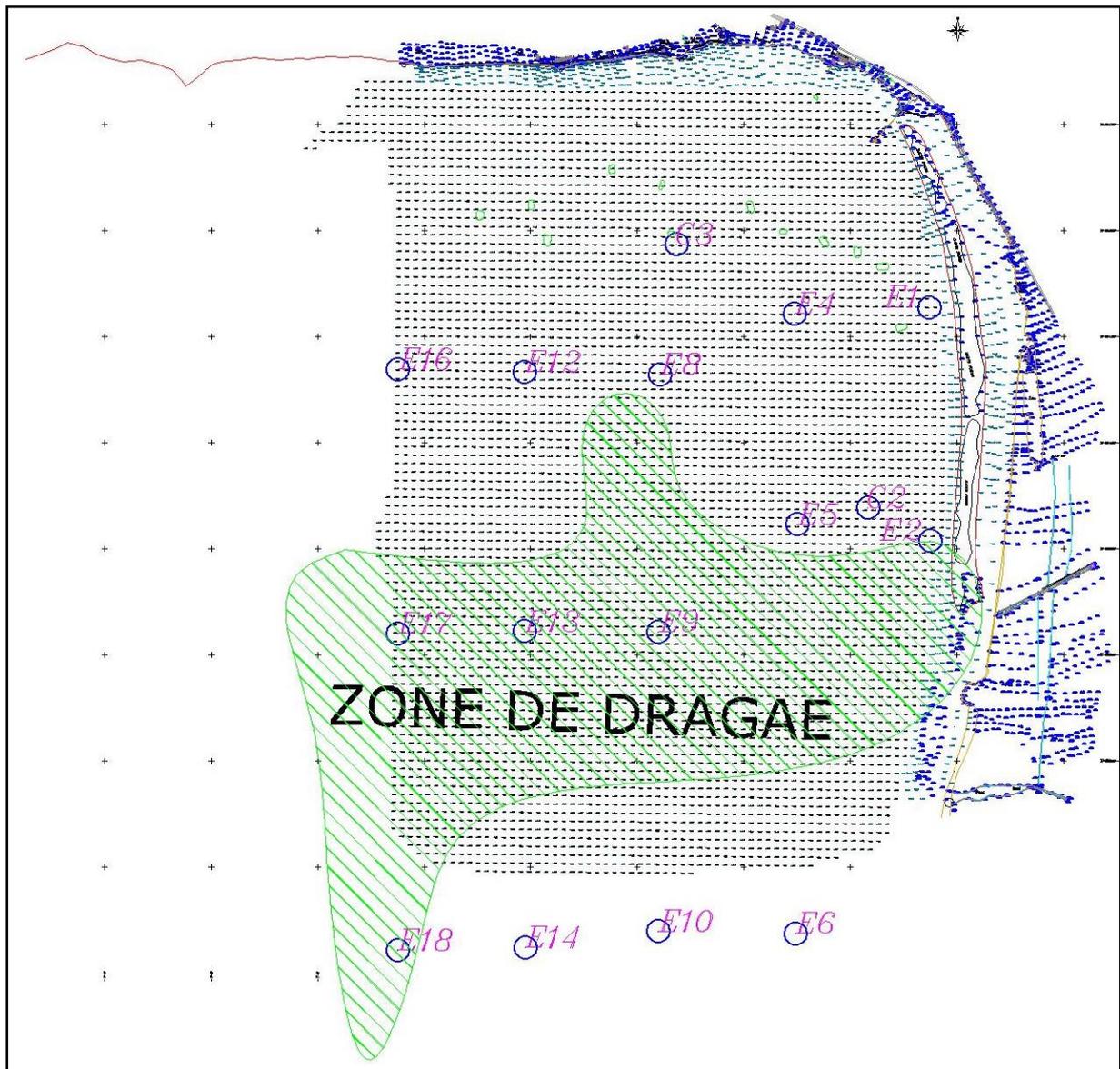


Figure 51 : Délimitation de la zone de dragage

8.3 CONCEPTION ET DIMENSIONNEMENT DES OUVRAGES DE PROTECTION A TALUS

8.3.1 POIDS DES BLOCS

Les formules permettant de calculer le poids théorique des enrochements constituant la carapace de protection d'une digue exposée à la houle sont nombreuses. Même si, à l'origine, la formule de Hudson a été établie sur la base des essais avec des houles régulières et sans tenir compte de la période de la houle, la durée de la tempête et la perméabilité du noyau de la structure, la formule s'utilise toujours très fréquemment.

$$W = \frac{1}{K_D} \frac{H_s^3 d}{\left(\frac{d}{d_0} - 1\right)^3 \cot g \alpha}$$

Où :

W = poids moyen des enrochements en tonne

d = poids spécifique du matériau constituant le bloc (2,4 t/m³ pour les enrochements)

d₀ = poids spécifique de l'eau de mer (1,03 t/m³)

H_s = hauteur significative de la houle du projet

α = angle du talus de la digue avec l'horizontale

K_d = coefficient de stabilité de Hudson

La valeur de K_d est généralement réduite quand la pente des fonds devant l'ouvrage devient importante et que l'ouvrage se trouve en zone déferlante. Ce coefficient dépend de la nature des matériaux et de la manière d'arrangement des blocs de la carapace.

Le coefficient K_d est pris égal à 3.2 pour une houle déferlante.

Le résultat du dimensionnement de la carapace par la formule de Hudson est récapitulé dans le tableau suivant :

Tableau 21: Paramètres de calcul des enrochements de la carapace

Profil	Talus	Hs(m)	Kd	W(T)	Catégories
Profil Menzel Abderrahmane	3/2	1,25	3,2	415	0,5-1T
Profil Menzel Jemil	3/2	1,25	3,2	415	0,5-1T

8.3.2 EPAISSEUR DES COUCHES

L'épaisseur de la carapace ainsi que la sous couche est donnée par la formule suivante :

$$E = nK\Delta(w/\gamma_r)^{1/3}$$

W : poids moyen des blocs en t

γ_r : masse volumique des matériaux en t/m³

$K\Delta$: le coefficient de couche ; $K\Delta = 1.1$

n : le nombre de couche de blocs ; $n=2$

L'épaisseur de la carapace est égale à 1,5m

Le dimensionnement de l'ouvrage de protection est comme suit :

Tableau 22: Dimensionnement des ouvrages de protection à talus

Profil	Pente	Carapace (t)	E carapace (m)	Noyau
P.Menzel Abderrahmane	3/2	0,5-1	1,5	1-500 kg
P.Menzel Jemil	3/2	0,5-1	1,5	1-500 kg

8.4 DESCRIPTION DES PROFILS TYPES

8.4.1 OUVRAGE À TALUS

Les variantes 1, 2 relatives à l'aménagement de Menzel Abderrahmane ainsi que les variantes 1 et 2 correspondantes à l'aménagement de Menzel Jemil sont composées du profil type suivant (figure 51) :

- un noyau en tout venant 1/500 kg, de pente 3/2 ayant une largeur minimale 3 m à la côte +2 m NGT ;
- une carapace de 0.5 – 1t en deux couches d'épaisseur 1.5 m et de pente 3/2 arasée à la côte +2 m NGT.

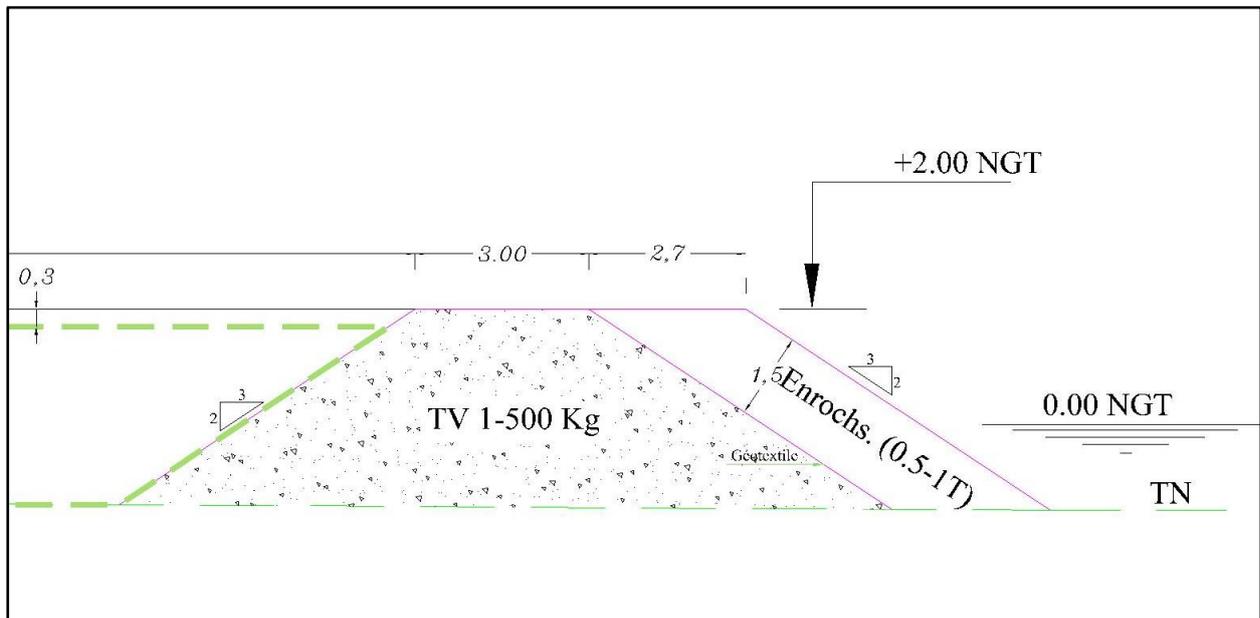


Figure 52 : Profil type de l'ouvrage à talus

8.4.2 QUAI EN BLOCS

Les variantes 3, 4 et 5 relatives à l'aménagement de Menzel Abderrahmane comprennent l'aménagement d'un quai en blocs selon les profils types suivants :

Profil type 1 (variante 3) Fondé à une profondeur de 2,5 m NGT et arasé à la côte +2,0 m NGT, le profil type 1 est constitué de (figure 52) :

- Trois blocs superposés couronnés par une poutre en béton armé ;
- Un massif d'épaulement en enrochements 1/100 kg ;
- Un filtre en enrochements 1/100 mm ;
- Une couche de réglage en pierres cassées de 15 cm ;
- Une fondation en enrochements 10/50 kg posée dans une souille préalablement draguée.

Profil type 2 (variante 3) Fondé à une profondeur de 1,5 m NGT et arasé à la côte + 2,0 m NGT, le profil type 2 est constitué de (figure 53) :

- Deux blocs superposés couronnés par une poutre en béton armé ;
- Un massif d'épaulement en enrochements 1/100 kg ;
- Un filtre en enrochements 1/100 mm ;
- Une couche de réglage en pierres cassées de 15 cm ;
- Une fondation en enrochements 10/50 kg posée dans une souille préalablement draguée.

Profil type (variantes 4 et 5) Fondé à une profondeur moyenne de 0,5 m NGT et arasé à la côte + 2 m NGT, le profil type des variantes 4 et 5, comprend (figure 54) :

- Deux blocs superposés couronnés par une poutre en béton armé ;
- Un massif d'épaulement en enrochements 1/100 kg ;
- Une couche de réglage en pierres cassées de 15 cm ;
- Une fondation en enrochements 10/50 kg posée dans une souille préalablement draguée.

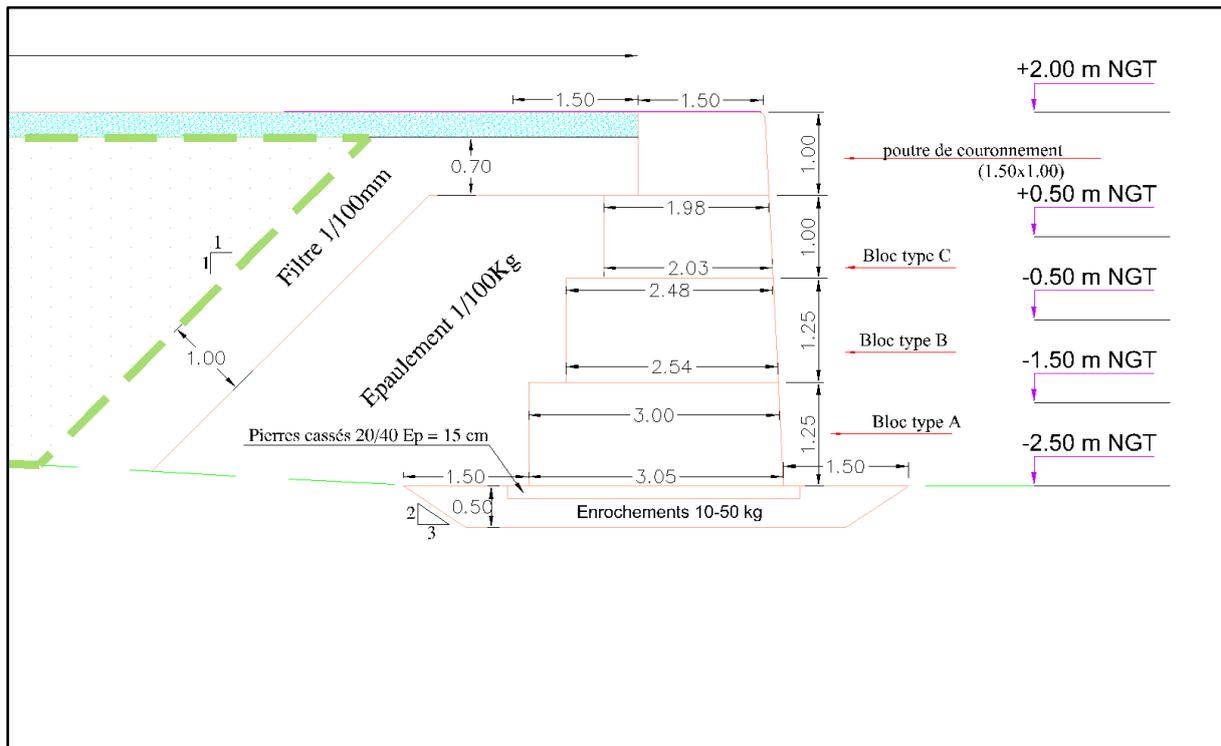


Figure 53 : Profil type 1 de la variante 3 – Menzel Abderrahmane

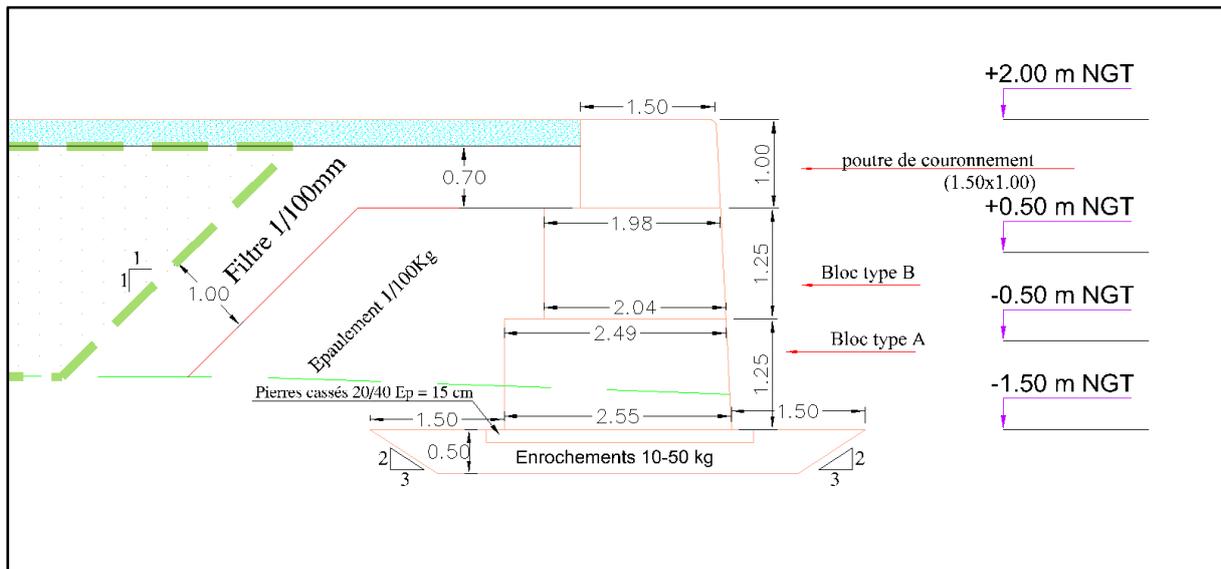


Figure 54 : Profil type 2 de la variante 3 – Menzel Abderrahmane

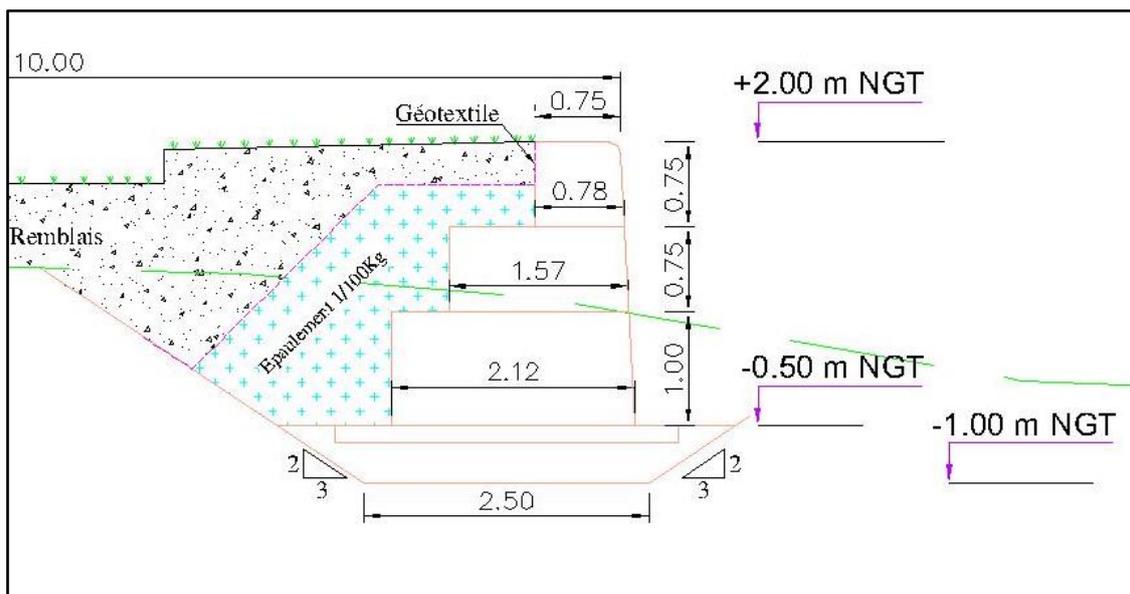


Figure 55 : Profil type des variantes 4 et 5 – Menzel Abderrahmane

8.4.3 DEPOT DES PRODUITS DE DRAGAGE

Dans les actions d'aménagement présentées, nous proposons le dragage des sédiments sur toute sa tranche anoxique (60 cm) et ce dans toutes les zones à charge organique élevée ($COT \geq 1,8\%$) notamment au niveau de la zone centrale de la lagune à Menzel Jemil. Les produits de dragage seront déposés à terre et utilisés pour la création d'un terre-plein au niveau de Menzel Jemil conformément à la variante 2 proposée.

Les actions à entreprendre pour le confinement du produit de dragage sont les suivantes :

- Mise en place de drains et couche drainante pour l'évacuation des eaux contenues dans les produits de dragage;
- Remblaiement par le produit de dragage ;
- Recouvrement du terre-plein par une couche de 30 cm de matériaux propre

Le profil type des variantes 1 et 2 de Menzel Abderrahmane et la variante 1 de Menzel Jemil est présenté dans la figure 55

Le profil type pour la variante 2 de Menzel Jemil, est présenté dans la figure (figure 56).

De même, les profils type de la variante 3 relative à l'aménagement de Menzel Abderrahmane sont présentés dans la figure 57 et la figure 58.

Les profils type des variantes 4 et 5 sont présentés dans les figures 59 et 60.

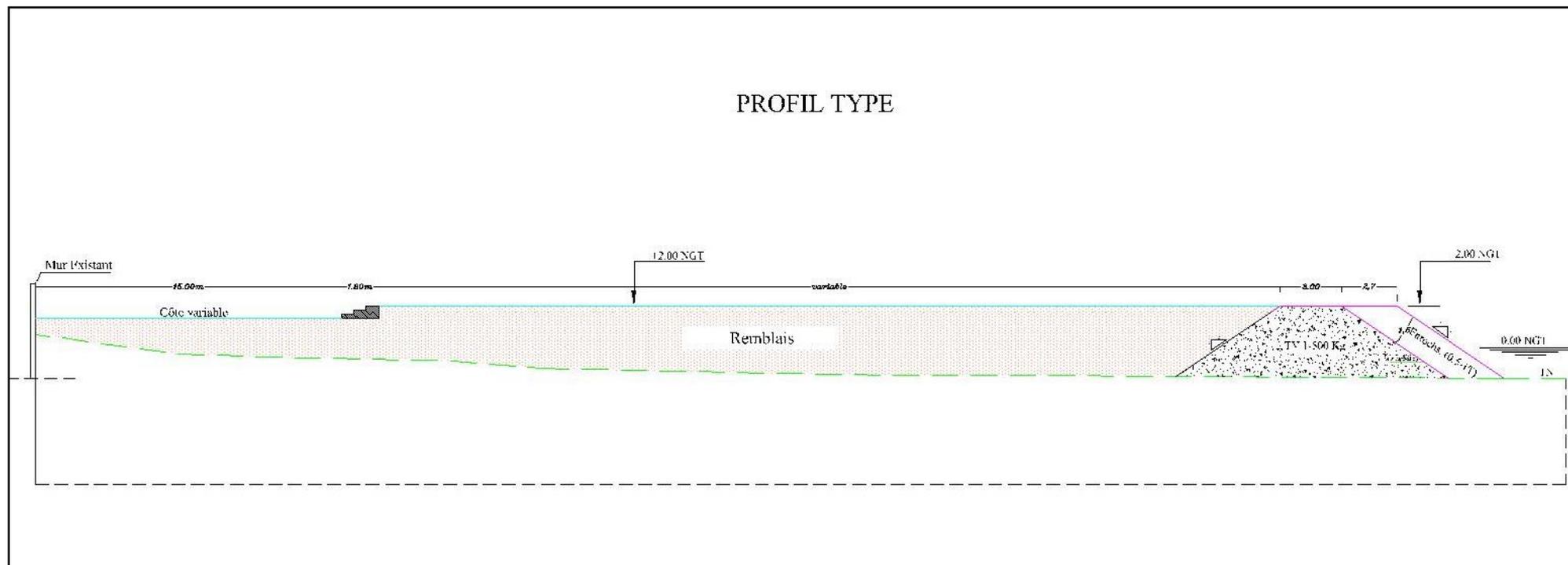


Figure 56 : Profil type pour les variantes 1 et 2 de Menzel Abderrahmane et la variante 1 de Menzel Jemil

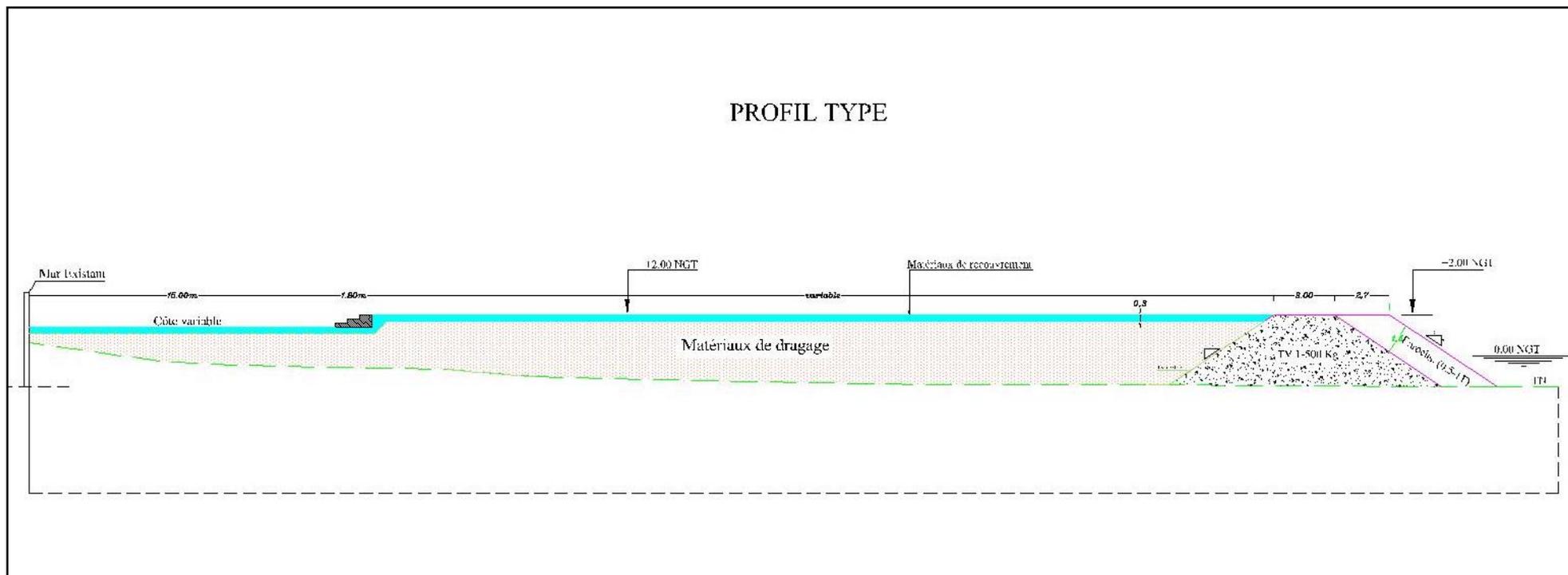


Figure 57 : Profil type pour la variante 2 de Menzel Jemil

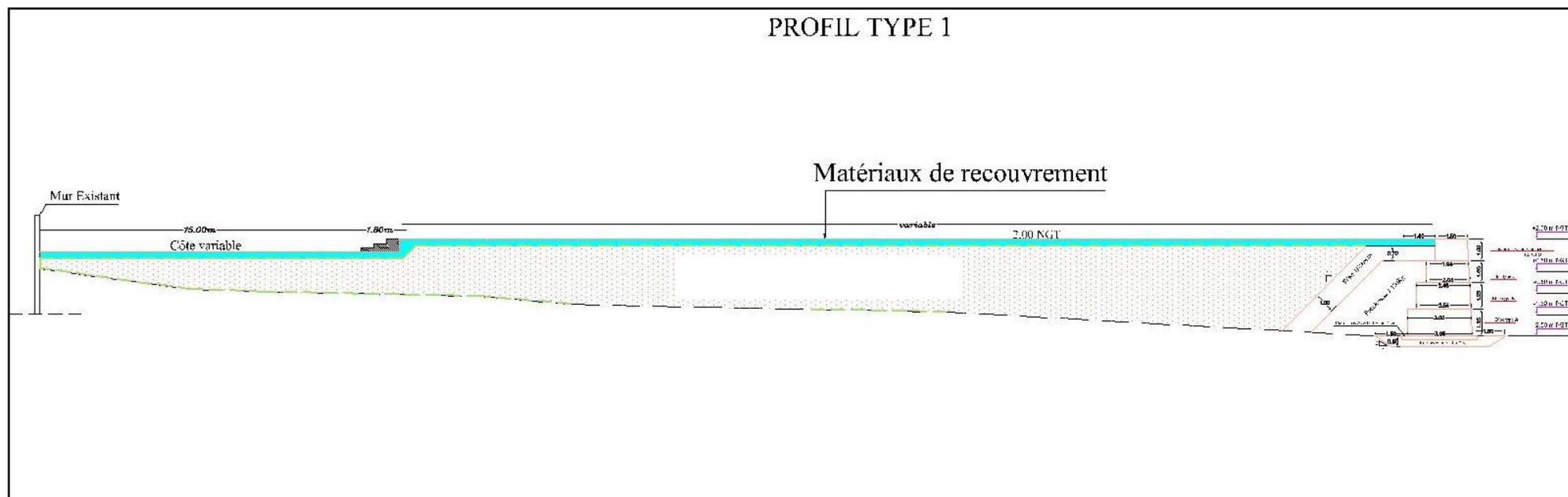


Figure 58 : Profil type 1 pour la variante 3 de Menzel Abderrahmane

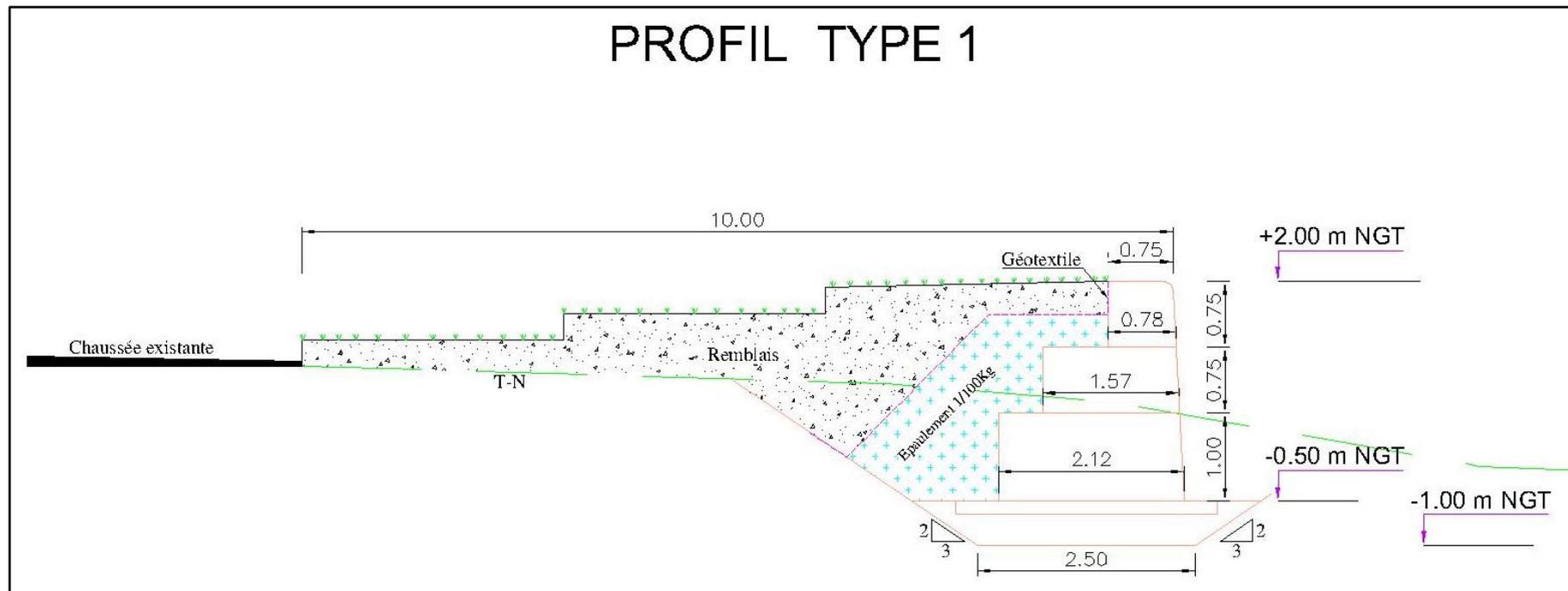


Figure 6o : Profil type 1 pour les variantes 4 et 5 de Menzel Abderrahmane

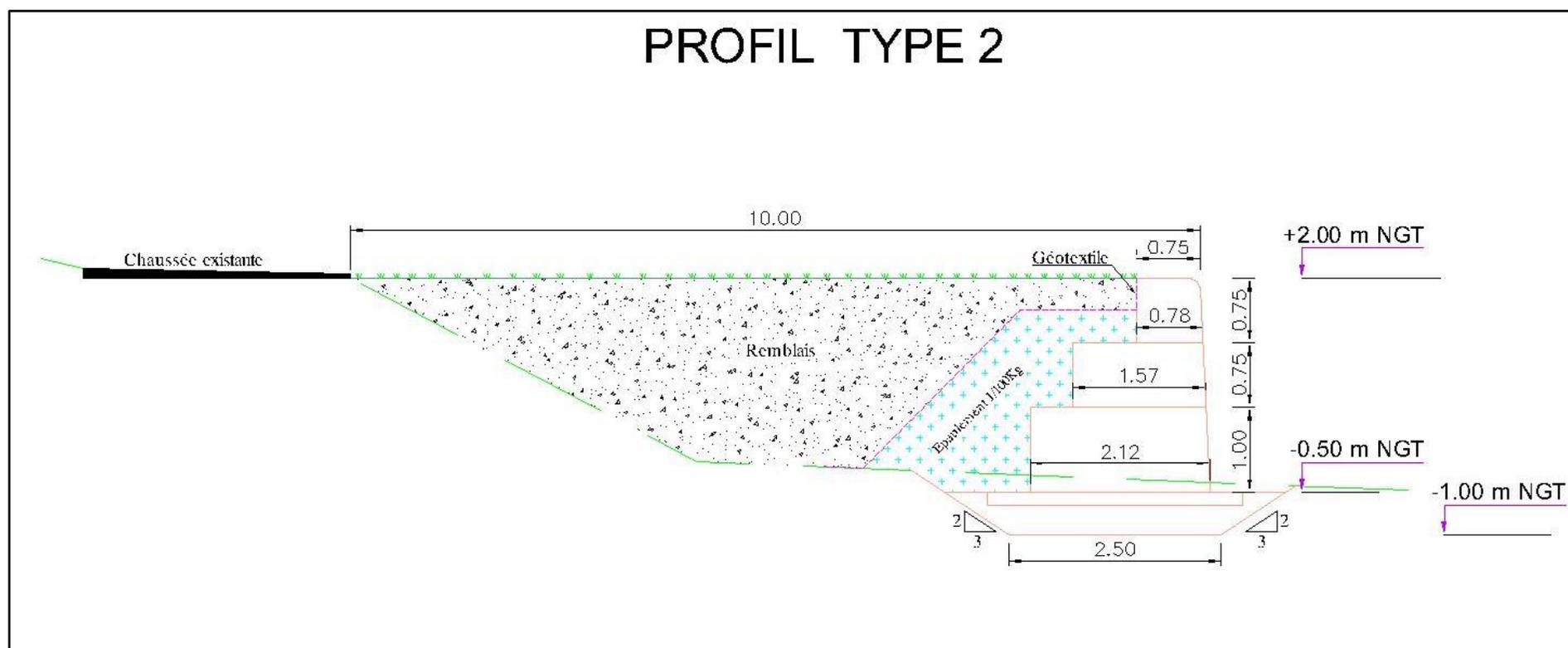


Figure 61 : Profil type 2 pour les variantes 4 et 5 de Menzel Abderrahmane

8.5 ESTIMATION DU PROJET

Une estimation sommaire du coût de chaque variante proposée est présentée ci après.

Pour les travaux de remblais, deux cas se présentent :

- Remblaiement à partir des produits de dragage de Menzel Jemil si la variante 2 est retenue, dans ce cas les produits dragués seront déposés à Menzel Jemil puis transportés par camions jusqu'à Menzel Abderrahmane. Le coût de remblais retenu dans l'estimation correspond au transport et mise en remblai, le coût de dragage étant déjà comptabilisé dans l'estimation de la variante 2 de Menzel Jemil
- Remblaiement à partir de matériaux d'apport, soit de Ghar El Melh ou de Kalaat Landlous dans le cadre des dragages d'entretien à faire pour ces deux ports, ou d'une carrière de la région

8.5.1 MENZEL ABDERRAHMANE

Variante 1 : avec produits de dragage

Le coût de la variante 1 est estimé à 4MDT HT

Variante 1				
Désignation	Unité	Quantité	Prix unitaire	Prix Total
Installation du chantier	F	1	200.000	200.000
Tout venant 1-500 kg	m3	25000	60	1.500.000
Enrochement 0,5-1t	m3	9000	70	630.000
Matériaux de recouvrement	m3	15000	20	300.000
Remblais	m3	65500	7	458.500
Total				3.088.500
Aléas et imprévus (30%)				926.550
Total HTVA				4.015.050

Variante 1 : avec remblais d'apport

Le coût de cette variante s'élève à 4,5 MDT HT

Variante 1				
Désignation	Unité	Quantité	Prix unitaire	Prix Total
Installation du chantier	F	1	200.000	200.000
Tout venant 1-500 kg	m3	25000	60	1.500.000
Enrochement 0,5-1t	m3	9000	70	630.000
Matériaux de recouvrement	m3	15000	20	300.000
Remblais	m3	65500	13	851.500
Total				3.481.500
Aléas et imprévus (30%)				1.044.450
Total HTVA				4.525.950

Variante 2 : avec produits de dragage

Le coût de la variante 2 est estimé à 5,4 MDT HT

Variante 1				
Désignation	Unité	Quantité	Prix unitaire	Prix Total
Installation du chantier	F	1	250.000	250.000
Tout venant 1-500 kg	m ³	30.000	60	1.800.000
Enrochement 0,5-1t	m ³	10.000	70	700.000
Matériaux de recouvrement	m ³	20.000	20	400.000
Remblais	m3	144000	7	1.008.000
Total				4.158.000
Aléas et imprévus (30%)				1.247.400
Total HTVA				5.405.400

Variante 2 : avec remblais d'apport

Le coût de cette variante s'élève à 6,5 MDT HT

Variante 1				
------------	--	--	--	--

Désignation	Unité	Quantité	Prix unitaire	Prix Total
Installation du chantier	F	1	250.000	250.000
Tout venant 1-500 kg	m ³	30.000	60	1.800.000
Enrochement 0,5-1t	m ³	10.000	70	700.000
Matériaux de recouvrement	m ³	20.000	20	400.000
Remblais	m3	144000	13	1.872.000
Total				5.022.000
Aléas et imprévus (30%)				1.506.600
Total HTVA				6.528.600

Variante 3 : avec produit de dragage

Le coût de la variante 3 est estimé à 9.35 MDT HT

Variante 1				
Désignation	Unité	Quantité	Prix unitaire	Prix Total
Installation du chantier	F	1	300.000	300.000
Epaulement 1-100 kg	m ³	12000	60	720.000
Filtre 1-100 mm	m ³	5000	60	300.000
Dragage de souille	m ³	6500	20	130.000
Pierres cassés 20/40	m ²	3500	50	175.000
Enrochement 10-50 kg	m ³	2500	60	150.000
Blocs en béton	m ³	7500	400	3.000.000
Béton armé pour poutre de couronnement	m ³	1600	600	960.000
Matériaux de recouvrement	m ³	20000	20	400.000
Remblais	m3	150000	7	1.050.000
Total				7.185.000
Aléas et imprévus (30%)				2.155.500
Total HTVA				9.340.500

Variante 3 : avec remblais d'apport

Le coût de la variante 3 est estimé à 10.5MDT HT

Variante 1				
Désignation	Unité	Quantité	Prix unitaire	Prix Total
Installation du chantier	F	1	300.000	300.000
Epaulement 1-100 kg	m ³	12000	60	720.000
Filtre 1-100 mm	m ³	5000	60	300.000
Dragage de souille	m ³	6500	20	130.000
Pierres cassés 20/40	m ²	3500	50	175.000
Enrochement 10-50 kg	m ³	2500	60	150.000
Blocs en béton	m ³	7500	400	3.000.000
Béton armé pour poutre de couronnement	m ³	1600	600	960.000
Matériaux de recouvrement	m ³	20000	20	400.000
Remblais	m ³	150000	13	1.950.000
Total				8.085.000
Aléas et imprévus (30%)				2.425.500
Total HTVA				10.510.500

Variante 4 : avec remblais d'apport

Le coût de la variante 4 est estimé à 1.2MDT HT

Variante 1				
Désignation	Unité	Quantité	Prix unitaire	Prix Total
Installation du chantier	F	-	-	300.000
Epaulement 1-100 kg	m ³	857	60	51.420
Dragage de souille	m ³	1350	20	27.000
Pierres cassés 20/40	m ²	126	50	6.300
Enrochement 10-50 kg	m ³	454	60	27.240
Blocs en béton	m ³	1078	400	431.200
Remblais	m3	2215	13	28.795
Géotextile	m ²	1285	20	25.700
Total				897.655
Aléas et imprévus (30%)				269.300
Total HTVA				1.166.955

Variante 5 : avec remblais d'apport

Le coût de la variante 5 est estimé à 1.6MDT HT

Variante 1				
Désignation	Unité	Quantité	Prix unitaire	Prix Total
Installation du chantier	F	-	-	300.000
Epaulement 1-100 kg	m ³	1255	60	75.300
Dragage de souille	m ³	2596	20	51.920
Pierres cassés 20/40	m ²	185	50	9.250
Enrochement 10-50 kg	m ³	665	60	39.900
Blocs en béton	m ³	1579	400	631.600
Remblais	m ³	2990	13	38.870
Géotextile	m ²	1870	20	37.400
Total				1.184.240
Aléas et imprévus (30%)				355.272
Total HTVA				1.539.512

Aménagement du port de pêche de Menzel Abderrahmane

Le coût d'aménagement du port est estimé à 4 MDT HT. Cette estimation est basée sur l'étude du plan directeur des ports de pêche avec une actualisation des prix

Variante 1				
Désignation	Unité	Quantité	Prix unitaire	Prix Total
Construction de la digue Est	ml	330	6500	2.145.000
Construction d'un appontement à -2,0 m hydro	ml	63	5500	346.500
Remblais pour terre-plein	m ³	20.000	13	260.000
Construction d'un plan incliné	F	1	80000	80.000
Revêtement du terre-plein	m ²	1000	25	25.000
Superstructure et équipements	F	1	160.000	160.000
Total				3.016.500
Aléas et imprévus (30%)				904.950
Total HTVA				3.921.450

8.5.2 MENZEL JEMIL

Variante 1

Le coût de la variante 1 est estimé à 9,2 MDT HT

Variante 1				
Désignation	Unité	Quantité	Prix unitaire	Prix Total
Installation du chantier	F	1	500.000	500.000
Tout venant 1-500 kg	m ³	34200	60	2.052.000
Enrochement 0,5-1t	m ³	14180	70	992.600
Matériaux de recouvrement	m ³	19.500	20	390.000
Matériaux de remblaiement	m ³	239.000	13	3.107.000
Total				7.041.600
Aléas et imprévus (30%)				2.112.480
Total HTVA				9.154.080

Variante 2

Le coût de la variante 2 est estimé à 47.580.000 DT HT

Variante 1				
Désignation	Unité	Quantité	Prix unitaire	Prix Total
Installation du chantier	F	-	-	800.000
Dragage et mise en remblais	m ³	2.500.000	10	25.000.000
Tout venant 1-500 kg	m ³	85.000	60	5.100.000
Enrochement 0,5-1t	m ³	30.000	70	2.100.000
Matériaux de recouvrement	m ³	180.000	20	3.600.000
Total				36.600.000
Aléas et imprévus (30%)				10.980.000
Total HTVA				47.580.000

9 CONCLUSION

L'interprétation des résultats des analyses géochimiques a montré que les sédiments de la lagune de Bizerte – Menzel Jemil manifestent un enrichissement notable en carbone organique total et en azote notamment dans la partie centrale de la lagune, partie profonde et envasée. Cependant les résultats des métaux lourds, n'a révélé aucune pollution métallique. Les différentes teneurs enregistrées sont très faibles voire insignifiantes.

La répartition spatiale des éléments analysés à savoir le COT, Azote total, métaux lourds et HAPs, est identique avec, en particulier, l'individualisation de la zone centrale de la lagune comme zone de concentration. Cette répartition confirme que ces différents polluants sont dans la même phase et par conséquent proviennent de la même origine.

Le modèle hydrodynamique de circulation des masses d'eaux, confirme l'hypothèse avancée par la présente étude relative à l'origine de la pollution de la lagune de Bizerte au niveau de Menzel Jemil ; la zone centrale Est de la lagune serait une zone d'accumulation de tous les polluants de la lagune notamment ceux de Menzel Bourguiba.

Plusieurs variantes d'aménagement ont été proposées pour l'amélioration de la qualité de vie à Menzel Abderrahmane et Menzel Jemil. Les variantes proposées tiennent compte des contraintes spécifiques à chacune des deux régions.

Dans le but d'obtenir des berges propres et un environnement sain pour divers activités de pêche, de conchyliculture, loisir, voile, plongée, et pour remédier à la pollution observée dans ces deux agglomérations, nous avons proposé des solutions curatives (Variante 2 de Menzel Jemil) dans le choix des variantes d'aménagement.

Les actions proposées par ces variantes convergent autour des objectifs suivants :

- Elimination de la pollution organique par dragage de la zone centrale de Menzel Jemil;
- Confinement des produits de dragage sur les berges de Menzel Jemil
- Elimination des irrégularités du trait de côte, et aménagements des petites baies qui constituent des zones de dépôt de toutes sortes de déchets solides et liquides.
- Elimination des zones de stagnation des eaux et amélioration de la circulation des eaux à Menzel Abderrahmane et Menzel Jemil ;
- Aménagement des berges du lac à Menzel Abderrahmane et création d'une esplanade entre les habitations et le front de mer ;
- Une meilleure exploitation du plan d'eau.

Le dimensionnement des ouvrages à talus et du quai en blocs proposés, sera vérifié et éventuellement modifié en fonction des résultats de l'étude géotechnique.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Amor B. Garali, Mohamed Ouakad, Moncef Gueddari, 2010. Geochemistry of episodic sedimentation in Bizerte lagoon, Northern Tunisia. *Lakes and reservoirs: Research and management*, 15: 273-282.

Amor B. Garali, Mohamed Ouakad, Moncef Gueddari, 2010. Contamination of superficial sediments by heavy metals and iron in the Bizerte lagoon, northern Tunisia. *Arab Journal Geosciences*, 295-306.

ATKINS, 2011. Dépollution intégrale du Lac de Bizerte, Rapport Diagnostic. 232p.

Béjaoui B., 2009. Développement d'un Modèle Tridimensionnel Couplé Dynamique-Ecologie : Application à la Lagune de Bizerte. *Rapport de thèse de spécialité en génie hydraulique. ENIT, Département d'hydraulique, 210 p.*

Béjaoui B., A. Harzallah, M. Moussa, A. Chapelle, 2008. Modèle Couplé Dynamique-Ecologie pour la lagune de Bizerte. *Bulletin de l'Institut National des Sciences et Technologies de la Mer de Salammbô*, 35, pp. 131-148.

IHE – COMETE Engineering, 2004. Etude de dépollution du Lac de Bizerte, phase III-plan d'action pour le plan d'eau.

IHE – COMETE Engineering, 2004. Etude sur la dépollution industrielle dans le bassin versant du Lac de Bizerte, pour le compte de la direction générale de l'environnement et de la qualité de la vie.

MAERH (Ministère de l'Agriculture, de l'Environnement et des Ressources Hydrauliques), 2004. Etude sur la dépollution industrielle dans le bassin versant du lac de Bizerte. Etude réalisée par COMETE-Engineering et IHE pour le MAERH.

Ouakad M., 2007 . Genèse et évolution des milieux laguno-lacustres du nord-est de la Tunisie (Garaet Ichkeul, Lagunes de Bizerte et de Ghar el Melh). Thèse ès. Sciences Géologiques, Université de Tunis el Manar, Tunis, Tunisie, p 453

SCET Tunisie – Eco ressources Int, 2000. Etude de l'amélioration de la qualité de l'eau de la lagune de BOUGHRARA.

SCET Tunisie – Eco ressources Int, 2000. Etude de l'amélioration de la qualité de l'eau de la lagune de GHAR EI MELH.

STUDI-IDEALCONSULT. Etude du plan directeur des ports de pêche, Activité 6 : élaboration du plan directeur port de pêche – Menzel Abderrahmane.

Yoshida M (2004) Mobility of potentially toxic element from the bottom sediment of Bizerte lagoon-sequential leaches and acid extraction. Shipboard Scientists Team. Final report research promotion programmes, Tunis, Tunisie, pp 55-70

ZAYANI Mohamed, 2010. Etude Géochimique d'une Lagune Méditerranéenne: La Lagune de Bizerte. Mastère en Sciences de L'Environnement de la faculté des sciences de Tunis

Annexe 1

Limites de la zone de dragage

Coordonnées (UTM 32 WGS 84)	
X	Y
578536.59413	4120267.44708
578596.727697	4120289.31383
578662.327951	4120311.18059
578733.394893	4120343.98071
578809.928523	4120327.58065
578864.595402	4120294.78052
578924.728968	4120272.91377
578995.795911	4120256.51371
579072.329541	4120267.44708
579154.329859	4120245.58033
579219.930113	4120223.71358
579263.663616	4120179.98008
579285.530367	4120147.17995
579323.797182	4120174.51339
579367.530685	4120212.7802
579411.264188	4120251.04702
579476.864443	4120267.44708
579536.998009	4120272.91377
579608.064951	4120283.84715
579722.865396	4120272.91377
579821.265778	4120283.84715
579936.066223	4120294.78052
580028.999917	4120300.24721

Coordonnées (UTM 32 WGS 84)	
580132.866986	4120294.78052
580242.200743	4120272.91377
580340.601125	4120261.9804
580449.934882	4120251.04702
580564.735327	4120261.9804
580690.469148	4120261.9804
580794.336218	4120267.44708
580892.736599	4120251.04702
581007.537044	4120256.51371
581078.603986	4120272.91377
581155.137617	4120283.84715
581237.137934	4120283.84715

Annexe 2

Programme préliminaire des sondages géotechniques

La campagne géotechnique à prévoir dans le cadre de l'étude de dépollution de la lagune de Bizerte – Aménagement de **Menzel Jemil** – comprend :

- La réalisation de 3 sondages carottés en mer de profondeur 15 m ; avec essais SPT au droit des formations sableuses, prélèvements d'échantillons intact et réalisation des essais d'identification et des essais mécaniques nécessaires ;
- La réalisation de 3 sondages pressiométriques en mer de profondeur 15 m avec essais tout les mètres.

Les sondages carottés et pressiométriques sont équidistants de 500 m et sont localisés approximativement comme indiqué dans la figure ci-dessous :



Carte de localisation préliminaire des sondages géotechniques à Menzel Jemil

Coordonnées des sondages géotechniques –Menzel Jemil

Sondages	Coordonnées (UTM, 32 - WGS 84)
Sondage 1	581018.00 m E
	4120261.00 m N
Sondage 2	581532.00 m E
	4120307.00 m N
Sondage 3	582054.00 m E
	4120323.00 m N
Sondage 4	582577.00 m E
	4120157.00 m N
Sondage 5	582874.00 m E
	4119855.00 m N
Sondage 6	583079.00 m E
	4119497.00 m N

La campagne géotechnique relative à l'aménagement de **Menzel Abderrahmane**, comprend :

- La réalisation de 2 sondages carottés en mer de profondeur 15 m ; avec essais SPT au droit des formations sableuses, prélèvements d'échantillons intact et réalisation des essais d'identification et des essais mécaniques nécessaires ;
- La réalisation de 1 sondage pressiométrique en mer de profondeur 15 m avec essais tout les mètres.

Les sondages carottés et pressiométriques sont équidistants de 400 m et sont localisés approximativement comme indiqué dans la figure ci-dessous :



Carte de localisation préliminaire des sondages géotechniques à Menzel Abderrahmane

Coordonnées des sondages géotechniques –Menzel Abderrahmane

Sondages	Coordonnées (UTM, 32 - WGS 84)
Sondage 1	576667.81 m E
	4120933.68 m N
Sondage 2	577059.78 m E
	4120856.98 m N
Sondage 3	577448.18 m E
	4120744.20 m N

Le programme présenté reste approximatif en attendant la finalisation de la solution technique quant à l'implantation et nature des ouvrages à projeter.

Annexe 3

Etude spécifique pour le port de Menzel Abderrahmane

Etude sur modèles numériques :

- Etude hydrodynamique ;
- Etude de réfraction ;
- Etude d'agitation.