

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
المدرسة الوطنية العليا لعلوم البحر و تهينة الساحل  
Ecole Nationale Supérieure des Sciences de la Mer et de l'Aménagement du Littoral



## MEMOIRE DE MAGISTER EN SCIENCES DE LA MER

**OPTION : Gestion et Surveillance de l'Environnement Marin et Littoral**

### Thème

**Modélisation spatiotemporelle des paramètres de la pollution  
organique dans la baie de Bousmail**

**Présenté par :**

**- Mr BOUGHRIRA Abdelhak.**

Soutenu le **13 - 06 - 2012** devant le jury :

<b>Mr. Dr. HEMIDA Farid</b>	(ENSSMAL)	: Président
<b>Mr. Pr. BOUSSAHEL Rachdi</b>	(ENSSMAL)	: Examineur
<b>Mr. Dr. BACHARI Khaldoun</b>	(U.S.T.H.B)	: Examineur
<b>Mr. Dr. BADIS Abdelmalek</b>	(U.S.D.B)	: Examineur
<b>M<sup>me</sup>. Dr. HOUMA-BACHARI Fouzia</b>	(ENSSMAL)	: Directrice de thèse

## REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à exprimer ma reconnaissance à tous les membres de ce jury, pour l'honneur qu'ils me font en acceptant de juger ce travail :

Mr. HEMIDA Farid, Maître de conférences à l'ENSSMAL, je vous remercie d'avoir accepté de présider ce jury et pour vos précieux conseils et pour votre aide et vos cours en statistique qui sont très utiles.

Mr. BOUSSAHEL Rachdi, Maître de conférences au Laboratoire Chrom d'Alger, je vous remercie d'avoir accepté d'examiner ce travail.

Mr. BADIS Abdelmalek, Maître de conférences à l'université Saâd Dahlab de Blida, je vous remercie d'avoir accepté d'examiner ce travail.

Mr. BACHARI Khaldoun, Directeur de recherche au Centre de Recherche scientifique et technique en Analyses Physico-Chimique (C.R.A.P.C), je vous remercie d'avoir accepté d'examiner ce travail.

Je remercie Mme BACHARI pour m'avoir accueillie au sein de son laboratoire et de m'avoir offert la possibilité de travailler dans un domaine qui me passionne et de réaliser ce mémoire dans les meilleures conditions. Je vous remercie pour votre confiance, vos encouragements et pour m'avoir guidée.

Je tiens aussi à remercier vivement Monsieur BOULAHDID et Mr. BELKASSA pour leur disponibilité, leur grande amabilité et surtout pour leurs aides précieuses et pour leur gentillesse particulière.

Un grand merci pour MATOUK, FARIZA, BOUDJELEL, et EDDALIA, pour votre aide, vos conseils et vos encouragements.

Les résultats des analyses de mon travail n'auraient pas eu lieu, si tout l'équipage des navires « MS- Ben Yahia et Baba Aroudj » n'auraient pas été à mes côtés pour les prélèvements d'échantillons et mesures *in situ*, qu'ils trouvent ici tous mes remerciements et ma gratitude.

C'est un plaisir autant qu'un devoir d'exprimer ma gratitude et ma reconnaissance à toutes les personnes ayant contribué de près ou de loin, pour le bon déroulement de ma formation, ainsi qu'à la réalisation de ce modeste travail.

Merci à tous ceux que je n'ai pas cités ici mais à qui je pense quand même.

# TABLE DE MATIERE

Liste des Tableaux	
Liste des Figures	
Introduction.....	1

## Chapitre I Synthèse Bibliographique

<b>I.1.La pollution par les hydrocarbures.....</b>	<b>3</b>
<b>I.1.1. Définition des hydrocarbures .....</b>	<b>3</b>
<b>I.1.2. Origine des hydrocarbures dans l'environnement marin.....</b>	<b>3</b>
A- Origine Anthropique .....	3
B- Les hydrocarbures biogènes.....	6
<b>I.1.3 Propriétés physiques des hydrocarbures .....</b>	<b>7</b>
1.3.1 La densité .....	7
1.3.2 La viscosité .....	7
1.3.3 Le point d'écoulement .....	7
1.3.4 Le point éclair.....	7
1.3.5 Le point d'ébullition.....	8
1.3.6 La tension superficielle.....	8
1.3.7 Le coefficient de partage .....	8
1.3.8 La volatilité relative.....	8
1.3.9 La limite de solubilité.....	8
<b>I.1.4. Classification des hydrocarbures .....</b>	<b>8</b>
1.4.A. Les hydrocarbures aliphatiques .....	8
1.4.A.1. Les paraffines.....	8
1.4.A.2 Les oléfines.....	9
1.4.A.3 les acétyléniques (les Alcynes) .....	10
1.4.B. Les hydrocarbures naphténiques.....	10
1.4.C. Les hydrocarbures aromatiques.....	13
<b>I.1.5. Comportement des hydrocarbures en mer .....</b>	<b>15</b>
1.5.1 L'étalement .....	16
1.5.2 L'évaporation .....	16
1.5.3 Solubilisation.....	17
1.5.4 L'emulsification .....	17
1.5.5 Sédimentation .....	17
1.5.6 L'oxydation .....	17
1.5.7 Biodégradation .....	18
<b>I.1.6. Impact environnemental des hydrocarbures.....</b>	<b>18</b>
1.6.1. Impacts sur les communautés vivantes de la colonne d'eau.....	19
1.6.2. Impacts sur le phytoplancton.....	19
1.6.3. Impacts sur les bactéries.....	19
1.6.4. Impacts sur le zooplancton.....	19
1.6.5. Impacts sur le milieu benthique.....	19
1.6.6. Impacts sur les oiseaux et les mammifères.....	20
1.6.7. Impacts sur la santé humaine.....	22
<b>I.1.7. Lutte contre la pollution par les hydrocarbures.....</b>	<b>23</b>
<b>I.2. Télédétection et modélisation .....</b>	<b>27</b>
I.2.1. Bases physiques de la télédétection.....	27
I.2.2. Modélisation de l'interaction du REM avec l'atmosphère.....	29
I.2.3. Détermination de la réflectance des eaux de mer par simulation des données satellites.....	30

1. Les perturbations atmosphériques.....	30
2. Interactions rayonnement électromagnétique eau de mer.....	32
2.1. Propriétés optiques des surfaces d'eau.....	32
2.2. Réflectance des surfaces marines.....	33
2.3. Etude du rayonnement sur le trajet sol atmosphère satellite.....	33
I.2.4. Application de la télédétection.....	36

## Chapitre II Présentation de la zone d'étude

II. Présentation générale de la zone d'étude.....	39
II.1. Baie de Bousmail .....	39
II.1.1 Morphologie sous-marine de la baie de Bou Ismail .....	40
II.1.2 Sédimentologie de la baie de Bou Ismail.....	41
II.1.3 Courantologie .....	42
II.1.4 Réseau hydrographique .....	43
II.2. Baie d'El Djamila .....	44
II.2.1 Dynamique sédimentaire.....	45
II.2.2 Bathymétrie.....	46
II.3. Différentes infrastructures présentes sur la baie .....	46
1-Le port de Sidi Fredj.....	46
2-Le port de Bouharoun.....	47
II.4. Sources de pollution dans la baie de Bou-Ismaïl.....	48

## Chapitre III Matériel et méthodes

<b>III.1. Travaux effectués en mer</b> .....	50
III.1.1. Prélèvement d'eau et localisation des stations.....	50
III.1.2. Prélèvement des sédiments superficiels .....	50
III.1.3. Mesure des paramètres physico-chimiques.....	51
III.1.3. 1. Température (T) .....	51
III.1.3. 2. Salinité S ‰ .....	51
III.1.3. 3. Potentiel d'hydrogène (PH) .....	51
III.1.3. 4. Oxygène dissous (OD) .....	51
III.1.3. 5. Matière en suspension (MES).....	52
<b>III.2. Travaux effectués aux laboratoires</b> .....	52
III.2.1. Conditionnement du matériel utilisé .....	52
III.2.2. Préparation des produits d'analyse.....	53
III.2.2.1. Produits solides.....	53
III.2.2.2. Les produits liquides .....	54
III.2.3. Quantification de la matière organique dans l'eau de mer .....	54
III.2.4. Traitement de l'eau de mer pour l'analyse des hydrocarbures .....	55
III.2.4.1. Protocole d'extraction des hydrocarbures dissous /dispersés.....	56
III.2.5. Traitement du sédiment superficiel marin pour l'analyse des hydrocarbures.....	57
III.2.5.1. Protocole d'extraction des hydrocarbures dans le sédiment.....	59
<b>III.3. Technique d'analyse des hydrocarbures</b> .....	61
III.3.1. Spectrofluorimétrie à rayonnement ultraviolet (S.F.U.V) .....	61
III.3.1.1. principe .....	62
III.3.1.2. Appareillage analytique.....	62
III.3.1.3. Etalonnage et préparation des standards.....	62
III.3.1.4. Le blanc de procédure.....	63
III.3.1.5. Limite de détection.....	63

III.3.1.5.Limite de Quantification.....	63
III.3.1.6.reproductivité de La SFUV.....	64
III.3.1.7.Mesure des intensités de fluorescence.....	65
<b>III.4. Images satellitaires utilisées.....</b>	<b>66</b>
1. Système optique du satellite SPOT.....	66
2. Système optique du satellite LANDSAT.....	66

## Chapitre IV Résultats et Discussions

<b>IV-1- Evaluation de l'état de pollution de la baie d'El Djamila .....</b>	<b>68</b>
Température.....	69
Salinité.....	69
Potentiel d'Hydrogène .....	70
Matière en suspension .....	70
Les HPA dans l'eau de mer.....	71
Les HPA dans le sédiment .....	72
<b>IV-2- Evaluation de l'état de pollution au niveau du port de Sidi-Fredj.....</b>	<b>73</b>
Température .....	73
Salinité .....	74
Potentiel d'Hydrogène .....	74
Oxygène dissous .....	75
Matière en suspension .....	75
Les HPA dans l'eau de mer.....	76
<b>VI-3- Evaluation de l'état de pollution de La baie de Bousmail.....</b>	<b>77</b>
Température.....	78
Salinité.....	78
Potentiel d'Hydrogène .....	79
Oxygène Dissous.....	80
Matière en suspension.....	81
Matière organique.....	81
Les HPA dans l'eau de mer .....	82
Les HPA dans le sédiment.....	83
<b>VI-4- Extraction de la réflectance de l'eau de mer.....</b>	<b>85</b>
VI-4-1 Données et conditions atmosphériques.....	85
VI-4-2 Extraction de la luminance de l'eau par simulation SDDS.....	85
VI-4-3 Calcul de réflectance.....	92
VI-4-4 Corrélations propriétés optiques aux paramètres indicateurs de pollution.....	93
VI-4-5 Application sur des images de Spot et de Landsat .....	99
<b>VI-5- Analyse des réflectances pour la baie d'El Djamila.....</b>	<b>103</b>
<b>VI-6- Analyse des réflectances pour la baie de Bousmail.....</b>	<b>105</b>
<b>Conclusion.....</b>	<b>109</b>
<b>Bibliographie.....</b>	<b>111</b>

Figure (1.1) : Les deux conformations du cyclohexane.....	11
Figure (1.2) : Comportement des hydrocarbures en mer.....	16
Figure (1.3) : La description schématique de susceptibilité des organismes marins aux hydrocarbures suivant leurs concentrations.....	22
Figure (1.4) : Représentation de l'onde électromagnétique.....	27
Figure (1.5) : Relation entre absorption, réflexion et transmission.....	28
Figure (1.6) : Représentation du spectre électromagnétique (CCT).....	29
Figure (1.7) : Trajet du rayonnement dans une masse d'eau.....	35
Figure (1.8) : Le logiciel « SDDS » d'application de la simulation des données satellites.....	37
Figure (1.9) : Fenêtre d'application de données astronomiques du logiciel SDDS.....	38
Figure (2.1) : Localisation géographique de la baie de Bousmail.....	39
Figure (2.2) : Topographie de la baie de Bousmail.....	40
Figure (2.3) : Sédimentologie de la baie de Bousmail.....	41
Figure (2.4) : Schéma de circulation de l'eau d'origine Atlantique.....	42
Figure (2.5) : Réseau hydrographique de la baie de Bousmail.....	43
Figure (2.6) : Situation géographique de la baie d'El Djamilia.....	45
Figure (2.7) : Répartition sédimentologique de la baie d'El Djamilia.....	46
Figure (2.8) : Image satellitaire du port de plaisance de Sidi Fredj.....	47
Figure (2.9) : Image satellitaire du port de pêche de Bouharoun.....	48
Figure (3.1) : Diagramme récapitulatif des principales étapes de traitement pour l'analyse des hydrocarbures dissous/dispersés dans l'eau de mer.....	55
Figure (3.2) : Purification et fractionnement par chromatographie sur colonne ouverte.....	57
Figure (3.3) : Diagramme récapitulatif des principales étapes de traitement pour l'analyse des hydrocarbures dans le sédiment superficiel marin.....	58
Figure (3.4) : Un extracteur Soxhlet.....	60
Figure (3.5) : Courbe d'étalonnage à 360 nm pour le dosage des HPA par SFUV.....	63
Figure (4.1): Localisation des stations dans la baie d'El-Djamila.....	68
Figure (4.2): Variation de la température dans la baie d'El-Djamila.....	69
Figure (4.3) : Variation de la salinité dans la baie d'El-Djamila.....	69
Figure (4.4): Variation du PH dans la baie d'El-Djamila.....	70
Figure (4.5): Variation de la matière en suspension dans la baie d'El-Djamila.....	71
Figure (4.6): Variation des hydrocarbures polyaromatiques dans l'eau de mer.....	72
Figure (4.7): Variation des hydrocarbures polyaromatiques dans le sédiment.....	72
Figure (4.8): Variation de la température dans le port de Sidi-Fredj.....	73
Figure (4.9): Variation de la Salinité dans le port de Sidi-Fredj.....	74
Figure (4.10): Variation du PH dans le port de Sidi-Fredj.....	74
Figure (4.11): Variation de l'oxygène dissous dans le port de Sidi-Fredj.....	75
Figure (4.12): Variation de la matière en suspension dans le port de Sidi-Fredj.....	76

Figure (4.13): Variation des hydrocarbures polyaromatiques dans le port de Sidi-Fredj.....	76
Figure (4.14): Localisation des stations dans la baie de Bousmail.....	77
Figure (4.15): Variation de la température dans l'eau de mer de la baie de Bousmail.....	78
Figure (4.16) : Variation de la salinité dans l'eau de mer de la baie de Bousmail.....	79
Figure (4.17): Variation de PH dans l'eau de mer de la baie de Bousmail.....	80
Figure (4.18) : Variation de l'oxygène dissous dans l'eau de mer de la baie de Bousmail.....	80
Figure (4.19) : Variation de la matière en suspension dans l'eau de mer de la baie de Bousmail.....	81
Figure (4.20) : Variation de la matière organique dans l'eau de mer de la baie de Bousmail.....	82
Figure (4.21): Variation des hydrocarbures polyaromatiques dans l'eau de mer de la baie de Bousmail.....	83
Figure (4.22) : Variation des hydrocarbures polyaromatiques dans le sédiment de la baie de Bousmail.....	84
Figure (4.23) : Application des paramètres atmosphériques et coordonnées d'une station de prélèvement.....	86
Figure (4.24): Résultats des luminances simulées de la station sur les canaux satellites.....	86
Figure (4.25) : Variation de la luminance en fonction des différents satellites.....	90
Figure (4.26) : Modélisation linéaire de luminance de l'eau de mer d'El Djamila pour Spot (XS1 et XS3.....	90
Figure (4.27) : Modélisation linéaire de luminance de l'eau de mer d'El Djamila du canal TM1 et MSS4.....	91
Figure (4.28) : Variation de luminance de l'eau de mer de Bousmaïl pour le satellite Spot.....	91
Figure (4.29) : Variation de luminance de l'eau de mer de Bousmaïl pour le satellite Landsat.....	91
Figure (4.30) : Variation de luminance de l'eau de mer de Bousmaïl pour le satellite Landsat.....	92
Figure (4.31): Modélisation linéaire des différentes paramètres dans les eaux de mer de Bousmaïl pour le canal XS1 du satellite Spot.....	94
Figure (4.32): Modélisation linéaire des différentes paramètres dans les eaux de mer de Bousmaïl pour le canal XS2 et XS3 du satellite Spot.....	94
Figure (4.33) : Modélisation linéaire des différentes paramètres dans les eaux de mer de Bousmaïl pour le canal TM1 du satellite Landsat.....	94
Figure (4.34): Modélisation linéaire des différentes paramètres dans les eaux de mer de Bousmaïl pour le canal MSS4 du satellite Landsat.....	95
Figure (4.35): Modélisation linéaire des hydrocarbures polyaromatiques dans les eaux de mer de Bousmaïl pour le canal TM6 et MSS7 du satellite Landsat.....	95
Figure (4.36): Modélisation linéaire des différentes paramètres dans les eaux de mer d'El Djamila pour le canal XS1 du satellite Spot.....	95
Figure (4.37) : Modélisation linéaire des hydrocarbures polyaromatiques dans les eaux de mer d'El Djamila pour le canal TM1 et MSS4 du satellite Landsat.....	96
Figure (4.38): Modélisation non linéaire des hydrocarbures polyaromatiques et des MES dans les eaux de mer d'El-Djamila pour le canal XS1 du satellite Spot .....	97
Figure (4.39): Modélisation non linéaire de la matière organique dans les eaux de mer de Bousmaïl pour le canal MSS4 du satellite landsat .....	97
Figure (4.40) : Modélisation non linéaire de la matière organique dans les eaux de mer de Bousmail pour le canal TM1 et XS1.....	98

Figure (4.41): Modélisation non linéaire des hydrocarbures polycycliques dans les eaux de mer de Bousmaïl pour le canal MSS4 du satellite Spot .....	98
Figure (4.42): Modélisation non linéaire de la matière en suspension dans les eaux de mer d'El-Djamila pour le canal XS1 du satellite Spot.....	98
Figure (4.43): Modélisation non linéaire des hydrocarbures polycycliques dans les eaux de mer d'El-Djamila pour le canal TM1 du satellite Landsat.....	99
Figure (4.44): Image satellitaire brute de la baie de Bou-Ismaïl sur le canal LANDSAT-TM1.....	99
Figure (4.45) : Spatialisation des hydrocarbures polycycliques. Image Landsat TM1 de la baie de Bousmaïl transformée à partir de la relation $\text{Réf}(\text{TM1}) = -3\text{E}-10\text{HPA}^5 + 2\text{E}-08\text{HPA}^4 - 3\text{E}-07\text{HPA}^3 + 2\text{E}-06\text{HPA}^2 - 4\text{E}-06\text{HPA} + 0,1061$ .....	100
Figure (4.46) : Spatialisation de la matière en suspension. Image MSS4 de la baie de Bousmaïl transformée à partir de la relation $\text{Réf}(\text{XS1}) = 0,0015\text{MES}^2 - 0,2425\text{MES} + 9,9973$ .....	100
Figure (4.47) : Image SPOT brute de la baie d'El-Djamila.....	101
Figure (4.48) : Spatialisation des hydrocarbures polycycliques. Image Spot XS1 de la baie d'EL-Djamila transformée à partir de la relation $\text{Réf}(\text{XS1}) = -74,266.\text{HPA}^4 + 102,68.\text{HPA}^3 - 50,753.\text{HPA}^2 + 10,656.\text{HPA} - 0,7161$ .....	101
Figure (4.49) : Spatialisation de la matière en suspension. Image Spot XS1 de la baie de Bousmaïl transformée à partir de la relation $\text{Réf}(\text{XS1}) = 7\text{E}-05.\text{MES}^4 - 0,0223.\text{MES}^3 + 2,7658.\text{MES}^2 - 152,24.\text{MES} + 3142,2$ .....	102
Figure (4.50) : Image LANDSAT (MSS4) brute de la baie de Bou Ismaïl.....	102
Figure (4.51) : Spatialisation des hydrocarbures polycycliques. Image Landsat MSS4 de la baie de Bousmaïl transformée à partir de la relation $\text{Réf}(\text{MSS4}) = 2\text{E}-09.\text{HPA}^4 - 8\text{E}-08.\text{HPA}^3 + 9\text{E}-07.\text{HPA}^2 - 2\text{E}-06.\text{HPA} + 0,098$ .....	103
Figure (4.52): Résultats de la réflectance pour le canal XS1 du satellite Spot.....	104
Figure (4.53): Résultats de la réflectance pour le canal TM1 du satellite Landsat.....	104
Figure (4.54): Résultat de la réflectance pour le canal MSS4 du satellite Landsat.....	104
Figure (4.55): Résultats de la réflectance pour le canal XS1 du satellite Spot.....	106
Figure (4.56): Résultats de la réflectance pour le canal TM1 du satellite Landsat.....	106
Figure (4.57): Résultats de la réflectance pour le canal MSS4 du satellite Landsat.....	106
Figure (4.58): Base de données des paramètres de pollution et des réflectances pour tous les canaux étudiés des satellites Spot et Landsat.....	108

Tableau (1.1) : Effets à court et long terme d'une pollution par hydrocarbures sur les organismes et peuplements.....	21
Tableau (1.2) : Les principales fenêtres atmosphériques.....	31
Tableau (1.3) : Paramètres d'entrées pour l'application des luminances des stations.....	38
Tableau (2.1) : Les rejets d'eaux usées dans la wilaya de Tipaza.....	49
Tableau (3.1) : référence et utilisation des produits chimiques solide dans le traitement des hydrocarbures.....	53
Tableau (3.2) : références et utilisations des produits chimiques liquides dans le traitement des hydrocarbures.....	54
Tableau (3.3) : Concentrations des différents standards préparés à partir de la solution mère.....	62
Tableau (3.4) : Test de reproductibilité pour la lecture de la concentration d'un échantillon d'eau de mer.....	64
Tableau (3.5) : Test de reproductibilité sur la lecture de la concentration d'un échantillon de sédiment .....	64
Tableau (3.6) : Caractéristiques des bandes du satellite SPOT.....	66
Tableau (3.7) : caractéristiques des bandes du satellite LANDSAT (TM).....	67
Tableau (3.8) : caractéristiques des bandes du satellite LANDSAT (MSS).....	67
Tableau (4.1) : Résultats des paramètres mesurés au niveau de la baie d'El-Djamila.....	68
Tableau (4.2) : Paramètres mesurés au niveau du port de Sedi-Fredj.....	72
Tableau (4.3) : Résultats des paramètres physico-chimiques et des stations de prélèvement dans la baie De Bousmail.....	77
Tableau (4.4) : Comparaison entre les teneurs en HPA étudiés dans l'eau de mer de surface de la côte Algérienne.....	84
Tableau (4.5) : Valeurs de la luminance pour les trois canaux du satellite SPOT pour différent $\theta_v$ .....	87
Tableau (4.6) : Valeurs de la luminance pour les canaux du satellite LANDSAT (TM & MSS).....	87
Tableau (4.7): Variation de la luminance en fonction des canaux de satellites Spot et NOAA pour un $\theta_v = 10$ (Stations d'El Djamila).....	88
Tableau (4.8) : Variation de la luminance en fonction des canaux de satellite Landsat pour un $\theta_v = 10$ (Stations d'El Djamila).....	88
Tableau (4.9): Variation de la luminance en fonction des canaux de satellites Spot et NOAA pour un $\theta_v = 10$ (Stations de Bousmail) .....	89
Tableau (4.10): Variation de la luminance en fonction des canaux de satellite Landsat pour un $\theta_v = 10$ (Stations de Bousmail) .....	89

Tableau(4.11) : Relations de conversion en comptes numériques et en réflectances (application eau de mer).....92

Tableau(4.12) : Résultats des taux de liaison dans les eaux de mer de Bousmaïl, modélisation linéaire.....93

Tableau(4.13): Résultats des taux de liaison dans les eaux de mer de Bousmaïl, modélisation non linéaire.....97

## Liste des Acronymes

**C.O.I** : Commission Océanographique Intergouvernementale.

**Cpt** : Compte numérique.

**G** : l'Enthalpie libre.

**HAP** : Hydrocarbure Aromatique Polycyclique.

**L.E.M** : Laboratoire d'Etudes Maritimes.

**Lum** : Luminance.

**MES** : Matière en suspension.

**MO** : Matière organique.

**P** : Pression.

**PH** : Potentiel d'hydrogène.

**PSU** : practical salinity unit.

**Réf** : Réflectance.

**T** : Température.

**S.F.U.V** : Spectrofluorimétrie ultra-violet.

**St** : Stations.

# **Introduction**

La pollution peut être défini par l'introduction par l'homme, directement ou indirectement de substances ou d'énergie dans l'environnement marin qui peuvent entraîner des effets délétères, tels que dommages aux ressources biologiques, dangers pour la santé humaine, entraves aux activités maritimes, y compris la pêche, détérioration des qualités de l'eau de mer pour son utilisation, et réduction des possibilités dans le domaine des loisirs.

Le développement considérable de la pétrochimie, lié à la croissance des industries productrices de matières plastiques, de fibres et de caoutchoucs synthétiques, de détergents et de nombreux autres produits de la chimie organique requiert chaque année des quantités plus importantes de matières premières hydrocarbonées.

Les hydrocarbures représentent la plus importante source de pollution des eaux marines. Cette pollution résulte de plusieurs activités liées à l'extraction du pétrole, à son transport et en aval à l'utilisation de produits finis: carburants et lubrifiants.

Les hydrocarbures pétroliers qui arrivent dans l'environnement marin peuvent avoir quatre origines majeures: les sources géochimiques, l'extraction de pétrole, le transport et la consommation. La part des sources géochimiques dues à des fuites naturelles qui apparaissent au fond des océans s'élève à 47 %. Les 53 % restant se répartissent ainsi: 38 % proviennent des rejets suite à la consommation (exemple: rejets d'industries basées à terre et des grandes agglomérations urbaines), 12 % sont dus au transport et 3 % à la production pétrolière offshore. Il faut signaler aussi qu'une quantité non négligeable d'hydrocarbures peut provenir de l'activité de nombreux microorganismes et des plantes.

La pollution des eaux de mer par les hydrocarbures est devenue préoccupante, vu les effets néfastes causés sur l'environnement. La pollution par les hydrocarbures est le risque technologique le plus menaçant dans la région d'Alger. L'existence d'une zone industrielle particulièrement polluante est à l'origine d'un grand trafic maritime. Les images satellites sont alors les plus utilisées par les chercheurs pour déterminer ces polluants, car la largeur du champ de visée et de la gamme radiométrique des satellites s'étend du visible à l'infrarouge et jusqu'à l'image radar.

La surveillance et le suivi de la pollution des eaux marines des principales baies de la zone algéroise présentent l'objectif primordial de cette étude. La zone côtière algéroise constitue le réceptacle de plusieurs types de pollution. Ces eaux usées sont chargées de matières organiques, matières en suspension, détergents et des huiles lubrifiantes ; génèrent des pollutions organiques

et chimiques (Bertrand J.C., et Mille G., 1989). Une analyse spatio-temporelle de la pollution marine et des caractéristiques physico-chimiques de l'eau de mer a été effectuée lors de plusieurs campagnes océanographiques au niveau de la région d'étude (Froidefond et al.,1999 ; Bachari et al.,1998; Grimalt & Albaiges, 1988).

L'échantillonnage en différentes périodes et dans les profondeurs a concerné un ensemble de prélèvements d'eau de mer et de sédiments destinés à plusieurs mesures in situ et à divers paramètres d'analyse au laboratoire. L'ensemble des résultats est enregistré dans une base de données correspondante à chaque campagne océanographique afin d'être utilisée et traitée dans des modèles mathématiques et statistiques destinés à la gestion et la surveillance des eaux côtières (Bachari et al. ,2006; Houma ,2007; Arnaud et al.,2000).

Ce travail a pour objet l'évaluation du niveau de la pollution marine par la spatialisation des paramètres indicateurs de la pollution et les paramètres physico-chimiques. L'utilisation d'une base de données de paramètres analysés et d'autres mesurés, nous a permis d'obtenir des cartes de distribution des polluants et indicateurs de la pollution à la surface de l'eau de mer de la baie de Bousmail.

Dans ce travail, on s'est intéressé à combiner des informations requises par différents satellites pour caractériser la pollution des eaux de mer par les hydrocarbures. Les concentrations en hydrocarbures sont calculées par les méthodes d'analyses appropriées et les images optiques utilisées sont captées par les satellites *Landsat MSS, TM* et *SPOT*.

Une analyse corrélative entre les teneurs en hydrocarbures et les réflectances calculées par les images satellites nous offre la possibilité de transformer des images brutes en images traitées et combinées. Ces images délimitent et caractérisent les zones polluées par les hydrocarbures.

En effet, notre objectif consiste en la mise au point d'une méthodologie fondée sur la donnée satellitaire pour la localisation et la surveillance de l'évolution de la pollution par les hydrocarbures polyaromatiques. L'analyse nous montre que chaque capteur offre une information utile et que la combinaison entre ces différentes informations permet de proposer une procédure d'établissement de cartes qui peuvent s'interpréter en carte de pollution marine.

En s'inspirant des différentes approches développées et des caractéristiques des satellites SPOT et LANDSAT, nous avons essayé de mettre en évidence l'utilisation de la télédétection afin de trouver des relations entre les paramètres optiques et la concentration en hydrocarbures présente dans l'eau de mer.

# **Synthèse**

# **Bibliographique**

## I.1. La pollution par les hydrocarbures

### I.1.1. Définition des hydrocarbures

Les hydrocarbures sont des composés de chaînes moléculaires constituées d'atomes de carbone et d'hydrogène (C et H). Ils disposent donc de quatre liaisons obligatoires correspondant à quatre électrons. Un atome de carbone peut être relié à quatre atomes d'hydrogène ou à d'autres atomes de carbone, par des liaisons simples, doubles ou triples. Dans ces deux derniers cas, les chaînes carbonées peuvent être linéaires, ramifiées ou cycliques. En plus du carbone et de l'hydrogène, il existe d'autres éléments minoritaires qui sont des composants qui contiennent des atomes de soufre, d'azote et d'oxygène (Fattal P. 2008).

### I.1.2. Origine des hydrocarbures dans l'environnement marin

Les hydrocarbures sont présents dans l'environnement du fait de différents processus dont : la biosynthèse par des organismes vivants, les pertes à partir du transport ou de l'utilisation des carburants fossiles, la pyrolyse des matières organiques à haute température, la combustion des charbons et pétroles.

Donc ; les hydrocarbures dans l'environnement marin peuvent avoir trois origines principales:

- ✓ Les rejets industriels et urbains, sources d'hydrocarbures pétroliers ou pyrolytiques.
- ✓ Les végétaux aquatiques (phytoplancton, macrophytes) et organismes hétérotrophiques (zooplancton, bactério-plancton).
- ✓ Les végétaux supérieurs terrestres *via* la matière organique détritique des sols, résultant du drainage des bassins versants.

Notons que la première origine est anthropique, alors que les deux dernières sont biogéniques, donc issues de la biosynthèse récente.

#### A- Origine Anthropique :

Elles sont liées aux activités humaines, on estime qu'environ six millions de tonnes d'hydrocarbures sont annuellement déversés dans le milieu océanique (Lacaze, 1980).

Parmi ces sources on trouve :

- ✓ les fuites lors de forages offshore ;
- ✓ les naufrages des pétroliers ;
- ✓ la part due au transport maritime (chargement, déchargement, déballastage...) ;
- ✓ les accidents de navires pétroliers.
- ✓ les activités industrielles ;
- ✓ les rejets d'eaux chargées en hydrocarbures résiduels.

Les produits pétroliers sont introduits dans l'environnement marin sous forme de produits raffinés: carburants et huiles, leurs compositions dépendent de l'origine du pétrole et des opérations subies au cours du raffinage.

### ***A.1. Pollution par des pétroliers***

Ce type de pollution comprend en fait plusieurs types de rejets ou de mélanges d'hydrocarbures produits à bord des navires pétroliers au cours de leur opération de routine. On distingue les eaux de ballast, les résidus de lavage des citernes, les boues et les eaux de cale. Cette pollution se nomme « *slops* » (Fattal, 2008).

#### **A.1. 1. Déballastage**

Le déballastage est loin d'être négligeable et ces actes délibérés ont été pendant longtemps, la principale (notamment pour la période 1973-1981) cause des déversements d'hydrocarbures dans les mers et océans. Les eaux de ballast servent à alourdir les pétroliers qui rentrent chez eux, à vide, après qu'ils aient déchargé leur cargaison.

La convention **MARPOL 73/78** a limité le volume des rejets d'hydrocarbures des eaux de ballast et exigé qu'il y ait des installations à terre qui puissent recevoir ces eaux de ballast.

#### **A.1. 2. Lavage des citernes**

Les résidus de lavage sont produits par le nettoyage des parois des citernes avant un nouveau rechargement de cargaison. Ce nettoyage est effectué d'abord à l'eau de mer, puis il a été remplacé par un lavage au pétrole brut plus efficace (**COW « *Crude Oil Washing* »**). La convention **MARPOL 73/78** a d'ailleurs rendu obligatoire ce dernier lavage au pétrole brut.

#### **A.1. 3. Les boues**

Les boues sont issues des carburants utilisés pour les machines de pétroliers. Elles représentent à peu près 1 à 5 % du volume et elles doivent être séparées du carburant. Selon la convention **MARPOL 73/78**, ces boues ne peuvent être déversées en mer malgré qu'elles aient traitées à bord ou déchargées à terre dans des installations de traitement. Cette interdiction n'est pas toujours respectée et toutes les boulettes qui s'échouent régulièrement sur les plages sont dues aux rejets illicites de ces boues.

#### **A.1.4. Les eaux de cale**

Les eaux de cale proviennent de fuites de carburant ou de lubrifiant issues de la salle des machines, qui s'accumulent dans les cales des navires. Ces eaux de cale ne peuvent être aussi rejetées directement en mer (**MARPOL 73/78**).

### ***A.2. Pollution par tous types de navires***

Les pétroliers ne sont pas les seules responsables et les déversements de boues et d'eaux de cale peuvent être effectués par tous types de navires. On appelle ce type de pollution « *sludges* ». En l'an 2000, les pollutions dues aux non pétroliers ont pris le pas sur les autres types de déversements. Les résidus proviennent des cargos, des bateaux de pêche et d'agrément ou encore des navires de guerre qui déversent dans le milieu 280 000 tonnes annuelles de polluant (Fattal, 2008).

Les hydrocarbures polyaromatiques sont moins abondants que les alcanes, et ne représentent que 10 à 30 % des hydrocarbures totaux d'un brut pétrolier. Les composés alkylés sont, la plupart du temps, plus abondants que les molécules parentales dont ils dérivent. Certains cycles aromatiques peuvent être associés à des noyaux (cycle à 5 ou à 6 atomes de carbone) saturés (naphtéoaromatiques). (Neff, 1979).

Plusieurs travaux de recherche se sont intéressés à la distribution et l'abondance des hydrocarbures dans les environnements marins, ce qui permet d'évaluer les niveaux de pollution, d'estimer une éventuelle augmentation en concentration suite aux phénomènes de transport et aux activités industrielles et de prédire les effets des hydrocarbures anthropogéniques sur les processus physiques, chimiques et biologiques (Saliot, 1981).

### ***A.3 Rejets d'effluents domestiques***

Ce sont des eaux résiduaires véhiculées en mer directement sans épuration, et sont caractérisées par de très fortes teneurs en matière organique, germes fécaux (diversifiés), sels minéraux, détergents...etc. Les conséquences de cette pollution organique sont catastrophiques pour presque tous les organismes constituant les peuplements des milieux néritiques.(Kankou, 2004).

### ***A.4 Pollution d'origine industrielle***

Constituent la première grande source de pollution des eaux, résultantes de différentes industries, telles que : la production d'énergie, l'industrie chimique, métallurgique, électronique... et cela par l'utilisation des combustibles fossiles, des molécules minérales et organiques de synthèses (Ramade, 2000).

### ***A.5 Pollution agricole***

Elle résulte de l'utilisation de divers produits phytosanitaires, issus du lessivage des terres agricoles (phénomène d'eutrophisation), des résidus des élevages intensifs des animaux et des eaux d'abattoirs qui engendrent des pollutions chroniques et diffuses (Leroy, 1999).

## B- Les hydrocarbures biogènes

Représentent toutes les hydrocarbures biogéniques produits par les organismes marins, ainsi que ceux qui proviennent de suintements naturels à partir des fissures du plateau continental et les divers déversements continentaux (végétaux, feu de forêt...)

Ces sources sont la plus grande partie des hydrocarbures qui pénètrent dans la mer de manière relativement discrète, dispersés sur de vastes étendues par les fleuves et les rivières ou par voie atmosphériques (Lacaze, 1980).

Les organismes vivants bio-synthétisent des hydrocarbures aliphatiques, aromatiques et polyaromatiques condensés. Le développement des techniques analytiques (chromatographiques et spectroscopiques) a démontré la complexité de ces composés présents en faibles quantités dans les colonnes d'eau et les sédiments. En effet, la biosynthèse et les mécanismes de transformations (dissolution, évaporation, photo-oxydation, adsorption désorption sur des particules, transformations biologiques, ...) conduisent à un mélange de composés dont la spécificité dépend des organismes producteurs et des conditions physicochimiques du milieu. Ainsi, la stabilité de ces composés a fait d'eux des marqueurs biologiques et géochimiques d'une très grande valeur.

Les espèces phytoplanctoniques et les macro-algues synthétisent des *n*-alcane dont les longueurs de chaînes varient respectivement de *n*-C14 à *n*-C32 et de *n*-C20 à *n*-C30 (Saliot, 1981), avec un maximum à *n*-C15 ou *n*-C17 (Blumer et al. 1971; Gelpi et al., 1970; Youngblood et al., 1971). Une distribution des *n*-alcane sans prédominance paire / impaire a été observée chez les bactéries (C13 à C31) et les plantes inférieures terrestres (C15 à C23) avec un maximum dans la zone de C17 à C20 pour les bactéries (Han and Calvin, 1969; Oro et al., 1967). Cependant, les plantes supérieures synthétisent des *n*-alcane de haut poids moléculaire (C23 à C33) à prédominance impaire.

La biosynthèse directe de ces composés par des microorganismes ou des végétaux est un sujet controversé. En effet, à l'exception d'une faible contribution des algues, des bactéries et des plantes, les hydrocarbures polyaromatiques sont généralement considérés comme produits de pyrolyse des activités humaines et des phénomènes naturels (incendies de forêts, éruptions volcaniques) (Bouchez et al., 1996; Saliot, 1981).

### **I.1.3. Propriétés physiques des hydrocarbures**

L'étude des propriétés physiques des hydrocarbures permet de distinguer les différentes composées hydrocarbonurées des pétroles bruts ou raffinés.

#### **1.3.1 La densité**

Elle détermine la flottabilité des hydrocarbures. Les paraffiniques ont tendance à rester en surface par contre les naphthènes ou les asphaltènes qui sont plus lourds peuvent couler.

La plupart des pétroles déversés accidentellement ont des densités comprises entre 0,8 et 1 et par en voie de conséquence flottent. Dès que le poids moléculaire augmente (entre 1 et 1,25), le pétrole coule jusqu'à une profondeur où la densité des hydrocarbures est égale à celle de l'eau.

Outre le poids moléculaire, la modification et l'augmentation de la densité est en fonction de la température, l'évaporation ou de l'association avec d'autres particules (Fattal P. 2008)

#### **1.3.2 La viscosité**

La viscosité d'un fluide est due aux forces de frottement des molécules les unes contre les autres et elle dépend du pourcentage d'hydrocarbures légers. Elle traduit une mesure de la résistance à l'écoulement et s'exprime en centistokes (cSt – viscosité cinétique) pour une température donnée. Cette propriété régit la vitesse d'étalement d'une nappe d'hydrocarbure puis le degré de pénétration dans les sédiments lorsqu'elle arrive à la côte. En effet, plus un hydrocarbure est visqueux, moins il pénètre le sédiment (Fattal P. 2008).

La viscosité diminue lorsque la température augmente et elle s'accroît par évaporation des composés volatils, par l'oxydation photochimique et surtout par formation d'émulsions inverses qui modifient le comportement initial du produit. (Fattal P. 2008)

#### **1.3.3 Le point d'écoulement**

Le point d'écoulement est la plus basse température à laquelle le pétrole continue de couler. La majorité des hydrocarbures a un point d'écoulement inférieur à 0 °C. En dessous de ce seuil de température, l'hydrocarbure se fige.

Il est lié corrélativement à la teneur en alcanes et plus le pourcentage en paraffine augmente, plus la température du point d'écoulement augmente. Dans le cas de pollution marine, ce point d'écoulement est un facteur important, tant à la côte qu'en mer, car selon l'exposition, la température ou les saisons, il peut varier. (Fattal P. 2008)

#### **1.3.4 Le point éclair**

Le point éclair est la plus basse température à laquelle les fractions d'hydrocarbures s'enflamment lorsqu'elles sont soumises à une étincelle. Certaines essences ont des points d'éclair à -40 °C alors que le mazout, que l'on trouve dans une chaudière, a un point d'éclair aux alentours de 55 °C.

### 1.3.5 Le point d'ébullition

Chaque fraction d'hydrocarbures a une température d'évaporation. Les fractions légères s'évaporent à des températures basses et inférieures à 20 °C. Avec l'évaporation, les hydrocarbures restant deviennent plus visqueux et plus denses.

### 1.3.6 La tension superficielle

La tension superficielle dépend de la température et permet de mieux appréhender la vitesse d'étalement des nappes d'hydrocarbures. Plus la température augmente, plus la tension superficielle diminue et plus la vitesse d'étalement est importante. Dans ce cas, de vastes surfaces sont touchées par l'étalement. (Fattal P. 2008)

### 1.3.7 Le coefficient de partage

C'est le rapport entre la composition d'un composé  $i$ , en phase vapeur ( $y_i$ ) et en phase liquide ( $x_i$ ) ce rapport est appelé le coefficient de partage ( $K_i = \frac{y_i}{x_i}$ ), il est fonction de la température et de la pression, et nous renseigne sur la volatilité du composé  $i$ .

### 1.3.8 La volatilité relative

La volatilité relative est le rapport du coefficient de partage entre deux composés, ( $\alpha_{ij} = \frac{K_i}{K_j}$ ) Ce paramètre régit la séparation des différents composés au sein des colonnes à distiller.

### 1.3.9 Limite de solubilité

Deux corps peuvent être miscibles en toutes proportions ou avoir une solubilité limitée. Quand on fait le mélange à  $p$  et  $T$  données, c'est la valeur minimale de l'enthalpie libre  $G$  qui va nous donner l'état le plus stable.

## I.1.4. Classification des hydrocarbures

### 1.4.A. Les hydrocarbures aliphatiques : (les paraffines, les oléfines, les acétyléniques)

Ce sont des molécules à chaîne ouverte comprenant :

#### 1.4.A.1. Les paraffines (les Alcanes)

Constituent une série d'hydrocarbures saturés allant du méthane ( $\text{CH}_4$ ) à des composés à soixante atomes de carbone ( $\text{C}_{60}$ ). Ils peuvent être à chaîne droite (n-alcanes) ou ramifiée (iso-alcanes). Ils représentent environ 30% du poids du brut et possèdent deux caractéristiques importantes (Michel, 1983) :

- Absence presque totale de toxicité, à l'exception des plus légers entre eux.
- Biodégradabilité rapide, en particulier de n-alcanes.

Les alcanes acycliques sont également nommés hydrocarbures saturés acycliques. Leur formule brute est de la forme  $\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$ .

Les alcanes existent dans les gaz naturels ou dans le pétrole. Il faut mentionner la formation de gaz de type alcane dans les mines de charbon.

### Propriétés Physiques et Spectroscopiques

Le méthane, l'éthane, le propane et le butane sont gazeux. À partir du pentane, les alcanes sont liquides. Pour les termes les plus élevés, on a des huiles appelées huile de vaseline. À partir de 16 atomes de carbone les alcanes sont des solides qui constituent la paraffine.

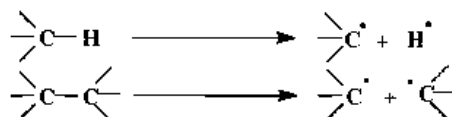
Les alcanes sont des molécules très peu polaires et insolubles dans l'eau (on dira qu'un alcane est hydrophobe). Les molécules solubles dans les alcanes sont dites lipophiles. Les faibles interactions moléculaires impliquent de faibles valeurs de la densité (0,85 au maximum).

Les bandes d'absorption caractéristiques des alcanes en spectroscopie infrarouge correspondent aux vibrations de valence des liaisons C–H se situent entre 2850 et 3000  $\text{cm}^{-1}$ . (Krausz P et al., 2008).

### Propriétés Chimiques

Les liaisons dans les alcanes sont très peu polaires car il y a une très faible différence d'électronégativité entre le carbone et l'hydrogène.

Les alcanes sont donc très stables (à l'exception des petits cycles) et, étant donné la faible polarité des liaisons, les ruptures seront principalement homolytiques avec formation de radicaux :



#### 1.4.A.2 Les oléfines (Alcènes):

A chaîne droite ou ramifiée, ce sont des composés insaturés, généralement absents des pétroles bruts, mais présents dans les produits raffinés. Ils sont relativement instables et s'oxydent facilement. Ils sont également appelés alcènes.

Les deux atomes de carbone sont hybridés  $\text{sp}^2$ , la liaison carbone-carbone  $\sigma$  est formée par combinaison de deux orbitales hybridées  $\text{sp}^2$ , la liaison  $\pi$  de plus haute énergie est formée par le recouvrement de deux orbitales 2p, cette dernière favorisera les réactions d'addition.

La double liaison confère à la molécule un centre riche en électrons d'où la nucléophilie des alcènes. Quant à l'hybridation  $\text{sp}^2$  des carbones, elle confère une planéité à la molécule, avec possibilité d'isomérisation Z et E.

### Propriétés Physiques Et Spectroscopiques

Les températures d'ébullition des alcènes linéaires sont de 4 à 6  $^{\circ}\text{C}$  inférieures à celles des alcanes correspondants. Les spectres infrarouges des alcènes terminaux présentent une bande ( $\nu_{\text{C}=\text{C}}$ )

autour de  $1\ 640\text{ cm}^{-1}$ . En RMN, le proton lié au carbone  $\text{sp}^2$  de l'alcène donne un signal autour de 5 ppm. (Krausz P et al., 2008).

#### 1.4.A.3. Les acétyléniques (les Alcynes)

Les alcynes, appelés également acétyléniques, sont des composés qui présentent des liaisons triples carbone-carbone. La structure des alcynes est linéaire, les deux carbones portant la triple liaison sont hybridés  $\text{sp}$ .

En raison de quelques différences de propriétés chimiques, on distingue les alcynes vrais, qui présentent un hydrogène sur l'un des carbones acétyléniques ( $\text{R}-\text{C}\equiv\text{C}-\text{H}$ ), et les alcynes substitués, qui présentent un groupement alkyle sur chacun des carbones  $\text{sp}$  ( $\text{R}-\text{C}\equiv\text{C}-\text{R}$ ).

#### Propriétés Physiques Et Spectroscopiques

Les températures d'ébullition, de fusion et la densité des alcynes sont en général plus élevées que celles des alcanes et alcènes correspondants. Les spectres infrarouges des alcynes présentent une faible bande ( $\text{C}\equiv\text{C}$ ) à  $2\ 100\text{ cm}^{-1}$ .

#### Propriétés Chimiques Communes à tous les alcynes

Les alcynes sont beaucoup moins stables que les alcènes, ils se comportent comme des composés insaturés possédant deux liaisons  $\pi$  entre les deux mêmes carbones.

Il y aura donc, comme pour les alcènes, des réactions d'addition qui pourront dans ce cas se produire deux fois. Par ailleurs, quoique plus difficiles qu'avec les dérivés éthyléniques, les oxydations demeurent possibles. (Krausz P et al., 2008).

#### 1.4.B. Les hydrocarbures naphténiques

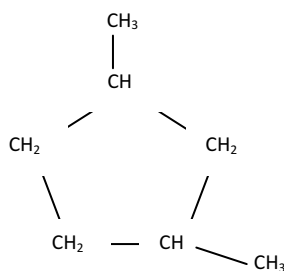
Cette famille peut représenter en moyenne 40 à 50 % des composés des pétroles bruts (Marchand et Kantin, 1995 in Fattal, 2008).

Ce sont des hydrocarbures saturés renfermant des formes monocycliques en  $\text{C}_5$  (cyclopentane) et en  $\text{C}_6$  (cyclohexane). Ils sont en générale peu toxique, mais plus rémanents que les aliphatiques et moins que les composés aromatiques. Certains produits (stéranes, hopanes) sont parfois utilisés comme témoins de contamination pétrolière.

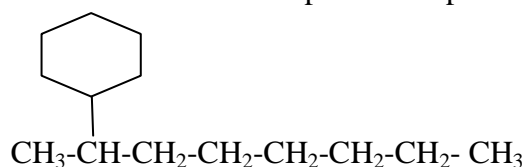
#### Nomenclature

Les cyclanes sont désignés par le nom de l'alcane correspondant précédé du préfixe cyclo (cyclopropane ; cyclobutane ; etc.). Les carbones peuvent être liés à des chaines alkyles (méthylcyclohexane). Lorsqu'il existe plus d'un substituant sur le cycle ; on numérote les atomes de carbone du cycle de façon à donner aux substituants le chiffre le plus bas.

Par exemple le composé suivant est le diméthyl-1,3 (et non le diméthyl-1,4) cyclopentane :



Lorsque l'importance de la chaîne latérale l'emporte sur celle du cycle, on considère le cycle comme un substituant de la chaîne. Par exemple le composé :



Est le cyclohexyl-2 octane et non l'octylcyclohexane.

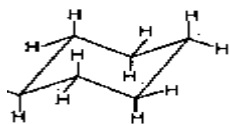
### Stabilité des cyclanes

Sachant que l'angle des liaisons d'un carbone saturé hybridé  $sp_3$  est de  $109^{\circ}28'$ , si les cycles sont plans, on doit attendre à ce que seul le cyclopentane, dont les angles sont de  $108^{\circ}$ , ait une existence réelle, le cyclopropane, avec des angles de  $60^{\circ}$ , le cyclobutane (angle de  $90^{\circ}$ ) et le cyclohexane (angle de  $120^{\circ}$ ), les cycles à sept atomes de carbone et plus, ne devraient pas exister ou être très instables en raison des tensions plus ou moins importantes imposées à la molécules.

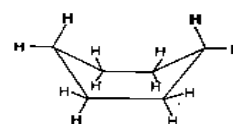
C'était la théorie émise par Baeyer en 1885, avant que les chimistes parviennent à synthétiser tous cycles de 3 à 8 carbones et même au-delà.

En fait, le cyclohexane est aussi stable que le cyclopentane et l'un et l'autre sont importants dans la chimie du pétrole.

Le cyclohexane peut exister car sa molécule n'est pas plane. Il existe deux conformations du cyclohexane, la forme chaise et la forme bateau :



La forme chaise



la forme bateau

**Figure 1.1** : Les deux conformations du cyclohexane

Ces deux formes assurent aux liaisons C-C des angles de valence normaux de  $109^{\circ}$ . Il est impossible de séparer ces deux conformations de la même molécule qui convertissent rapidement

l'une dans l'autre. Cependant, la forme chaise est beaucoup plus stable que la forme bateau et constitue de 99% du mélange à l'équilibre. L'instabilité de la forme bateau est due à l'interaction des atomes d'hydrogène indiqués en caractère gras dans le schéma de la figure 1.1 (les atomes d'hydrogène sont en fait beaucoup plus près l'un de l'autre dans la réalité).

Dans la forme chaise de cyclohexane, on distingue deux types distincts d'hydrogène. Ceux qui émergent droit en haut ou en bas par rapport au cycle (hydrogène axiaux). Ceux qui se trouvent pratiquement dans un plan "moyen" du cycle (hydrogènes équatoriaux). Lorsque les hydrogènes sont substitués, on distingue les groupements axiaux des groupements équatoriaux. Les positions équatoriales étant celles qui offrent le plus de place aux groupements encombrants, ces positions sont le plus souvent occupées lorsque cela est possible. Dans un cas simple comme celui du méthylcyclohexane par exemple, la conformation privilégiée est celle où le groupement méthyle est en position équatoriale, mais cette conformation de la molécule est en équilibre avec celle où le groupe méthyle est axial. Le processus de passage d'une forme chaise à l'autre avec passage du méthyle axial au méthyle équatorial est l'inversion du cycle.

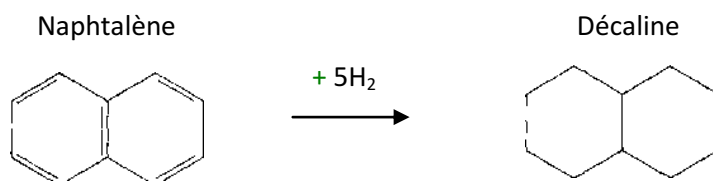
Etant donné l'importance des cycles saturés dans les molécules de la chimie biologique, l'étude de la conformation de ces cycles y revêt une grande importance. Le raffinage du pétrole et de la pétrochimie font par contre peu appel à ces notions que nous ne développerons pas ici.

Dans le cas du cyclopentane, la molécule pourrait être plane sans forte tension puisque les angles internes d'un pentagone régulier sont de  $108^\circ$ . En réalité, pour éviter des interactions entre ses atomes d'hydrogène, la molécule est pliée et grâce à la mobilité des liaisons, cette déformation se propage rapidement et perpétuellement autour du cycle.

Dans le cas du cyclobutane et du cyclopropane, bien que ces molécules aient pu être synthétisées, les inévitables tensions dans leur cycle en font des molécules instables. C'est ainsi que le cyclopropane réagit chimiquement comme le composé à molécule acyclique qui lui correspond : le propylène.

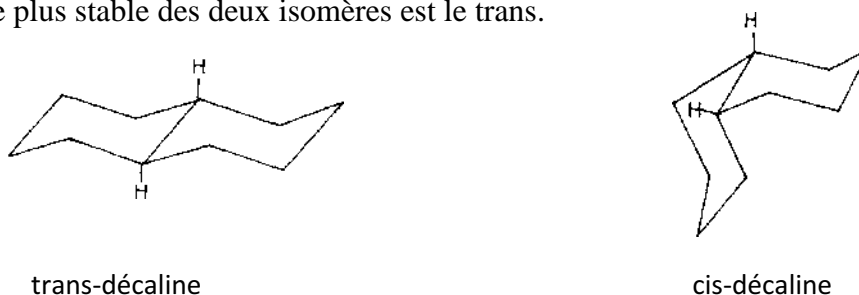
Les deux cyclanes les plus importants dans la chimie du pétrole sont le cyclopentane et le cyclohexane. Ce dernier est le produit de base de la synthèse du nylon. On peut dire que les cyclanes à trois, quatre et plus de six atomes de carbone n'interviennent pas en pétrochimie.

Parmi les cyclanes polycycliques, il faut mentionner la décaline, produit d'hydrogénation du naphthalène et qui est utilisée comme solvant.



Les deux chaînes unies pour former ce composé bicyclique forment deux cycles accolés a conformation chaise. En fait, il existe deux possibilités de joindre deux cycles "chaise". Dans la première, les hydrogènes fixés sur les deux carbones communs aux deux cycles sont du même côté de la molécule (cis-décaline) ; dans la seconde, ces hydrogènes sont de part et d'autre de la molécule (trans-décaline).

Il est possible d'isoler la cis ou la trans-décaline du mélange commercial de ces deux isomères. Le plus stable des deux isomères est le trans.



#### 1.4.C. Les hydrocarbures aromatiques polycycliques

Les hydrocarbures polyaromatiques comprennent des composés qui sont insaturés dont la molécule contient de 1 à 6 cycles benzéniques. Un cycle benzénique est constitué par six atomes de carbone, chacun relié à l'un de ses voisins par une double liaison et un atome d'hydrogène ( $C_6H_6$ ). Les hydrocarbures polyaromatiques de base sont le benzène (un cycle aromatique), le naphtalène (deux cycles), l'anthracène (trois cycles), le chrysène et le pyrène (quatre cycles).

Les hydrocarbures polyaromatiques ou polycycliques (HAP) forment généralement 40 % (entre 15 et 40 %) des pétroles bruts. Ils ont un impact sur la faune et la flore, car ils sont toxiques et persistants. Un des HAP les plus dangereux est le benzo(a)pyrène qui est peu soluble et qui surtout se bio-accumule fortement ([Fattal P. 2008](#)).

Les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) sont des composés organiques neutres apolaires, constitués d'au moins deux cycles aromatiques fusionnés par des arrangements linéaires, angulaires ou en coin.

Au sens strict, ils ne contiennent que des atomes de carbone et d'hydrogène. Cependant, certains composés aromatiques contenant du soufre, de l'azote ou de l'oxygène, leur sont parfois associés ([INERIS, 2005](#)).

Ils sont considérés comme étant les plus toxiques. Leur niveau de présences dans les bruts se situe généralement entre 20 et 40%. Certains composés à plusieurs noyaux aromatiques tels que le benzo-3,4 pyrène et le benzo(a)pyrène sont doués d'une grande stabilité et sont connus comme mutagènes et cancérigènes (Lacaze,1980).

Les hydrocarbures polyaromatiques présents dans l'environnement résultent de différents processus dont : la biosynthèse par des organismes vivants, les pertes à partir du transport ou de l'utilisation des carburants fossiles, la pyrolyse des matières organiques à haute température, la combustion des charbons et pétroles. Ce dernier processus constitue la principale voie d'introduction des hydrocarbures polyaromatiques dans l'environnement et résulte majoritairement des actions anthropiques.

En raison de leur caractère lipophile, les hydrocarbures polyaromatiques sont concentrés dans les sédiments et les organismes vivants, ils constituent un important composant chimique qui peut être absorbé par les poissons en cas de pollution pétrolière, mais ces substances subissent dans le poisson une dégradation biologique très rapide.

Les crustacés sont des organismes sédentaires, qui sont plus sensibles à la pollution par les hydrocarbures polyaromatiques vu le risque d'accumulation. Les moules sont les plus sensibles à la contamination par les hydrocarbures polyaromatiques vu leur grande capacité de filtration. La toxicité aiguë varie dans de très grandes proportions, mais c'est surtout les effets cancérigènes et mutagènes qui présentent les risques éco-toxicologiques les plus importants.

### **Propriétés Physiques et Spectroscopiques**

Les hydrocarbures benzéniques possèdent une odeur assez caractéristique, parfois agréable. Ils sont souvent très toxiques, parfois cancérigènes. Ils sont moins denses que l'eau et y sont extrêmement peu solubles.

La plupart des hydrocarbures polyaromatiques sont peu volatils, très peu solubles dans l'eau. Ces substances sont stables (hydrolyse négligeable) mais leur biodégradabilité varie fortement selon les conditions du milieu (INERIS, 2005).

Etant hydrophobes, liposolubles, les hydrocarbures polyaromatiques ont tendance à s'adsorber sur les matrices solides et notamment les matières organiques (Chefetz, 2000 ; Accardi-Dey, 2002 ; Zhou, 2004).

### **Propriétés spectroscopiques**

Les hydrocarbures benzéniques absorbent fortement dans le domaine de l'UV-visible ( $\lambda$  compris entre 200 et 300 nm). En IR ils présentent des bandes d'absorption intenses vers  $3030\text{ cm}^{-1}$  ( $\nu_{\text{CH}}$ ) et de nombreux signaux entre  $1\ 500$  et  $1\ 600\text{ cm}^{-1}$  ( $\nu_{\text{C=C}}$ ). Enfin en RMN du proton le déplacement chimique des hydrogènes aromatiques se situe entre 6,5 et 8 ppm. (Krausz P *et al.*, 2008).

## Propriétés chimiques

Les hydrocarbures polyaromatiques peuvent être classés en trois groupes basés sur le nombre de cycles aromatiques qu'ils contiennent et leurs masses molaires moléculaires :

- hydrocarbures polyaromatiques de faibles masses molaires moléculaires (de l'ordre de 152-178 g/mol, soit 2 à 3 cycles) : naphthalène, acénaphthylène, acénaphthène, fluorène, anthracène et phénanthrène – *solubilité et volatilité la plus élevée*,
- hydrocarbures polyaromatiques de masses molaires moléculaires intermédiaires (de l'ordre de 202 g/mol, 4 cycles) : fluoranthène, pyrène,
- hydrocarbures polyaromatiques à masses molaires moléculaires élevées (de l'ordre de 228-278 g/mol, soit 4 à 6 cycles) : benzo(a)anthracène, chrysène, benzo(a)pyrène, benzo(b)fluoranthène, dibenzo(ah)anthracène, benzo(k)fluoranthène, benzo(ghi)pérylène, indéno(1,2,3, cd)pyrène – *sorption la plus forte*.

### A- Les asphaltènes

Les asphaltènes sont des composés stables de très haut poids moléculaire, qui en plus des atomes de carbone et d'hydrogène contiennent des hétéroatomes d'azote, de soufre ou d'oxygène, ainsi que d'autres composants à l'état de trace tels que le nickel et le vanadium (Marchand, 1998 in Fattal, 2008).

En matière de pollution marine, la concentration en asphaltènes détermine les propriétés chimiques du pétrole en influant directement sur la viscosité, l'adhérence ou la mise en émulsion (Fattal, 2008).

Ils sont insolubles dans le pentane ou l'hexane. La structure de ces composés est mal connue du fait, d'une part de leur composition chimique complexe (à base de cycles aromatiques condensés, de naphthéo-aromatiques, de ramifications et d'hétéroatomes (O, N, S), d'autre part de méthodes analytiques difficilement utilisables.

### B- Les résines

Les résines sont des composés à poids moléculaire élevé, sont constituées de molécules hétérocycliques qui confèrent au pétrole un caractère légèrement tensioactif ; ils entrent pour 5 à 25 % dans la construction des pétroles bruts (Marchand et Kantin, 1997).

## I.1.5. Comportement des hydrocarbures en mer

Du fait de la très faible solubilité des hydrocarbures dans l'eau et de leur densité qui est légèrement inférieure à l'unité, les hydrocarbures rejetés dans les océans s'étalent à la surface avant de subir une série de modifications suite à l'action de facteurs abiotiques et biologiques. L'action simultanée de ces différents facteurs aboutira à l'élimination de cette pollution (Bertrand et Mille,

1989; U.S. Congress, Office of Technology Assessment, 1991). Les facteurs environnementaux sont:

### 1.5.1 L'étalement

Le pétrole a tendance à s'étaler horizontalement sous l'action conjuguée des forces de gravité, de viscosité et de tension superficielle, ainsi, les hydrocarbures répandus sur l'eau forment une fine couche à l'aspect de lentille avec l'intérieur plus épais que les bords. Ce processus peut se poursuivre jusqu'à l'obtention d'une couche mono-moléculaire de  $0.5\mu\text{m}$  d'épaisseur, donnant des reflets argentés en surface.

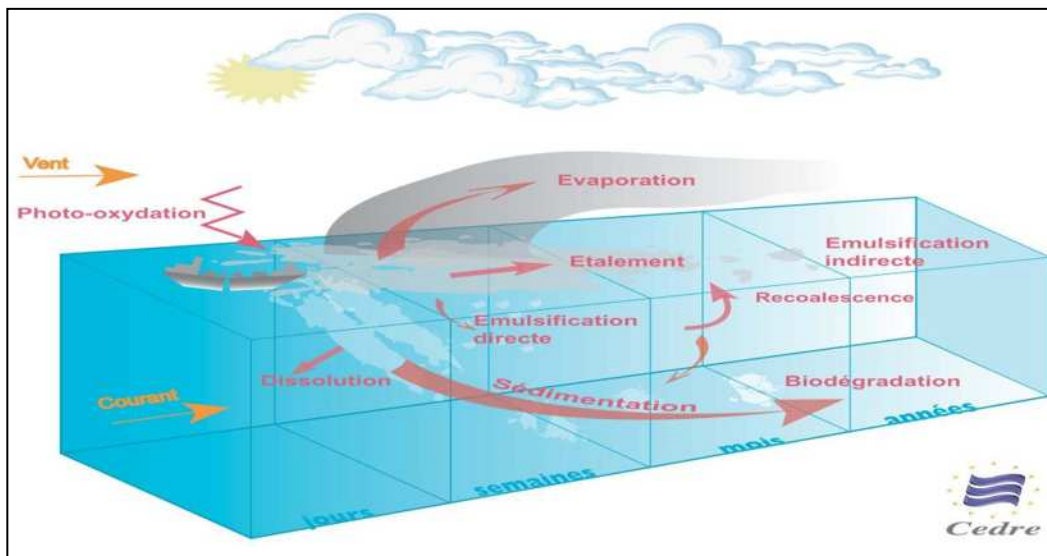


Figure 1.2 : Comportement des hydrocarbures en mer

### 1.5.2 L'évaporation

Ce processus survient dans les premières heures de déversement, Il touche les fractions de faible poids moléculaire et dépend des conditions atmosphériques. Les hydrocarbures les plus légers, ayant de 4 à 12 atomes de carbone ( $T_{eb} < 270\text{ °C}$ ) et qui représentent généralement près de 50 % des hydrocarbures totaux d'un brut moyen, sont éliminés rapidement dès les premiers jours, ce qui va diminuer ainsi la toxicité du pétrole. Il a également pour conséquence la modification de la viscosité du pétrole qui influence les actions de lutte antipollution.

Les éléments qui conditionnent l'intensité de l'évaporation sont :

- La composition initiale du mélange
- L'épaisseur de la nappe
- L'étendue de nappe
- L'environnement climatique (température, vent, vague) au moment du déversement.

### 1.5.3 Solubilisation

La solubilité des hydrocarbures dans l'eau de mer est très faible. Un hydrocarbure est d'autant plus soluble que sa masse moléculaire est faible et que sa polarité est élevée. Il est important de noter que ces hydrocarbures solubles sont parmi les plus dangereux pour l'environnement, ils sont difficiles à éliminer et sont adsorbés par la faune et la flore.

### 1.5.4 Emulsification

Ce terme regroupe deux processus inverses :

➤ Émulsion huile dans l'eau ou dispersion du pétrole dans la colonne d'eau. Ce phénomène est intense dans les milieux de grandes énergies (vagues). Il permet de réduire la pollution en surface. Ces émulsions, fine gouttelettes de pétrole dispersées dans l'eau, théoriquement instables, peuvent être retrouvées à de grandes profondeurs (-80m).

➤ Émulsion eau dans l'huile : on les appelle également « émulsions inverses » ou « mousse au chocolat » à cause de leur aspect. Ce phénomène qui tend à stabiliser la nappe, perturbe l'ensemble des actions de lutte (confinement, dispersion, et récupération). Les émulsions inverses peuvent se former en quelques heures et contenir jusqu'à 90% d'eau. Ces émulsions qui sont constituées par des hydrocarbures de haut poids moléculaires et difficilement dégradables sont les précurseurs des résidus goudronneux retrouvés sur les plages.

### 1.5.5 Sédimentation

Phénomène majeur qui règle à moyen et long terme d'une grande partie des hydrocarbures rémanents et qui affecte des zones biologiquement riches, la sédimentation est liée au vieillissement du pétrole, résultat des processus d'évaporation et d'émulsification qui, en augmentant la densité des hydrocarbures, favorisent leur migration vers le fond. Elle est également le fait de l'adsorption des hydrocarbures sur les particules fines ( $<100\mu\text{m}$ ). Ces particules, sous l'action des courants sont transportées vers des zones d'accumulation de vases ou de sables-vaseux qui constituent des pièges naturels pour les hydrocarbures. Ce sont les plus souvent des zones à basse énergies (les fonds et les baies). La sédimentation conduit à la constitution d'agrégats de haute densité difficilement dégradable par voie naturelle.

### 1.5.6 Oxydation

Le terme d'oxydation décrit la combinaison chimique des hydrocarbures avec l'oxygène. Ce phénomène est accéléré par les radiations UV du soleil (photo-oxydation) et participe au vieillissement du pétrole. Il peut également avoir des conséquences contraires sur l'évolution de la pollution :

- Les hydrocarbures légers sont généralement plus soluble, donc plus dispersables et par conséquent biodégradables.
- sur les hydrocarbures lourds, la photo-oxydation favorise la polymérisation, processus défavorable au traitement et à la dégradation des hydrocarbures

L'efficacité de la photo-oxydation dépend de la nature des hydrocarbures et de la présence de composés non hydrocarbonés. Ainsi, la photo-oxydation touche plus particulièrement les composés aromatiques qui sont plus photosensibles que les composés aliphatiques. Parmi ces derniers, les composés ramifiés sont plus facilement photo-oxydés que les *n*-alcanes.

La photo-oxydation conduit à la formation de composés solubles dans l'eau (acides, alcools, cétones, peroxydes et sulfoxides) et certains travaux de recherche ont montré leur toxicité pour les communautés microbiennes (Payne and Phillips, 1985; Larson et al. 1979 ; Maki et al., 2001) alors que Rontani et al. (1987, 1992), ont montré l'existence d'interactions entre la photo-oxydation et la biodégradation pour l'élimination des alkylbenzènes et de l'anthracène. L'action simultanée de ces deux phénomènes permet une élimination plus rapide de ces deux familles de composés.

### 1.5.7 Biodégradation

Processus important dans l'élimination des hydrocarbures en mer, réalisé par les bactéries marines, les champignons et les levures. Le taux de dégradation dépend de la température, de la disponibilité de l'oxygène, du type de pétrole et de la présence d'éléments nutritifs, il est également lié au taux de dispersion des hydrocarbures.

La biodégradation est inégale selon la famille des hydrocarbures considérée. Les hydrocarbures saturés, en particulier les *n*-alcanes sont plus facilement biodégradés, alors que certains composés aromatiques peuvent persister plusieurs années dans le milieu.

### 1.1.6. Impact environnemental des hydrocarbures

Plusieurs facteurs déterminent l'importance d'une pollution par les hydrocarbures sur les biocénoses qui sont :

- ✓ les types d'habitats ;
- ✓ le type et la quantité d'hydrocarbures ;
- ✓ la période du déversement (saison et stade d'évolution des espèces) ;
- ✓ les conditions hydrométéorologiques ;
- ✓ le climat ;
- ✓ la fréquence et la durée d'exposition aux hydrocarbures ;
- ✓ l'efficacité des mesures d'intervention.

Le pétrole déversé dans la mer a de nombreux impacts sur l'environnement, parmi ces derniers

### **1.6.1. Impacts sur les communautés vivantes de la colonne d'eau**

Lorsqu'une pollution survient, les hydrocarbures s'évaporent, se dispersent et se dissolvent. Ces deux derniers processus sont ceux qui affectent la colonne d'eau. Plus la hauteur d'eau est faible, plus les risques qui pèsent sur les communautés sont importants, car il y a une grande concentration.

### **1.6.2. Impacts sur le phytoplancton**

Les nappes commencent par réduire la photosynthèse et donc la croissance. Par contre, en faible quantité et selon certains types d'hydrocarbures, l'effet peut être stimulant (Hsiao, 1978 in Fattal, 2008).

Les premiers effets d'un déversement par hydrocarbures sont le piégeage et engluement des organismes situés dans les premiers centimètres d'eau par les nappes. Les organismes concernés par cet impact sont les œufs, les larves de poisson et le plancton temporaire (Fattal P. 2008).

L'engluement et la toxicité provoquent des mortalités qui dépendent de la sensibilité des espèces et de leur stade de développement. Les organismes pélagiques adultes n'ont été que peu touchés par la pollution (Fattal P. 2008).

### **1.6.3. Impacts sur les bactéries**

Certaines espèces peuvent proliférer à la faveur d'autres, inhibées par la présence des hydrocarbures. Celles qui se développent sont les bactéries qui puisent dans les hydrocarbures le carbone et l'énergie. Dans quelque cas les bactéries comme *Flavobacterium* ou *Vibrio alginoliticus* ont des capacités de dégradation du polluant (Fattal P. 2008).

### **1.6.4. Impacts sur le zooplancton**

L'impact sur la communauté zooplanctonique est moins évident car il est difficile de distinguer des phénomènes anormaux d'une variabilité naturelle qui est liée aux conditions écologiques comme le brassage ou la saisonnalité. Toutefois, une marée noire entraîne inévitablement des effets. Par exemple, un an après la catastrophe de l'Amaco Cadiz et malgré le fort taux de renouvellement du zooplancton, celui-ci a continué à connaître des perturbations dans les zones côtières (Fattal P. 2008).

### **1.6.5. Impacts sur le milieu benthique**

#### ***A. Impacts sur le phytobenthos***

Les algues benthiques ont une faible sensibilité aux hydrocarbures. Les effets à court terme, spectaculaire, se traduisent par l'engluement ou la brûlure des tissus dans le cas d'un contact direct avec le pétrole. Les conséquences économiques sont alors importantes pour les espèces exploitées.

Les effets à long terme sont peu importants, en générale, une bonne restauration des champs d'algues est constatée quelques temps après la disparition de la perturbation ([Bodenec et al, 1983 in Sallali, 1996](#))

### ***B. Impacts sur le zoobenthos***

Cet écosystème est le plus fragile. Le pétrole peut détruire rapidement les organismes benthiques par immobilisation, asphyxie, intoxication et narcose. Les espèces sessiles sont les plus sensibles que les espèces douées d'une relative mobilité.

En raison de piégeage des hydrocarbures dans les sédiments, les mortalités sont plus fortes pour la macrofaune des substrats meubles que pour celle des milieux rocheux. A plus long terme, les mortalités sont probables mais difficile à évaluer. Tout fois une pollution des peuplements macrobenthiques, due à l'inégale vulnérabilité spécifique, se traduit par l'apparition d'espèces opportunistes et indicatrices de pollution.

En fin, les effets des hydrocarbures sur ce maillon trophique sont encore très peu connus ([Bodenec et al, 1983 in Sallali, 1996](#))

## **1.6.6. Impacts sur les oiseaux et les mammifères**

### ***A. Les oiseaux***

Les oiseaux comptent parmi les êtres les plus sensibles au contact avec le pétrole. Les plumes de l'oiseau absorbent facilement cette substance. Lorsque cette situation survient, l'isolation au froid, l'imperméabilité et la flottabilité de l'oiseau diminuent. Il suffit d'une goutte de pétrole de très petite taille sur ses plumes pour neutraliser les propriétés isolantes et imperméables de son plumage. Une telle goutte a le même effet qu'un trou minuscule dans la combinaison étanche d'un plongeur; le corps de l'oiseau, qui est à 40 °C, est rapidement refroidi par l'eau, qui est à peine au dessus de 0 °C. L'oiseau se fait aussi empoisonner par le pétrole lorsqu'il se lave, ce qui le porte inévitablement à mourir d'hypothermie, d'empoisonnement ou de faim.

Les rejets opérationnels chroniques tuent en moyenne près de 300 000 oiseaux tous les ans ([Fattal P. 2008](#)).

La vulnérabilité des oiseaux dépend de plusieurs variables comme :

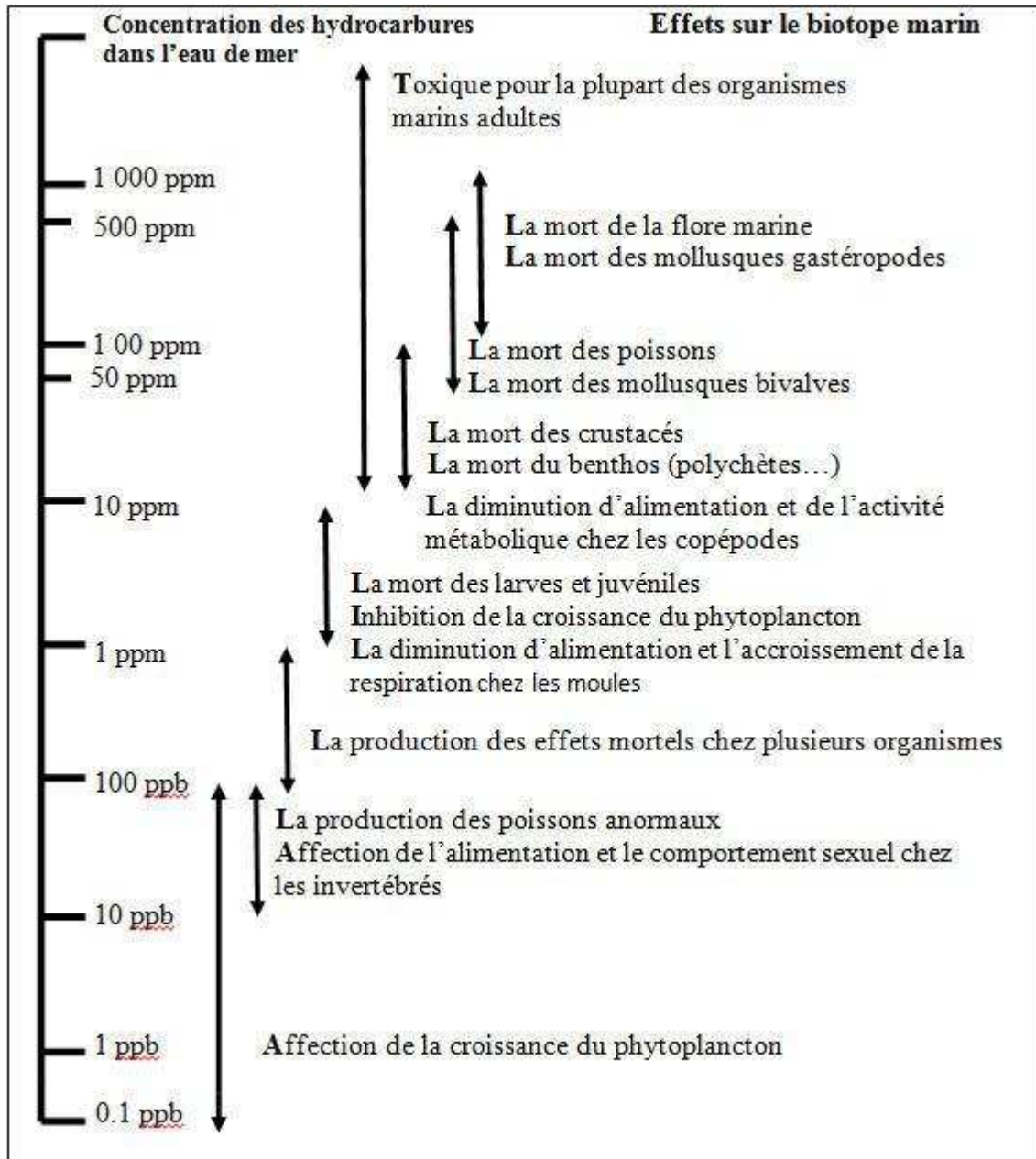
- ✓ le type d'espèce ;
- ✓ le type d'hydrocarbures ;
- ✓ l'étendue de la nappe ;
- ✓ le lieu de la pollution ;
- ✓ la période où l'accident s'est produit.

**B. Les mammifères**

L'impact sur les mammifères dépend des types d'espèces, de leur mode de vie, la durée d'exposition, la surface du corps mazouté, l'ingestion des hydrocarbures et l'inhalation. Ces deux derniers facteurs sont responsables d'irritations diverses, l'inflammation des muqueuses, d'ulcérations gastro-intestinales et d'obstruction des poumons.

Tableau 1.1 : Effets à court et long terme d'une pollution par hydrocarbures sur les organismes et peuplements (CEDRE, 1990 in Fattal, 2008).

Peuplement	Sensibilité	Effets à court terme	Effets à long terme
Algues	Faible	Engluement ou nécrose des tissus	Bonne restauration
Flore des marais marins et estuariens	Variable suivant les espèces, l'état de développement des plantes et les périodes de l'année	Engluement des parties aériennes	Restauration longue Erosion du marais Modification de la diversité spécifique
Mollusques intertidaux	Forte en général	Asphyxie ou contamination	Accumulation par les filtreurs Altération de la reproduction et de la croissance
Ecosystèmes benthiques rocheux	Forte en général	Asphyxie ou contamination	Dépend de la durée de contact Dans la zone battue, l'effet est faible
Poissons	Faible pour les pélagiques Forte pour les benthiques	Asphyxie par engluement sur les branchies Plaies chez les poissons fouisseurs dans des sédiments faiblement pollués	Désaffection de la zone polluée
Oiseaux	Variable (forte pour les plongeurs)	Engluement du plumage et contamination	Désaffection de la zone polluée



**Figure 1.3 :** Description schématique de susceptibilité des organismes marins aux hydrocarbures suivant leurs concentrations (en particulier les hydrocarbures polyaromatiques soluble) (O'Sullivan et Jacques, 2001 in Bocard, 2006).

### 1.6.7. Impacts sur la santé humaine

Le contact « permanent » de l'homme avec les hydrocarbures lourds, contenant des hydrocarbures polyaromatiques, provoque sur le long terme des troubles neurologiques et neurophysiologiques. L'impact sur la santé dépend aussi du temps d'inhalation, du contact cutané (baignade) avec les hydrocarbures et de la possible consommation de produits de la mer qui seraient contaminés (poissons, huître, moules) (Fattal, 2008).

### 1.6.8. Lutte contre la pollution par les hydrocarbures

Les diverses techniques auxquelles il est possible de faire appel afin de traiter les hydrocarbures en mer sont en résumé les suivantes :

#### 1. La récupération mécanique

La récupération mécanique est en principe le moyen le plus souhaitable de traiter les hydrocarbures en mer, car elle permet d'éliminer le polluant de la surface de la mer. Dans la plupart des cas, la viscosité ne constitue plus un problème grave - il existe des écrémeurs qui permettent de récupérer des hydrocarbures très visqueux. Des précautions doivent être prises du fait du danger d'explosion suscitée tant par la nappe d'hydrocarbures que par les hydrocarbures récupérés, quoique les dangers soient bien compris, et qu'ils puissent être minimisés pendant le planning des interventions et pendant les opérations, ceci en prenant des précautions appropriées.

L'expérience récente a démontré que les navires chargés des opérations de récupération à proximité de la côte peuvent menacer les installations de pêche à demeure, et que des précautions doivent impérativement être prises dans de telles situations. Toutefois, ce problème a toute chance de ne se poser que rarement.

Les principaux problèmes que posent les opérations de récupération subsistent : la vitesse à laquelle le matériel peut être déployé au départ, laquelle dépend de l'emplacement du matériel; la lenteur de la récupération possible dès lors que le matériel a été amené sur les lieux, ainsi que sa sensibilité aux conditions météorologiques.

Les hydrocarbures qui sont encore en phase liquide, autrement dit à une température supérieure à celle du point de coulée, se répandent rapidement à la surface de la mer et forment ainsi des films très minces (typiquement 0,1 mm), couvrant de très vastes surfaces. La vitesse à laquelle les barrières peuvent être tractées à travers les eaux afin de récupérer les hydrocarbures est limitée à 0,5 ou 1 mètre par seconde (entre 1 et 2 nœuds), ceci en raison de la tendance qu'ont les hydrocarbures de passer sous la barrière, du fait de la turbulence. Ceci réduit le taux de récupération d'une couche de 0,1 mm à un maximum de 0,18 à 0,36 tonnes à l'heure par mètre de barrière dans des conditions météorologiques favorables (en général, entre 75 et 150 tonnes à l'heure). Le taux de récupération d'un navire d'intervention peut être accru en faisant appel à une barrière de récupération combinée à un bras de balayage ou à un écrémeur, ainsi qu'en appliquant des techniques de surveillance aérienne afin d'orienter les navires récupérateurs sur les couches d'hydrocarbures les plus épaisses.

En général, les barrières ne peuvent retenir les hydrocarbures lorsque la hauteur des vagues est supérieure à 2 mètres, et sont de moins en moins efficaces lorsque leur hauteur dépasse 1,5 mètre.

Dans les pays à littoraux de grande longueur, il se peut que le fait de disposer des navires nécessaires au déploiement du matériel pose des problèmes. Le matériel peut soit être portatif, et se monter sur des bateaux de fortune, ou encore équiper en permanence des navires occasionnels, ou encore être des navires à vocation spécialisée. Le fait de maintenir des navires à vocation spécialisée en veille permanente est coûteux, tout en permettant toutefois une intervention relativement rapide sur un incident dans le rayon d'action de la base du navire. En revanche, dans le cas des navires dont la mission est normalement autre, il faut du temps pour les préparer à combattre une pollution par les hydrocarbures, ce qui augmente les délais d'intervention.

## **2. La dispersion**

Dans des conditions favorables, la dispersion peut réduire aussi bien la menace qu'une marée noire présente pour les organismes pélagiques que la quantité d'hydrocarbures rejetés sur le littoral. Toutefois, elle accentue en revanche la menace pour les organismes de sub-surface, en augmentant provisoirement les teneurs en fraction d'hydrocarbures toxiques qui pénètrent dans la colonne d'eau. Dans certains cas, il est possible de disperser une nappe grâce aux hélices d'un navire ou par d'autres moyens mécaniques, et étant donné que des navires adéquats se trouvent souvent sur le lieu du déversement pour d'autres raisons, cette option peut être à la fois commode et peu coûteuse. Toutefois, il est plus fréquent que l'on soit amené à ajouter des produits chimiques afin d'obtenir un taux de dispersion satisfaisant.

En eaux profondes, la dilution permet en général de réduire la teneur en hydrocarbures dispersés à un niveau sans danger. Ce n'est pas nécessairement le cas des opérations de grande ampleur ou des opérations prolongées, car dans ces conditions, il est important de trouver un compromis entre les avantages de la destruction de la nappe d'hydrocarbures d'une part, et les dangers pour les organismes vivant sub-surface d'autre part. Dans les eaux d'une profondeur inférieure à 20 mètres, il est impératif de tenir compte systématiquement de l'impact éventuel de la dispersion des hydrocarbures, quelle que soit l'ampleur de l'opération. Toutefois, si des préparatifs adéquats sont faits dès le planning des interventions, le problème qui se pose ainsi n'est pas nécessairement grave au moment même de l'incident. Il convient de mettre au point une stratégie d'utilisation des dispersants en fonction de la zone géographique, des ressources en danger aux diverses époques de l'année, et des profils météorologiques.

Le grand problème que pose l'emploi des dispersants chimiques est qu'ils ne sont efficaces que dans le cas des hydrocarbures légers. Le principal facteur tient à la viscosité des hydrocarbures. Pour que les dispersants soient efficaces, il est important qu'ils soient bien mélangés avec les hydrocarbures. Certains hydrocarbures, en particulier ceux qui se trouvent à des températures inférieures à leur point de coulée, sont trop visqueux pour que le dispersant puisse y pénétrer. La

viscosité de la plupart des hydrocarbures augmente après un certain délai lorsqu'ils flottent sur la mer. Ce délai dépend des hydrocarbures eux-mêmes ainsi que des conditions météorologiques, quoiqu'ils puissent n'être que de quelques heures. Il est donc important de répandre les dispersants chimiques le plus rapidement possible après que le déversement se soit produit, ce qui implique concrètement en général que ce sont des aéronefs qui constituent le principal moyen d'épandage.

### **3. La dissipation naturelle**

Cet option pourrait être considérée comme la moins attrayante, en ce que le choix consiste à laisser les hydrocarbures non modifiés à la surface de la mer, et qu'ils sont donc susceptibles de nuire aux oiseaux de mer, ou d'atteindre le littoral sans avoir été modifiés, les hydrocarbures lourds pouvant en outre couler au fond de la mer où leur nocivité se manifeste. C'est là toutefois de loin l'option la moins coûteuse, ce qui fait que dans le cas des petites nappes d'hydrocarbures, c'est la forme de réaction la plus courante. Il est fréquent que ces nappes se désintègrent et se dissipent avant qu'elles n'atteignent des zones vulnérables. Toutefois, il convient de noter que cette option est la plus difficile à appliquer d'un point de vue politique.

Dans le cas des grandes nappes, le problème est qu'il faut arriver à prévoir, avec un degré adéquat de certitude, que les hydrocarbures n'entraîneront pas de dommages. Bien que les modèles prédictifs du mouvement des hydrocarbures à la surface de l'eau aient atteint un stade avancé de développement, le principal des facteurs qui influe sur le cheminement des nappes d'hydrocarbures est le vent, la faculté que nous avons de prévoir la force et la direction du vent restant limitée. Par conséquent, si l'on doit faire appel à cette option dans les cas où il reste des doutes sur le devenir des hydrocarbures, il convient de surveiller étroitement la nappe.

### **4. La dépollution biologique**

La dégradation biologique par les bactéries représente une des voies les plus importantes d'élimination de ces polluants. Ces communautés microbiennes, capables de dégrader le pétrole.

Des études ont montré que la présence de pétrole dans l'eau de mer a entraîné, en quelques jours, un enrichissement en microorganismes « mangeurs d'hydrocarbures », signe d'une activité microbienne de biodégradation.

Cependant cette activité peut être limitée par un déséquilibre dans le rapport entre le carbone, l'azote et le phosphore, éléments nutritifs des bactéries. Les nappes d'hydrocarbures apportent, en effet, une grande quantité de carbone au détriment de l'azote, réduisant ainsi la capacité des microbes à constituer une biomasse viable pour la consommation de ces polluants. Toutefois, plusieurs études, menées dans l'Arctique, ont montré qu'un apport de fertilisants favorise la biodégradation des produits pétroliers à basse température.

De ce fait, un défi important apparaît : optimiser la dépollution par dégradation biologique (bioremédiation) dans les mers froides et déterminer l'amplitude de température dans laquelle ce processus est efficace.

Dans les eaux côtières des îles Kerguelen, des chercheurs français et québécois ont mené des expériences de laboratoire à l'échelle du microcosme pour étudier le potentiel de bio-remédiation des sites pollués par différents types de bactéries. Le principal objectif de ces recherches était de déterminer si une élévation importante de la température pouvait stimuler l'élimination par les bactéries de la pollution par le pétrole brut ou le diesel dans les eaux côtières des îles subantarctiques. L'étude a mis en évidence un fort potentiel de dégradation des hydrocarbures par les communautés microbiennes de l'Antarctique même à basse température. Le taux de cette biodégradation peut être augmenté par l'ajout de fertilisants du commerce. En revanche, la température de l'eau de mer a très peu d'effet sur l'activité bio-dégradatrice des bactéries, contrairement à l'assertion selon laquelle celle-ci diminue de 50% quand la température baisse de 10 °C. Les chercheurs ont observé que l'ajout de fertilisants augmente la biodégradation des hydrocarbures bien plus que l'élévation de la température de l'eau de mer.

Il semble donc que le réchauffement de l'océan Antarctique, dû au changement climatique global, ne suffirait pas pour accroître le taux de biodégradation bactérienne des hydrocarbures de façon significative. Par contre, la fertilisation par ajout de nutriments dans l'eau constituerait un moyen efficace pour nettoyer les côtes polluées par les hydrocarbures, notamment près des stations de recherche subantarctiques ou antarctiques.

## I.2. Télédétection et Modélisation

### I.2.1. Bases physiques de la télédétection

La télédétection est une discipline ayant pour objet les informations portées par les rayonnements électromagnétiques issus de la surface de la terre ou de celle d'autres planètes, captés à distance par des instruments aéroportés ou spatiaux (Chorowicz, 1980). Cette discipline développe des techniques et des méthodes intervenant à plusieurs niveaux :

- le choix et l'acquisition des données
- le traitement des données (mise en forme et restitution)
- l'analyse et l'interprétation des données (photo interprétation)

Elle utilise le rayonnement électromagnétique (la lumière la chaleur et les ondes radios) comme moyen de détection et de mesure des propriétés physiques des objets observés.

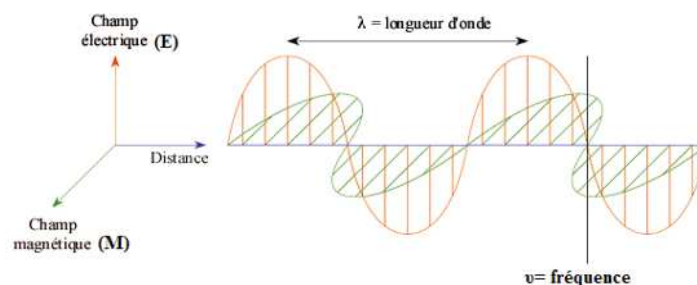
#### 1. Le rayonnement électromagnétique

Le rayonnement électromagnétique est l'énergie créée en tout point de l'espace par un double champ périodique : un champ électrique  $\mathbf{E}$  et un champ magnétique  $\mathbf{M}$  qui se déplacent à la vitesse de la lumière  $\mathbf{C}$  ; il est caractérisé par sa période, sa longueur d'onde, sa fréquence, sa vitesse de propagation et son amplitude, il peut être absorbé, transmis ou réfléchi selon les objets étudiés.

Afin de comprendre la nature de l'information apportée par les données de télédétection, il est indispensable de connaître la nature de ce rayonnement.

#### 2. L'onde électromagnétique

Est une vibration qui se propage dans l'espace représentée par deux vecteurs perpendiculaires indissociables dont l'amplitude varie périodiquement avec le temps c'est la succession des cycles aller- retour d'un champs magnétique et d'un champs électrique produits par un courant électrique qui constitue l'onde dont les principales propriétés sont l'émission, l'absorption, la réflexion et la transmission.



**Figure 1.4:** Représentation de l'onde électromagnétique

### La réflexion

Tout corps qui reçoit une certaine quantité d'énergie rayonnante d'une source extérieure peut en réfléchir une partie. Le rapport entre l'énergie réfléchie et l'énergie incidente est appelé coefficient de réflexion ou réflectance. La réflexion peut être spéculaire (dirigée entièrement dans une seule direction), ou diffuse (dirigée dans toutes les directions).

### L'absorption

Tout corps qui reçoit une quantité de rayonnement électromagnétique peut en absorber une partie. Le rapport entre l'énergie absorbée et l'énergie reçue est appelé coefficient d'absorption ou absorptance.

### La transmission

Tout corps qui reçoit une quantité de REM peut en transmettre une partie. Le rapport entre l'énergie transmise ou réfractée et l'énergie incidente est appelé coefficient de transmission ou transmittance. Une surface d'eau pure est un exemple de surface susceptible de transmettre une partie du REM.

### La diffusion

Des particules microscopiques comme celles contenues dans l'atmosphère, amènent la diffusion dans toutes les directions d'une partie de l'énergie émise par la source qui, traversant ce milieu peut alors être considérablement transformée.

### L'émission

Tout corps dont la température est supérieure au zéro absolu ( $-273^{\circ}\text{C}$ ) émet un rayonnement électromagnétique. La source peut être le soleil, le satellite (Radar) ou encore la cible (infrarouge thermique).

En effet selon le premier principe de la thermodynamique (la conservation d'énergie), la somme des énergies réfléchies ( $E_r$ ), absorbées ( $E_a$ ) et transmises ( $E_t$ ) sont égales à l'énergie incidente ( $E$ ), soit :

$$E = E_a + E_t + E_r \quad (1.1)$$

Et à chaque instant, les coefficients des différentes énergies sont égaux à 1 (figure 1.5), soit,

$\alpha + \rho + \tau = 1$  (1.2), avec  $\alpha$  le coefficient d'absorption,  $\rho$  le coefficient de réflexion et  $\tau$  le coefficient de transmission.

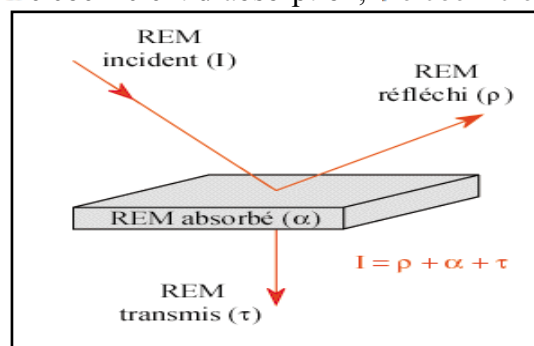


Figure 1.5 : Relation entre absorption, réflexion et transmission.

Généralement, la combinaison entre ces trois formes d'interaction détermine la signature spectrale qui est le signal capté, émis ou réfléchi par une cible, et qui correspond à deux grandeurs physiques : la réflectance et la luminance :

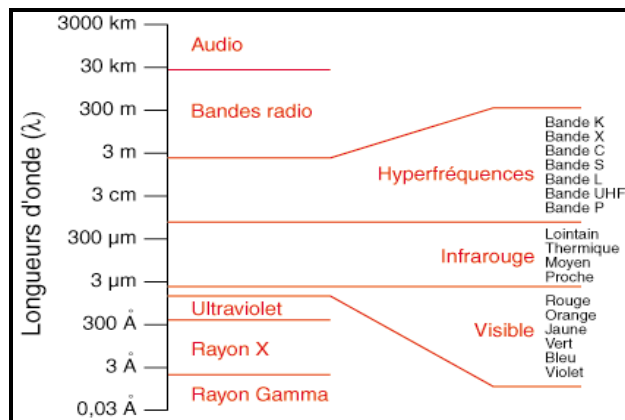
- La réflectance (R) : est le rapport entre l'énergie réfléchie ( $E_r$ ) par l'objet et l'énergie reçue (E). La réflectance s'exprime en pourcentage. Soit  $R = E_r/E$  (1.3)
- La luminance (L) : correspond à ce que reçoit le capteur et elle intègre les divers effets atmosphériques, la luminance est exprimée en watt par mètre carré par stéradian par micromètre ( $W/m^2/str/\mu m$ ).

### 3. Le spectre électromagnétique

Il regroupe toutes les catégories de lumière qui s'étendent des courtes longueurs d'ondes (rayons gamma et rayons x) aux grandes longueurs d'ondes (micro-ondes et ondes radio).

Les ondes les plus utilisées en télédétection sont :

- Le visible (rayonnement solaire réfléchi par les surfaces terrestres).
- Le proche infrarouge utilisé pour l'étude de la végétation et la détection de l'eau
- Le moyen infrarouge utilisé pour la détection de la neige, de l'eau et de l'humidité des sols.
- L'infrarouge thermique utilisé en météorologie et en climatologie.
- Les hyperfréquences utilisées en océanographie et en agriculture.



**Figure 1.6** : Représentation du spectre électromagnétique (CCT)

#### I.2.2. Modélisation de l'interaction du rayonnement électromagnétique avec l'atmosphère

Le but de la modélisation est de comprendre comment les différents éléments qui composent le système de mesure se combinent pour réaliser une mesure. La forme et le contenu d'un modèle dépendent de leur finalité.

Le modèle est construit pour comprendre les phénomènes dont il est le siège et pour prévoir leur comportement sous l'effet d'une action extérieure ou sous l'effet d'une modification partielle du

système lui-même. Le modèle développé consiste à décomposer le milieu sol-atmosphère en sous-ensembles en interaction avec le spectre solaire et le capteur embarqué par le satellite.

La source irradie l'objet et ce dernier réfléchit la radiation dans toutes les directions, une partie de cette radiation est captée. Le rayonnement capté par un radiomètre embarqué par le satellite, est composé de deux principaux termes : une brillance engendrée par la surface dans le champ de vision du capteur et une brillance qui n'est pas engendrée par la surface dans le champ de vision.

Le premier terme est l'information utile, il est dû à l'éclairement solaire direct et indirect. Le second terme, considéré comme le bruit est dû à l'éclairement diffusé par l'atmosphère. Soit un pixel donné de coordonnées image  $(x,y)$  et une bande spectrale  $\mathbf{b}$ , la radiation qui excite le capteur  $\mathbf{K}_\lambda(\mathbf{x},\mathbf{y},\mathbf{b})$  ( $\text{w.cm}^{-2} \mu\text{m}^{-1} \text{sr}^{-1}$ ) selon Teillet (Teillet,1986) s'écrit sous la forme suivante :

$$\mathbf{K}_\lambda(\mathbf{x},\mathbf{y},\mathbf{b}) = \mathbf{C}(\mathbf{x},\mathbf{y}) \mathbf{R}_\lambda(\mathbf{x},\mathbf{y}, \mathbf{b}) + \mathbf{H}_\lambda(\mathbf{b}) + \Delta_\lambda(\mathbf{x},\mathbf{y},\mathbf{b}) \quad (1.4)$$

$\mathbf{C}(\mathbf{x},\mathbf{y})$ : est une constante multiplicative qui décrit le facteur de forme c'est à dire l'orientation topographique de la surface par rapport à la position du soleil pendant la prise de vue,  $\mathbf{R}_\lambda(\mathbf{x},\mathbf{y}, \mathbf{b})$ : est la radiation réfléchiée par le sol proportionnel à la réflectance moyenne du pixel  $(x,y)$  dans la bande spectrale  $\mathbf{b}$ ,  $\mathbf{H}_\lambda(\mathbf{b})$  : est la diffusion du système sol-atmosphère (bruit) en considérant la terre comme étant un corps noir et  $\Delta_\lambda(\mathbf{x},\mathbf{y},\mathbf{b})$  représente une variable résiduelle qui engendre l'effet du voisinage et  $\mathbf{R}_\lambda(\mathbf{x},\mathbf{y},\mathbf{b})$  est donnée par la relation suivante :

$$\mathbf{R}_\lambda(\mathbf{x},\mathbf{y},\mathbf{b}) = \mathbf{S}_\lambda(\mathbf{b}) \mathbf{T}_\lambda(\mathbf{b}) \mathbf{G}_\lambda(\mathbf{b}) \rho_\lambda(\mathbf{x},\mathbf{y}) \quad (1.5)$$

$\mathbf{S}_\lambda(\mathbf{b})$ : représente le facteur de gain du système dans le canal  $\mathbf{b}$  (sensibilité du capteur),  $\mathbf{T}_\lambda(\mathbf{b})$ : est la transmittance atmosphérique de la terre au satellite dans le canal  $\mathbf{b}$ ,  $\mathbf{G}_\lambda(\mathbf{b})$ : est la radiation globale et  $\rho_\lambda(\mathbf{x},\mathbf{y},\mathbf{b})$ : réflectance du pixel  $(x,y)$  dans le canal  $\mathbf{b}$ .

Cette quantité énergétique  $\mathbf{R}_\lambda(\mathbf{x},\mathbf{y},\mathbf{b})$  est transformée en compte numérique, qui englobe toutes les informations sur le système sol-atmosphère, les conditions géométriques de prise de vue et les propriétés optiques du capteur.

### I.2.3.Détermination de la réflectance des eaux de mer par simulation des données satellites

#### 1. Les perturbations atmosphériques

Le signal électromagnétique détecté par le capteur embarqué à bord d'un satellite ne lui parvient qu'après traversée intégrale des couches atmosphériques ; l'analyse des données de télédétection exige donc la prise en compte des interactions rayonnement-atmosphère.

Les phénomènes physiques fondamentaux intervenant dans les interactions rayonnement-atmosphère sont :

- 1- L'absorption par les grosses molécules de l'atmosphère (ozone, bioxyde de carbone et vapeur d'eau) liée à la longueur d'onde, au type de molécules et leurs propriétés.

- 2- La diffusion par les molécules de gaz et les particules (gouttelettes d'eau, poussières, fumées ...) dont le niveau dépend de la longueur d'onde, de la densité des particules et de molécules et de l'épaisseur de l'atmosphère
- 3- La réfraction qui est la distorsion géométrique du trajet des ondes, due à la variation de l'indice de réfraction.
- 4- L'émission propre

Les principales fenêtres atmosphériques sont les parties du spectre électromagnétique où l'atmosphère est transparente au rayonnement ce sont donc les zones du spectre dans lesquelles les mesures en télédétection sont possibles (voir tableau 1.2).

**Tableau 1.2 :** Les principales fenêtres atmosphériques (CCT)

Fenêtre	De	à
Ultraviolet et visible	0.35	0.75 $\mu\text{m}$
Proche infrarouge	0.77	0.91 $\mu\text{m}$
	1.0	1.12 $\mu\text{m}$
	1.19	1.34 $\mu\text{m}$
Infrarouge	1.55	1.75 $\mu\text{m}$
	2.05	2.04 $\mu\text{m}$
Infrarouge thermique	3.35	4.16 $\mu\text{m}$
	4.5	5.0 $\mu\text{m}$
	8.0	9.2 $\mu\text{m}$
	10.2	12.4 $\mu\text{m}$
	17.0	22.0 $\mu\text{m}$
Hyperfréquences	2.06	2.22 mm
	3.0	3.75 mm
	7.5	11.5 mm
	20.0 mm	Et au-delà

L'énergie électromagnétique qui rencontre la matière liquide solide ou gazeuse est appelée **rayonnement incident**, l'interaction avec cette matière peut changer ses caractéristiques (direction, longueur d'onde, polarisation, phase), la télédétection détecte et enregistre ces changements.

## 2. Interactions rayonnement électromagnétique eau de mer

### 2.1. Propriétés optiques des surfaces d'eau

La réflectance et l'émissivité des surfaces d'eau dépendent des propriétés optiques de l'eau ainsi que de celles des substances dissoutes ou en suspension.

Celles-ci peuvent être séparées en 3 catégories principales :

- Le phytoplancton vivant et les détritiques biogènes qui lui sont associés.
- Les particules minérales en suspension.
- La matière organique dissoute (substance jaune).

Les particules minérales et les détritiques biogènes sont parfois englobés sous le terme général de tripton (particules non vivantes) (Tassan, 1988).

#### *a. Propriétés optiques des particules minérales en suspension.*

Les particules minérales en suspension sont constituées par les particules terrigènes apportées par les fleuves et par les sédiments remis en suspension par les courants, les vagues et les houles.

Leur influence est prépondérante dans de nombreuses zones côtières, sur les plateaux continentaux et dans les panaches fluviaux. La variation du coefficient d'absorption des particules non chlorophylliennes en fonction de la longueur d'onde, montre que l'absorption est très forte dans le bleu et présente par contre un minimum entre 500 et 600 nm (Prieur et Sathyendranath, 1981).

La diffusion de la lumière par les particules en suspension ne suit pas une loi simple car certaines sont absorbantes. De plus, leur distribution de taille est tronquée comparativement à une distribution statistique normale (sédimentation). Aussi, la diffusion suit une loi en  $\lambda^{-0,7}$  à  $\lambda^{-1,3}$ , selon les échantillons d'eau considérés (Bhargava et Mariam, 1991).

#### *b. Propriétés optiques de la substance jaune.*

La matière organique dissoute ou substance jaune provient essentiellement du lessivage des terres et elle est due à la décomposition des végétaux. Elle est présente en concentration élevée dans les zones où les apports d'eaux douces sont importants (eaux côtières et certaines mers intérieures comme la Baltique).

Une partie de la substance jaune provient également, en quantité beaucoup plus faible, de la dégradation du phytoplancton *in situ* (Prieur et Sathyendranath, 1981).

L'absorption de la lumière par la substance jaune varie exponentiellement avec la longueur d'onde :

$$a_y(\lambda) = a_y(\lambda_0) \exp[-P(\lambda - \lambda_0)] \quad (1.6)$$

La pente P, lorsque  $\lambda$  est exprimé en nm, est égale à 0,014 et varie relativement peu selon le type d'eau et selon la nature de la substance jaune qu'elle soit d'origine biogène ou terrigène. La

diffusion moléculaire due à cette substance est négligeable devant celle de l'eau pure (Priour et Morel, 1975).

## 2.2. Réflectance des surfaces marines

La réflectance diffuse des surfaces marines dépend des propriétés optiques de l'eau de mer ainsi que celle des substances dissoutes ou en suspension. Elle est fonction du coefficient de rétrodiffusion global de la mer  $b_b(\lambda)$  et de son coefficient d'absorption  $a(\lambda)$ .

$$\rho(\lambda) = F[b_b(\lambda) / a(\lambda)] \quad (1.7)$$

F dépend de la fonction de diffusion en volume de l'eau et de la distribution angulaire de l'énergie radiative. Une relation particulièrement simple a été établie par Priour et Morel (1975) :

$$\rho(\lambda) = 0,33(1 + \Delta)[b_b(\lambda) / a(\lambda)] \quad (1.8)$$

Dans laquelle  $\Delta$  dépend des variations angulaires de la diffusion et de l'éclairement incident, mais qui reste inférieur à 5 %. Les coefficients  $a(\lambda)$  et  $b_b(\lambda)$  étant dans propriétés inhérentes à un milieu marin donné sont, de ce fait, strictement additifs et peuvent être décomposés comme la somme des contributions partielles des différentes substances.

Pour déterminer la teneur de l'eau de mer en différents éléments à partir de données satellitaires, il est nécessaire de s'appuyer sur des modèles de réflectance que l'on inverse (Doerffer et Schiller, 1997).

La contribution, au niveau du capteur, des photons ayant pénétré dans l'océan s'exprime par le produit de la luminance marine  $L_w$  à la sortie de l'océan par la transmission diffuse de l'atmosphère, dont une expression approchée, est établie empiriquement.

Les modèles de réflectance utilisent en entrée les paramètres thématiques et permettent de déduire la réflectance d'un objet. L'inversion d'un modèle à déduire les paramètres thématiques à partir des données de réflectance.

Dans une mesure satellitaire, le signal qui est délivré par un satellite ne correspond pas exactement au flux de rayonnement qui est réfléchi ou émis par la cible visée car il subit une série d'altérations qui sont dues aux effets de l'atmosphère et à la géométrie de la visée.

Dans le cas de l'eau, nous avons essayé de mettre au point une méthode de correction radiométrique qui nécessite de prendre en considération les paramètres atmosphériques d'une seule image pour trouver des relations de réflectance de l'eau de mer.

## 2.3. Étude du rayonnement sur le trajet sol atmosphère satellite

Elle consiste à évaluer le rayonnement qui parvient au satellite. Ce rayonnement est la résultante du rayonnement réfléchi par le sol et de celui diffusé par l'atmosphère.

### **a. Radiation réfléchi par la surface d'eau**

Le rayonnement atteignant la surface va être réfléchi vers le capteur du satellite, la quantité réfléchi dépend de la nature du sol et donc de sa réflectance.

L'éclairement global à la surface  $G_\lambda$  pénètre la masse d'eau, une partie est réfléchi de façon spéculaire :

$$I_1 = G_\lambda \rho_s(\lambda) \quad (1.9)$$

Avec :  $\rho_s(\lambda)$ , la réflectance de l'eau .

### **b. Radiation diffusée d'un volume d'eau**

La partie transmise dans la masse d'eau est diffusée ou absorbée par ces composantes. La quantité de la radiation réfléchi par un volume d'eau s'écrit sous la forme suivante :

$$I = (G_\lambda - I_1 - I_2) \omega_0 \quad (1.10)$$

Avec :  $G_\lambda$ , radiation globale atteignant la surface.

$I_1$ , radiation réfléchi spéculairement à la surface.

$I_2$ , radiation réfléchi par le fond.

$\omega_0$ , albédo de diffusion de l'eau.

### **c. Radiation diffusée du fond**

Une partie du rayonnement qui atteint le fond de la mer peu profonde peut être réfléchi à son tour. Cette quantité est décrite par la formule suivante :

$$I_2 = (G_\lambda - G_\lambda \rho_s) \exp -k \cdot z \cdot \cos(\vartheta_z) \cdot R_a \cdot \exp -k \cdot z \cdot \cos(\vartheta_v) \quad (1.11)$$

Avec :  $R_a$ , réflectance du fond.

$e^{-kzf}$ , transmittance de l'eau.

$k$ , coefficient d'atténuation.

$z$ , la profondeur.

$f$ , est un facteur géométrique qui tient compte de la longueur d'onde du chemin traversant l'eau.

$f = \cos \vartheta_z$ , cas du trajet soleil-cible.

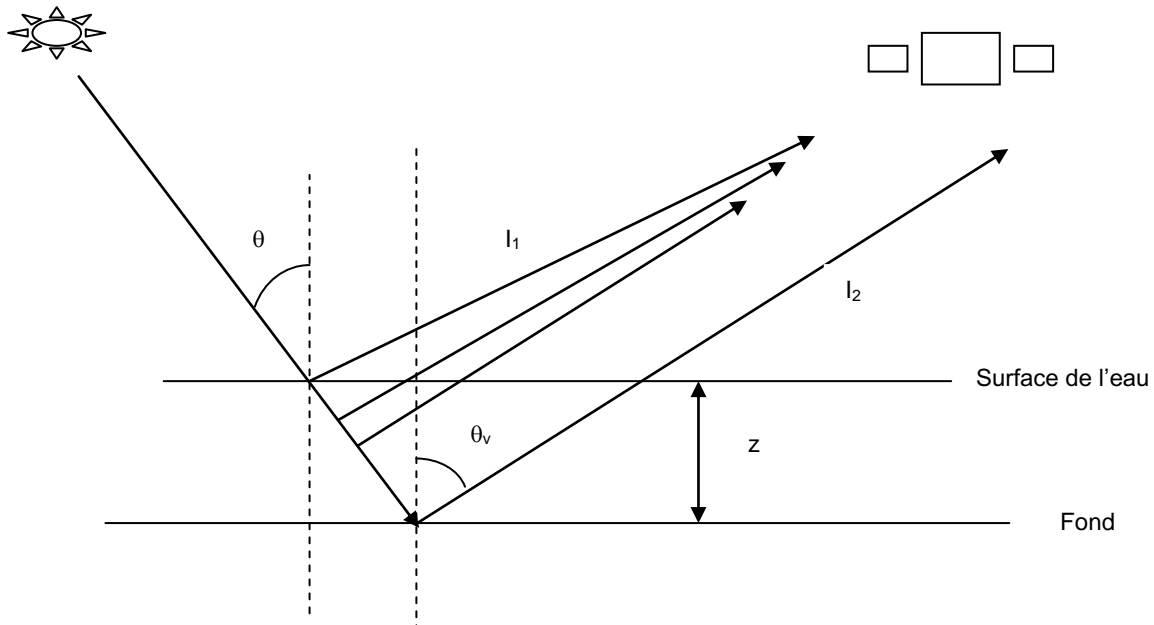
$f = \cos \vartheta_v$ , cas du trajet cible-satellite.

### **d. Radiation totale diffusée à la surface de l'eau**

Les techniques d'extraction de la profondeur de l'eau sont développées sous la base d'un simple modèle de réflectance de l'eau qui tient compte pour une part majeure du signal capté par le détecteur multi spectral, suivant ce modèle, la radiation dans une seule bande d'une longueur d'onde peut être écrite comme suit :

$$I_{e\lambda} = G_{\lambda}\rho_s + G_{\lambda}\rho_s \cdot \omega_0 \left( \frac{1}{\rho_s} - 1 - \left( \frac{1}{\rho_s} - 1 \right) R_a \exp - kz(\cos\vartheta_z + \cos\vartheta_v) \right) \quad (1.12)$$

$$+ G_{\lambda}(1 - \rho_s)R_a \exp -kz(\cos\vartheta_z + \cos\vartheta_v)$$



**Figure 1.7:** Trajet du rayonnement dans une masse d'eau.

La radiation réfléchi par la surface de l'eau en direction du satellite passe à travers l'atmosphère d'une manière directe avec un angle de vue  $\vartheta_v$  et subit des atténuations analogues à celles rencontrées dans la direction soleil- cible avant d'être captées par le satellite.

$$G_{\lambda(sat)} = I_{e\lambda} \cdot \tau'_{\lambda} \quad (1.13)$$

$I_{e\lambda}$ , rayonnement réfléchi à la surface de l'eau.

$\tau'_{\lambda}$ , transmittance spectral total du deuxième trajet.

D'où :

$$\tau'_{\lambda} = \tau'_{r\lambda} \cdot \tau'_{o\lambda} \cdot \tau'_{\omega\lambda} \cdot \tau'_{g\lambda} \cdot \tau'_{a\lambda} \quad (1.14)$$

Une partie du rayonnement réfléchi est diffusé vers la terre, une partie est diffusée vers le capteur en suivant les processus de la diffusion de Rayleigh et la diffusion de Mie. Soit :

$$\tau'_{da\lambda} = \tau'_{\omega\lambda} \cdot \tau'_{o\lambda} \cdot \tau'_{g\lambda} \cdot [F_c \omega_0 (1 - \tau'_{a\lambda}) \tau'_{r\lambda}] \text{ et } \tau'_{dr\lambda} = \tau'_{\omega\lambda} \cdot \tau'_{o\lambda} \cdot \tau'_{g\lambda} \cdot [0.5(1 - \tau'_{r\lambda}) \tau'_{a\lambda}] \quad (1.15)$$

#### e. Radiation totale arrivant au satellite.

La quantité d'énergie qui atteindra le capteur du satellite est la somme de celle issue du sol et celle diffusée par l'atmosphère. La radiation émise par la surface et qui atteint le capteur est :

$$R_{(sol-atm)} = [I_{e\lambda} (\tau'_{\lambda} + \tau'_{da\lambda} + \tau'_{dr\lambda})] / \pi \quad (1.16)$$

La radiation diffusée par l'atmosphère :

$$R_{(atm-sat)} = \frac{I_{o\lambda} \cdot \cos \vartheta_z}{\pi} \rho_{a\lambda} \quad (1.17)$$

La radiation atteignant le satellite est composée de la radiation globale spectrale réfléchie par le sol en passant de nouveau à travers l'atmosphère  $R_{(sol-atm)}$  et une partie de la radiation diffusée par l'atmosphère terrestre  $R_{(atm-sat)}$  (Bhargava et Mariam, 1991).

Donc la radiation qui atteint le capteur est :

$$R_\lambda = R_{(sol-atm)} + R_{(atm-sat)} \quad (1.18)$$

$$R_\lambda = (I_{e\lambda} \cdot \tau'_{atm} + I_{o\lambda} \cos \vartheta_z \rho_{a\lambda}) / \pi \quad (1.19)$$

Avec :

$$\tau'_{atm} = \tau'_\lambda + \tau'_{dr\lambda} + \tau'_{da\lambda} \quad (1.20)$$

Si le capteur a une réponse spectrale  $\delta_\lambda$ , le signal enregistré au niveau du capteur est :

$$L_\lambda = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \left( \frac{I_{e\lambda} \tau'_{atm}}{\pi} + \frac{I_{o\lambda} \cos \vartheta_z}{\pi} \rho_{a\lambda} \right) \delta_\lambda d\lambda \quad (1.21)$$

Avec :  $L_\lambda$ , radiation calculée pour le canal  $\lambda$ .

$\Delta\lambda$ , bande spectrale du canal.

$\delta_\lambda$ , sensibilité du canal.

Dans une mesure satellitaire, le signal qui est délivré par un satellite ne correspond pas exactement au flux de rayonnement qui est réfléchié ou émis par la cible visée car il subit une série d'altérations qui sont dues aux effets de l'atmosphère et à la géométrie de la visée.

En effet, le quotient du rayonnement solaire qui atteint la surface dépend de la position du soleil par rapport à un observateur terrestre et de l'inclinaison de cette surface par rapport à l'horizon. Les données enregistrées par un radiomètre au sol ou à bord d'un satellite représentent une série de flux élémentaires de rayonnement provenant des différents composants de la scène observée.

Les analyses spectrales permettent de mettre au point un modèle plus ou moins complexe qui relie des paramètres thématiques aux données de télédétection. (Abdellaoui et al., 2004; Durand, 2000; Bachari, 1999).

## I.2.4. Application de la télédétection

### 1. Mesure des grandeurs par simulation

Dans cette recherche nous nous intéressons à suivre la variation des quantités de luminance et réflectance en fonction des paramètres physicochimiques des stations étudiées dans les différents canaux des satellites SPOT, TM Landsat et MSS...

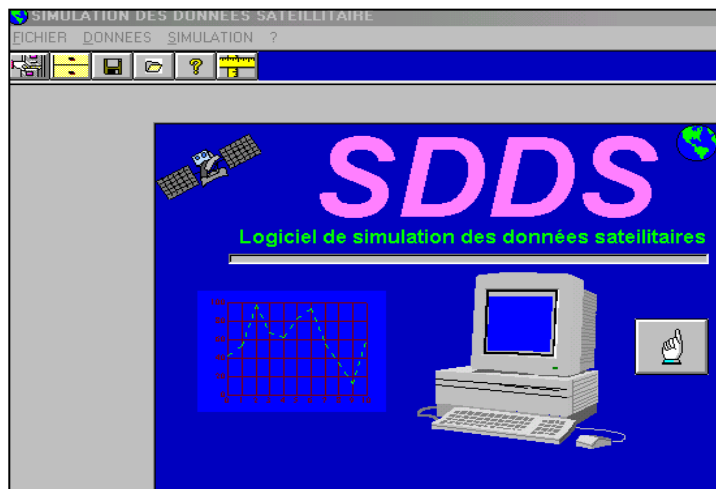
Nous définissons les bandes spectrales nécessaires qui peuvent être utilisées pour déterminer la distribution spatiale des paramètres, en transformant des images satellites brutes en images indicatrices des grandeurs physicochimiques par l'application des droites d'ajustement obtenues à partir des meilleures régressions et les valeurs des coefficients de corrélation calculés.

## 2. Présentation du logiciel « SDDS »

Le calcul de luminance et de réflectance nécessite le développement d'un modèle de simulation du transfert radiatif à travers l'atmosphère dans des conditions réalistes (Tableau 1.3), qui permet d'évaluer l'importance des effets de l'atmosphère et des conditions de prise de vue sur les images satellitaires.

Nous avons utilisé le logiciel de « Simulation des données satellitaires » SDDS (figure 1.8) développé en langage 'Visual Basic 4', sa principale fonction est le calcul de la radiance spectrale réfléchi par la cible au niveau du capteur et la détermination du rayonnement diffus par une masse d'eau.

Pour déterminer les différentes radiations au sol, les données d'entrées sont des paramètres astronomiques, géographiques et atmosphériques.



**Figure 1.8** : Présentation du logiciel « SDDS » d'application de la simulation des données satellites.

On introduit les données astronomiques et les données atmosphériques :

### a. Données astronomiques :

- \* **Le jour** : valeur entre 1 pour le 1er Janvier et 365 pour 31 Décembre.
- \* **Heure** : heure du prélèvement.
- \* **Latitude** : valeur entre 0 et 360°
- \* **Béta0** : caractérise l'inclinaison de la surface par rapport à l'horizon, entre 0° et 90°.
- \* **Phi** : L'angle Azimutal solaire entre -90° et +90°.
- \* **Z** : Altitude du lieu en Km

**b. Données atmosphériques :**

- \* **Ozone** : quantité d’ozone présente dans l’atmosphère, entre 0 et 0.5.
- \* **Humidité relative** : entre 0 et 1.
- \* **Température** : en degré Kelvin  $T = T^{\circ}\text{C} + 273$
- \* **Visibilité** : en kilomètres.
- \* **Altitude de l’ozone** : caractérise la position du centre de gravité de la couche d’Ozone.
- \* **Alpha** : relié à la distribution et le diamètre de la particule d’aérosol généralement, valeur entre 0.5 et 2.5.
- \* **Fc** : facteur qui dépend des dimensions des particules, de leur nature et de la longueur d’onde entre 0 et 1.
- \* **Wo** : dépend de la nature de la matière, des aérosols, ses dimensions et ses propriétés optiques ; il varie entre 0.7 et 1.

On regroupe les données dans le tableau suivant :

**Tableau 1.3** : Paramètres d’entrées pour l’application des luminances des stations.

Paramètres atmosphériques	
Ozone Cm	0.30
Humidité relative %	80
Température K	$T^{\circ}\text{C} + 273$
Visibilité Km	20
Altitude de l’ozone	200
Alpha ( $\alpha$ )	1.5
Fc	0.9
$\omega_0$	0.9

Paramètres astronomiques	
Jour	154
Heure	11.26.00
Latitude	$36^{\circ}.6506$
Longitude	$2^{\circ}.4213$
$\beta_0$	0
$\theta_v$	$10^{\circ}$
$\varphi$	$30^{\circ}$
$\psi$	$60^{\circ}$



**Figure 1.9** : Fenêtre d’application de données astronomiques du logiciel *SDDS*.

# **Présentation de la zone d'étude**

## II. Présentation générale de la zone d'étude

### II.1 Baie de Bousmail

Notre site d'étude correspond à la baie de Bousmail (ex : golfe de Castiglione), qui est limité à l'Est par le promontoire de Ras-Acrata et à l'Ouest par le cap du Mont Chenoua. (Figure 2.1) Dans ce vaste domaine maritime, se trouve incluse la baie d'El Djamila. La Baie couvre une superficie de 509 Km<sup>2</sup> avec une ouverture de 40 Km orientée du Sud- Ouest au Nord- Est, soit 2° 54' Est et 36° 48' Nord à 2° 24' Est et 36° 38' Nord.

La région de Bousmail est une zone à vocation touristique et agricole ; sa frange côtière est soumise principalement aux rejets domestiques des villes et des complexes touristiques qui se déversent directement dans le milieu naturel sans aucun traitement au préalable dans la plupart des cas s'accroissant en période estivale. Ajoutant à cela les rejets d'eaux usées véhiculées par les oueds qui traversent les centres urbains et qui se déversent en mer, drainant les eaux de ruissellement des terres agricoles, des effluents urbains et industriels. L'apport de ces eaux usées rejetées par les communes côtières en 1995 était de l'ordre de 19 014.74 m<sup>3</sup>/j.

En plus de ces activités, les oueds entraînent vers la mer, une partie des eaux usées de Blida et de la base centrale logistique de Beni Mered au niveau de l'oued Macta Makhoulf (continuité de l'oued Beni Azza) où se déversent les eaux usées de la tannerie du moulin, d'une unité d'électroglace, mobilier métallique, d'une unité de transformation de plastique, d'industrie agroalimentaire ainsi que les eaux des ateliers de traitement de surface de la base logistique de Beni Mered. A cela s'ajoute la pollution due à l'activité agricole et à l'activité de la pêche.

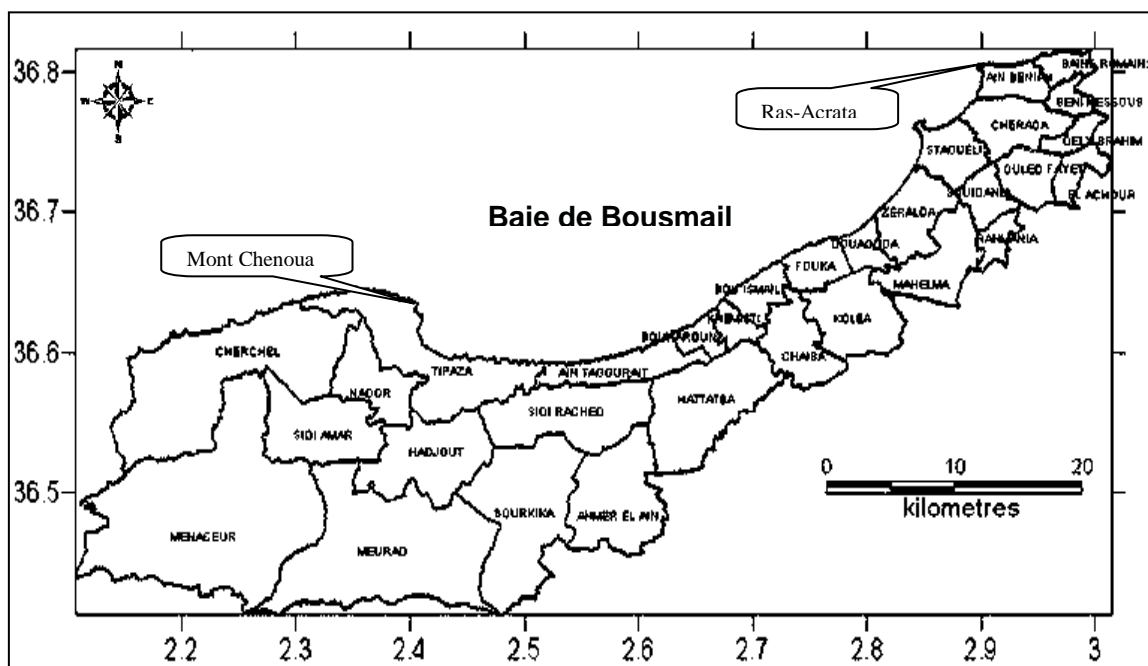


Figure 2.1 : Localisation géographique de la baie de Bousmail.

### II.1.1 Morphologie sous-marine de la baie de Bousmail

Le plateau continental de la baie de Bou-Ismaïl présente une extension maximale de 11 km (il est très étroit à proximité des massifs : 4 km pour le Chenoua, moins de 2 km pour Bouzaréah). Il a une surface de 509 Km<sup>2</sup> et une largeur de 55 km. Sa longueur se rétrécit au niveau des caps (2km à 3km) et s'élargit au milieu de la baie (11Km en face du Mazafran).

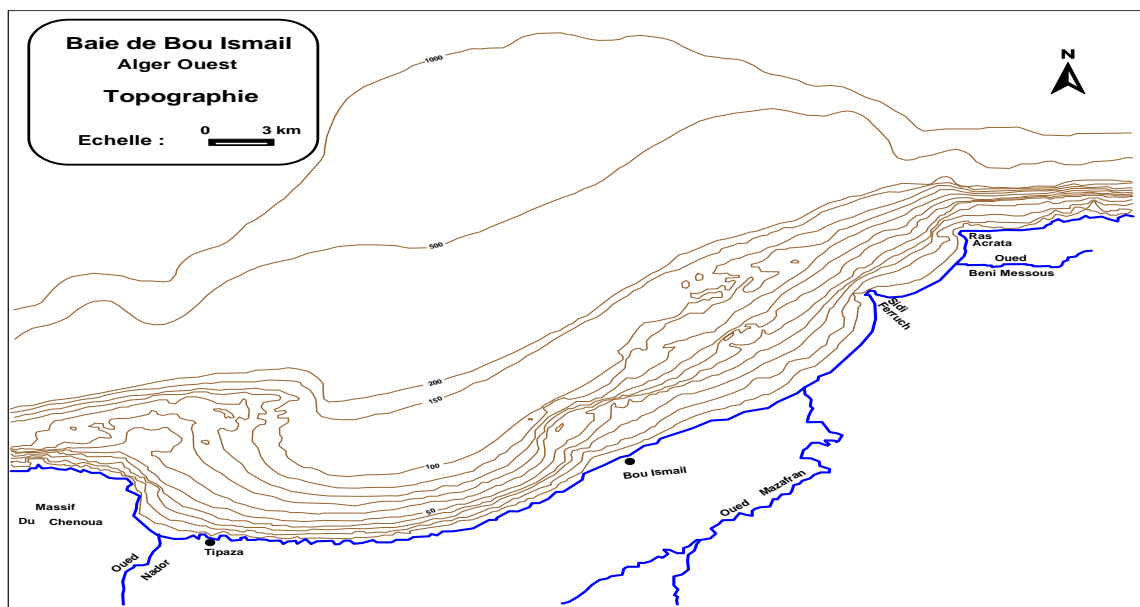
La pente est douce et perturbée par quelques appointements rocheux localisés au large de Mazafran de Bou-Ismaïl.

Sa déclivité augmente après la première rupture de pente (- 120 m), marquant la limite de ce plateau, au-delà la décroissance est également régulière mais avec une pente moyenne (plus de 1%). Une nouvelle ligne d'inflexion à - 400 m apparaît ; elle marque le début du talus continental en pente forte (10 %) menant aux plaines abyssales (- 2500 m) (Leclaire, 1972).

Leclaire (1972) a dressé une carte de la couverture sédimentaire de toute la baie de Bou-Ismaïl (Figure 2.2), il distingue ainsi trois zones d'affleurement rocheux difficilement chalutables, qui sont comme suit:

1. Le prolongement du massif de Chenoua, lequel rejoint la vallée sous-marine du Ras-Nador depuis la côte jusqu'à l'isobathe 180 m en direction Nord Nord-est.
2. Entre Bouharoun et Douaouda Marine, depuis la côte jusqu'à l'isobathe 100 m
3. Depuis les fonds de 110 à 150 m au Nord de Bou-Ismaïl jusqu'à la hauteur de Sidi- Fredj.

Au niveau de la baie de Bou Ismaïl, le rebord du plateau continental débute à environ 100 m de profondeur, qui surplomb un large méplat une entaille dans la pente continentale, l'isobathe 400m est ainsi rejeté à 14 km du rivage dans le Nord – Est du massif du Chenoua.



**Figure 2.2:** Topographie de la baie de Bousmail (Leclaire, 1972).

### II.1.2 Sédimentologie de la baie de Bousmail

Vers l'embouchure de l'Oued Mazafran et jusqu'à une profondeur de 2,5m, on retrouve les sables grossiers. Au-delà de ce dépôt fluvio-marin et jusqu'à une profondeur de 10m à 15m, on retrouve les sables moyens, qui ne réapparaissent qu'au niveau de Khemisti sur une zone étroite continue jusqu'à Tipaza.

Une bande de sable fin apparaît au large de Sidi Fredj et à Palm Beach à moins de 2m de profondeur et tapisse le fond de 15m à 25m tout le long de la baie. Parallèlement à ce faciès, on retrouve les sables fins vaseux qui longent la côte entre 25m à 40m de profondeur.

Notons qu'au large de Sidi Fredj (2km à 3km), on retrouve un dépôt de sables moyens et graviers. (LEM, 1998)

L'analyse des sédiments de la baie de Bou Ismaïl a permis de mettre en évidence la grande diversité sur le plan sédimentaire des fonds de cette baie, huit faciès identifiés : les sables fins, les sables fins envasés, les vases sableuses, les sables graveleux, les graviers envasés, les sables grossiers et fins graviers, les vases pures, le faciès rocheux (Figure 2.3).

L'importance et la répartition de ces faciès ne sont pas identiques en tout point de la baie. Ainsi deux régions apparaissent : la région Est ou orientale et la région Ouest ou occidentale. Chaque région présente des caractéristiques sédimentologique propres, fait déjà signalée par Dagorne (1970). Les vases pures et les graviers envasés sont les faciès dominants de la baie de Bou Ismaïl. Les vases sont très développées dans la région Ouest et forment ainsi une importante vasière littorale, tandis que les graviers envasés sont dans la région Est. Le faciès des sables grossiers et des fins graviers, le faciès des sables graveleux n'est présent que dans la région orientale; les sables graveleux se limitent au secteur oriental.

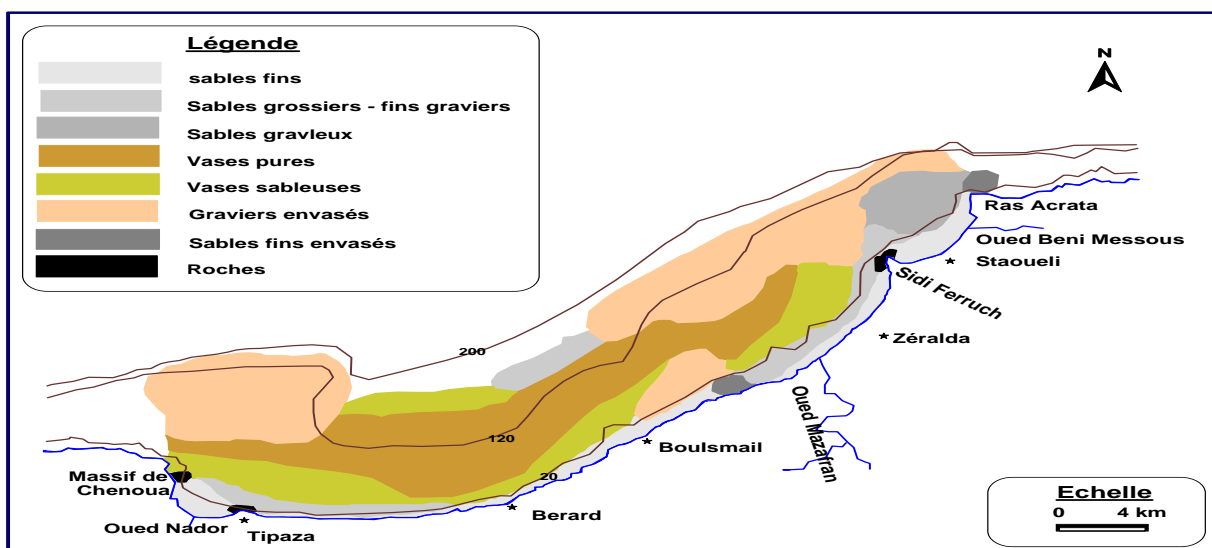


Figure 2.3 : Sédimentologie de la baie de Bousmail (LEM, 1998)

### II.1.3 Courantologie

Les courants induits par la houle au large ou à la côte, sont à peu près les seuls à agir de façon active sur la sédimentation actuelle (Caulet, 1972). La circulation d'un courant le long des côtes africaines est appelée « courant algérien ». Il est défini comme une veine d'eau de surface près du méridien 0°, avec les caractéristiques suivantes : une largeur de l'ordre 50 Km, une profondeur maximum de l'ordre de 150 m, une vitesse maximale supérieure à 50 cm/s. (Benzohra, 1993). (Figure 2.4)

La côte algérienne est caractérisée par ces deux couches d'eaux superposées, l'eau Atlantique modifiée et l'eau Méditerranéenne. En effet, l'eau Atlantique pénètre dans la mer d'Alboran où ses caractéristiques initiales commencent à s'altérer, donnant ainsi naissance à l'eau atlantique modifiée (Benzohra, 1993). Ce même auteur signale cette eau dans le bassin Algérien où elle se reconnaît dans une couche superficielle de 150 m d'épaisseur, avec une température de 15 à 23°C en surface et de 13,5 à 14°C en profondeur et de salinités allant de 36,5 à 38 ‰.

Le long des côtes algériennes, l'eau Atlantique modifiée décrit un écoulement plus ou moins stable avant de se diviser en deux branches. Dans le bassin algérien, l'eau Atlantique modifiée pénétrerait (Millot, 1987 ; Millot, 1993 et Benzohra, 1993) sous forme d'une veine de courant étroite qui donne naissance à des méandres et tourbillons côtier associés à des upwellings. Ces derniers favoriseraient une forte productivité biologique et par conséquent, augmentation des capacités trophiques du milieu.

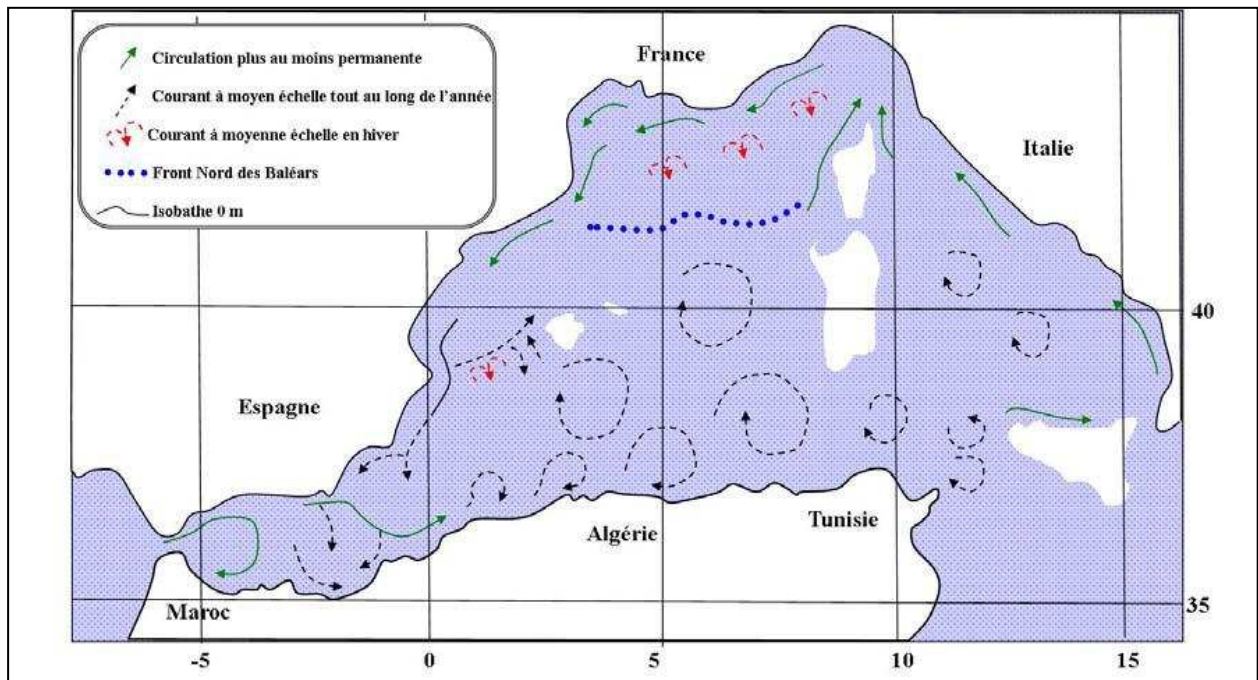


Figure 2.4: Schéma de circulation de l'eau d'origine Atlantique (d'après Millot, 1987)

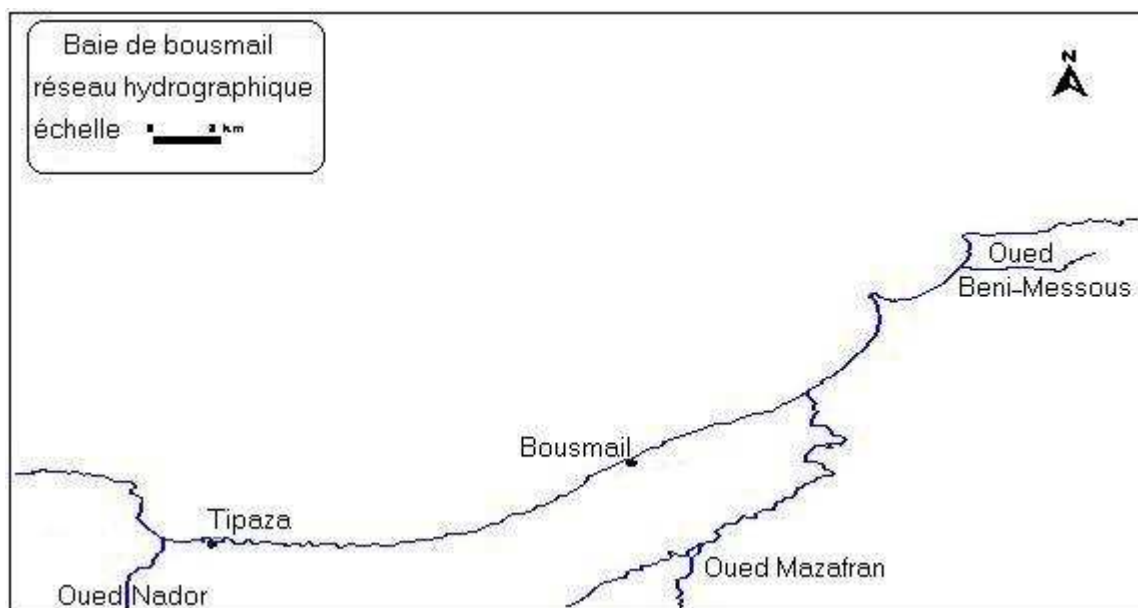
### II.1.4 Réseau hydrographique

Les principaux oueds qui se déversent dans la baie de Bou – Ismail sont au nombre de trois, et sont perpendiculaire (Oued Nador) ou obliques (Oued Beni Messous et Mazafran) à la côte. (Figure 2.5)

**II.1.4.1. Oued Beni Messous** Se situe à 15 Km à l'Ouest d'Alger entre El Djamila et club des pins, aliment la baie d'El Djamila. Il prend source dans le grand Chéraga : il traverse les communes de Chéraga au Nord, Bouzaréah au niveau d'une agglomération appelée "la tribu" au nord Est, Dely Brahim à l'Est et Ain Benian à l'Ouest et débouche au niveau d'une plage appelée "les Dunes" à environ 2 Km à l'Ouest du port d'El Djamila sur une distance de 11.5 Km, regroupant l'Oued Defla et l'Oued Bainem. Son bassin versant est réduit, il est souvent sec, sauf lors des fortes pluies ou il peut raviner une quantité non considérable de sédiments. (Aouidad.Z,1997).

**II.1.4.2. Oued Mazafran** Situé à l'Ouest de Sidi Fredj, l'Oued Mazafran est formé par la ramification des Oueds Djer, Chaffa et Bou-Roumi. Il prend sa source de la plaine de la Matidja. Cet Oued débouche entre Zeralda et Douaouda .Son débit est estimé à environ  $13.8 \text{ m}^3 /\text{s}$ , et couvre une superficie de  $600 \text{ km}^2$  (Aouidad.Z,1997).

**II.1.4.3. Oued Nador** Situé dans la partie occidentale de la baie, il prend son origine à partir de la cluse de Tipaza avant de déboucher dans la petite baie de Chenoua. Il est formé par la réunion des Oueds suivants : Oued Bou-Yersen, Bou-Ardoun et oued Meurad. Son bassin versant a une superficie de l'ordre de 200 à 230  $\text{Km}^2$ . (Aouidad.Z,1997)



**Figure 2.5:** Réseau hydrographique de la baie de Bousmail

## II.2. Baie d'El Djamila

La baie d'El Djamila se situe à une trentaine de kilomètres à l'ouest d'Alger, elle représente le quart oriental de la baie de Bou Ismail. C'est une baie relativement fermée, limitée à l'Ouest par la presqu'île de Sidi Fredj et à l'Est par Ras Acrata (Figure 2.6)

Son rivage est orienté Sud Ouest – Nord Est et ses coordonnées Lambert sont :

2°50'54.744'' Est et 36°45'43.092'' (port de Sidi Fredj)

2°53'42.792'' Est et 36°48'5.796'' (Ras Acrata),

Les vents sont générateurs de vagues et de courants, leur impact croît avec leur vitesse. Lorsque l'action du vent est continue, elle génère de la houle. Les résultats des observations effectuées par l'US naval weather service command au large des côtes d'Alger, notent l'existence de deux périodes distinctes :

**Une période hivernale :** (Octobre – Mars) avec des vents dominants de secteur Ouest et Nord Ouest ; avec des fréquences allant de 60 à 88% par le secteur Ouest et des fréquences de 90 à 99% pour le secteur Nord Ouest.

**Une période estivale :** (Avril – Septembre) avec des vents dominants de secteur Est et Nord Est ; avec des fréquences de 45 à 75% pour le secteur Nord Est. (LEM, 1998).

Puisque la côte algérienne est caractérisée par de faibles profondeurs, les courants marins sont relativement faibles. Les données recueillies à partir d'observations enregistrées au large des côtes algériennes par le RMNI (*Institut Météorologique Royal Néerlandais*) montrant que :

- Plus de 73% du temps, les courants ont une vitesse inférieure à 0.5 nœud (0.25 m/s)
- Plus de 90% du temps, ces courants ont une vitesse inférieure à 1 nœud (0.5 m/s)
- Dans seulement 1% du temps, des courants d'une vitesse plus grande que 2 nœuds (1 m/s) ont été observés.

**En hiver :** les houles les plus importantes et les fréquences observées viennent de l'Ouest avec les plus grandes amplitudes entre 2 et 2.5 m. Les houles maximales peuvent atteindre les 4 à 6 mètres.

**En été :** les directions les plus observées sont d'origine Est, ainsi que les houles Nord Est avec une fréquence moins importante et des amplitudes généralement plus faibles, de 0.5 à 1m. Le secteur Nord a une répartition assez régulière durant l'année.



**Figure 2.6 :** Situation géographique de la baie d'El Djamilia.

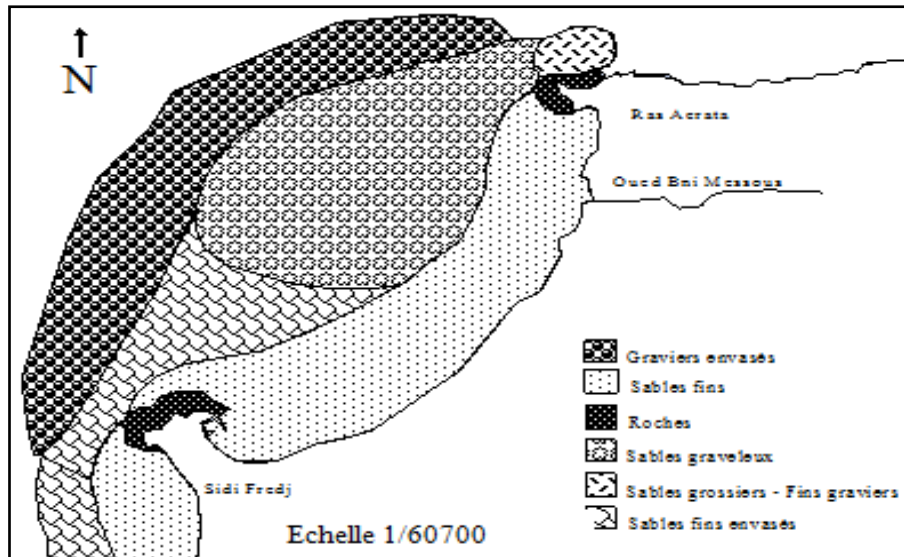
### II.2.1. Dynamique sédimentaire.

La dynamique sédimentaire est la résultante d'actions hydrodynamiques (ou fluides) et solides, réagissant l'un sur l'autre (Broman *et al.*, 1988). Son équilibre est très sensible à tout changement pouvant entraver son processus. La dominance du sable grossier est notée surtout au voisinage du port d'El Djamilia, ces sédiments sont bien classés (Al Sid ChiKh *et al.*, 2009).

Au niveau de la côte à l'est du port d'El Djamilia, le dynamisme est important, provoqué par l'intensité des houles de l'Ouest, et de Nord – Ouest. Ces houles ont contribué au démantèlement de la falaise du Ras Acrata et du platier rocheux.

Ces houles de secteur Ouest, Nord–Ouest sont d'incidence frontale sur le site, engendrant un courant de retour qui prend les sédiments de la côte et les dispersent au large. Ainsi les sédiments les plus fins se déposent au large. Ces houles provoquent ainsi bien l'érosion de la cote située à l'Ouest du port d'El Djamilia (Zéralda, Sidi Fredj, Moretti, Staouéli, etc....) que le charriage des apports de l'Oued Mazafran.

L'incidence oblique des houles du secteur Ouest engendre une dérive littorale qui entraîne les matériaux sableux vers l'Est dans le domaine infralittoral. La dérive littorale s'écoulant de l'Ouest présente un impact très important en charriant les sédiments vers l'Est. (Millot, 1985)



**Figure 2.7** : Répartition sédimentologique de la baie d'El Djamila (Campagne 2006 in Houma 2009)

### II.2.2. Bathymétrie

Les isobathes du centre de la baie sont pratiquement parallèles à la côte, avec une faible pente, au niveau de Ras Acrata (à l'Est) et Sidi Fredj (à l'Ouest). Un resserrement des isobathes qui se traduit par une pente moins douce qu'au centre de la baie, ceci étant normal vu que les deux zones sont rocheuses et accidentées.

Plus à l'ouest (Moretti) entre les isobathes 5m et 15m, on a une large zone régulière à pente très douce.

## II.3. Les différentes infrastructures présentes sur la baie

### II.3.1-Le port de Sidi Fredj

Le port de plaisance de Sidi Fredj est implanté en 1969 dans la partie orientale du Cap à 24 km à l'Ouest d'Alger, la constitution de ce socle rocheux lui offre une assise très stable. Ses coordonnées géographiques sont : 36°45'54'' Nord. 02°50'54'' Est .Il est destiné pour abriter les flottes de plaisance (L.E.M, 1998).

Le port est semi fermé, d'une superficie de 4ha, il comprend :

- un plan de masse d'eau qui est réparti en cinq (5) bassins.
- des appontements qui jouent le rôle d'une passerelle pour assurer une occupation équilibrée du plan d'eau.
- des épis qui jouent le rôle de protection contre la houle et les apports solides du littoral.



**Figure 2.8** : Image satellitaire du port de plaisance de Sidi Fredj.

### **II.3.2-Le port de Bouharoun**

Le port de Bouharoun est le principal port de pêche au niveau de la délégation maritime de Cherchell qui comprend entre autres les ports d'EL DJAMILA, de TIPASA, de KHEMISTI et CHERCHELL. S'orientant de l'ouest vers l'est, ce port n'a été réaménagé qu'en 1979 et sa mise en exploitation date du début de l'année 1980 (Figure 2.9).

Il est situé à 45 km à l'Ouest d'Alger au centre de la baie de Bou-Ismaïl orienté Nord-Est Sud-Ouest. Il est classé comme le premier port de pêche dans la région centre (EGPP, 2006).

Les coordonnées géographiques du port d'après le L.E.M sont :

- Longitude Est :  $2^{\circ} 39'$
- Latitude Nord :  $36^{\circ} 37'$

Le port de BOUHAROUN est constitué, de deux bassins, l'un couvrant une superficie de  $15500\text{m}^2$  est destinée aux sardiniers, palangriers et petits métiers, l'autre d'une superficie de  $14280\text{m}^2$  est réservé pour les chalutiers uniquement.

Le port de Bouharoun est présenté comme l'un des principaux producteurs en divers produits de pêche, et surtout en poisson bleu de la Baie de Bousmail.



**Figure 2.9:** Image satellitaire du port de pêche de Bouharoun

#### **II.4. Sources de pollution dans la baie de Bousmail**

La baie de Bousmail est caractérisée par une agriculture bien développée et plus fertile utilisant des pesticides polluants les nappes phréatiques par infiltration au niveau de la vallée de oued Damous, Messelmoun, et oued Bellah.

Les rejets domestiques et les rejets des complexes touristiques sont énormes parce que la baie fait partie de la zone d'expansion touristique (ZET) et qui s'accroissent en période estivale à cause des nombreuses unités industrielles, tous ces rejets sont évacués directement dans le milieu marin sans aucun traitement préalable (Tableau 2.1).

**Tableau 2.1** : Les rejets d'eaux usées dans la wilaya de Tipaza

(Étude d'aménagement du littorale .Wilaya de Tipaza, synthèse-bilan diagnostic 2006).

Communes	Nombre de rejets	Débitm <sup>3</sup> /j	Lieu de rejet
Bou-Ismaïl	9	4000	Mer
Bou-Haroun	4	320	Mer
Khemisti	6	400	Oued Khemisti et Mer
Fouka	5	3600	Mer
Douaouda	5	1600	Oued Mazafran et Mer
Tipaza	8	7140	Mer
Cherchell	8	3600	
Sidi Ghiles	2	480	
H.Ennous	2	160	
Meselmoun	3	1100	
Gouraya	3	900	
Larhat	3	312	
Damous	3	960	
Ain Tagourait	6	320	
<b>Total</b>	<b>67</b>	<b>24 892</b>	

L'urbanisation ou la littoralisation s'accompagnera inévitablement d'un flux supplémentaire de populations sur les zones sensibles avec les effets négatifs. En plus de ces activités, les oueds entraînent vers la mer les eaux usées de Blida et de la base centrale logistique de Beni mered aux niveau de l'oued Macta Makhoulouf qui n'est que la continuité de l'oued Beni Azza où se déversent les eaux usées de la tanneries du moulin, d'une unité d'électroglace, mobilier métallique, d'une unité de transformation de plastique et d'industrie agro-alimentaire ainsi que les eaux des ateliers de traitement de surface de la base logistique située à Beni mered. à tous cela s'ajoute la pollution issue des ouvrages portuaires existants dans la baie : Port de Pêche de Bou Haroun, Port de Pêche de Khemisti, Port de plaisance et abris de pêche de Tipaza, Abris de pêche d'El-Djemila, Port de plaisance de Sidi Fredj, Port de plaisance de Palm Beach.

**Matériel**  
**Et**  
**Méthodes**

### III.1. Travaux effectués en mer

#### III.1.1. Prélèvement d'eau et localisation des stations

Dans le but d'avoir une variété de mesures et une vue sur l'état de la pollution dans la baie de Bousmail nous avons réalisé plusieurs prélèvements dans différentes stations. Deux sorties en mer ont été organisées. Les échantillons d'eau de mer ont été prélevés pour l'étude des hydrocarbures polycycliques aromatiques, et des différents paramètres physico-chimiques. La première sortie en mer a été effectuée le 03/06/2010 et la deuxième campagne en 03/01/2011 à bord de navire Océanographique *MS BEN YAHIA*.

Le procédé utilisé pour le prélèvement de l'eau de mer de surface est préconisé par l'U.N.E.P (Programme des Nations Unies pour l'Environnement 1995). Le dispositif recommandé pour le prélèvement des échantillons d'eau se compose d'une bouteille propre de verre fumé de 2.5 litres de capacité (une bouteille à solvant convient parfaitement), placée sur un support lesté. Nous avons utilisé une bouteille à goulot étroit (2 à 3 centimètres de diamètre intérieur) pour qu'elle se remplisse lentement après s'être enfoncée dans l'eau.

Pour identifier les échantillons, il faut établir un relevé, en notant la position en degrés minutes de latitude et de longitude, la date et l'heure locale du prélèvement. Des précisions concernant le milieu doivent être fournies lorsque cela est possible. Une étiquette doit être fixée à la bouteille contenant l'échantillon et porter le numéro inscrit sur le relevé ainsi que le lieu, la date et l'heure du prélèvement.

Il faut indiquer la profondeur des prélèvements si les échantillons sont recueillis à plus d'un mètre de profondeur.

L'eau de mer est récoltée à l'avant du navire en arrêt afin de réduire les risques de contamination par le bateau. La bouteille de prélèvement est ancrée dans un filet puis lestée et plongée entre 0 et -1m. La première extraction d'hydrocarbures est effectuée avec 50ml de solvant (Hexane). La bouteille de prélèvement est rangée à l'obscurité dans un endroit frais.

#### III.1.2. Prélèvement des sédiments superficiels

Le prélèvement du sédiment superficiel a été effectué au moyen d'une benne preneuse de type Van Veen dans des zones à bathymétrie comprise entre 4 et 20m. La benne est constituée d'acier inoxydable, a un poids d'environ 25 Kg et à une section d'impact de 0,19 m<sup>2</sup>. Avant l'envoi de la benne par gravité, les deux bras leviers sont écartés de chaque côté, avec les mâchoires ouvertes. Au contact du fond, le mécanisme de fermeture se déclenche et quand le câble est tiré pour remonter la benne, les mâchoires se referment. Une fois la benne remontée, les échantillons sont récupérés à l'aide d'une spatule en acier qui est à chaque fois lavée pour éviter toute contamination, ils sont ensuite mis dans des piluliers en verre.

Les échantillons de sédiments marins superficiels, dans l'attente d'être traités au laboratoire, sont congelés à  $-18^{\circ}\text{C}$ . La congélation permet de conserver pour l'essentiel les propriétés chimiques des échantillons, et d'éviter une contamination avec le milieu ambiant et les pertes d'éléments volatils.

### **III.1.3. Mesure des paramètres physico-chimiques**

Les paramètres physico-chimiques sont mesurés à la surface et en eau profonde. Nous avons utilisé une bouteille de type NISKIN pour les prélèvements et une valise multiparamétrique pour les mesures.

#### **III.1.3.1. Température (T)**

C'est une caractéristique physique importante, elle joue le rôle dans la solubilité des sels et surtout des gaz. Sa mesure est nécessaire pour accéder à la détermination du champ de densité et des courants. D'une façon générale la température des eaux superficielles est influencée par la température de l'air et ceci d'autant plus que leur origine est moins profond.

#### **III.1.3.2. Salinité S ‰ ou (P.S.U (Practical Salinity Unit)**

La salinité est une propriété de l'eau de mer qui est fondamentale à l'étude du milieu marin, (Aminot, 2004), elle forme avec la température deux descripteurs de base des masses d'eaux.

Les mesures de salinité ont été réalisées par la méthode conductimétrique grâce à un conductimètre de type WTW 315 i /Set qui permet la mesure de la conductivité ainsi que la salinité de l'eau de mer. Il affiche aussi les valeurs de températures.

#### **III.1.3.3. Potentiel d'hydrogène (PH)**

Le PH de l'eau de mer résulte de sa composition ionique et essentiellement de la présence des carbonates issus de l'échange de dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) entre l'eau et l'atmosphère. C'est un paramètre chimique caractérisant l'acidité ou la basicité d'un milieu. Le PH dépend de la teneur en dioxyde de carbone; c'est à dire une modification de  $\text{CO}_2$  (Respiration, photosynthèse, échange air-mer) entraînera donc une modification du PH (Rodier, 2005).

Le PH a été mesuré in situ à l'aide d'un PH mètre de type PH 315i il affiche aussi les valeurs de températures.

#### **III.1.3.4. Oxygène dissous (OD)**

L'oxygène moléculaire dissous est un paramètre important du milieu qui gouverne la majorité des processus biologiques des écosystèmes aquatiques. La concentration en oxygène dissous est la résultante des facteurs physiques (température, échange air-mer et la salinité), chimiques (oxydation chimique) et biologiques (photosynthèse, respiration et régénération) (Rodier, 2005).

La teneur en oxygène dissous peut subir des variations importantes. Elle dépend de la température et de la salinité de l'eau, de la pression et de la température de l'air. Le déficit en oxygène est évalué

par la teneur en matière oxydable (Burns & Saliot, 1986). Dans les eaux de surface l'oxygène joue un rôle fondamental dans le maintien de la vie aquatique et dans les phénomènes d'auto-épuration. Afin d'évaluer les teneurs en oxygène dissous, des mesures sont effectuées, in situ, à l'aide d'un oxymètre WTW Oxi197i muni d'une sonde électrolytique que l'on plonge dans la bouteille de prélèvement, ensuite les valeurs de l'oxygène dissous et la température s'affichent par une unité de mg/l et °C. L'appareil est étalonné à la pression atmosphérique.

### III.1.3.5. Matière en suspension (MES)

Les matières en suspension dans les eaux de mer sont des matières minérales ou organiques de dimensions très variables. Elles comportent tous les composés ayant un diamètre supérieur à 0.45µm et elles peuvent être un indice de pollution.

La détermination des matières en suspension est essentielle pour évaluer la répartition de la charge polluante entre la pollution dissoute et la pollution sédimentable. Elles présentent une surface de contact importante pour des échanges chimiques ou biologiques avec l'eau de mer (Aminot & Chausse-Pied, 1983), elles peuvent être considérées comme des transporteurs importants des polluants, fertilisants, toxiques, biologiques (Lacaze, 1996).

L'analyse de cette dernière consiste à faire passer sur une membrane filtrante qui aura été préalablement pesée P1, une quantité connue d'effluent à analyser. Après passage à l'étuve à 110°C, la membrane est à nouveau pesée P2. La différence entre P2 et P1 représentera la quantité de matières retenues sur la membrane filtrante, puis séchée lors du séjour en étuve ; se sont les MES, elles s'expriment en mg/l. La concentration de la matière en suspension (MES) s'obtient donc par l'expression :

$$\text{MES (mg/l)} = \frac{P2 - P1}{V} \quad (3.1)$$

P1 : Poids du filtre avant filtration (mg).

P2 : Poids du filtre après la filtration (mg).

V : Volume d'eau filtrée en litres.

## III.2. Travaux effectués aux laboratoires

### III.2.1. Conditionnement du matériel utilisé

La bouteille doit être nettoyée parfaitement et rincée comme indiqué ci-après :

- Lavage à l'eau et à la lessive classique.
- Rinçage à l'eau acidulée à 5%.
- Rinçage à l'eau distillée.
- Rinçage à l'acétone C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>O.
- Séchage à l'étuve à 70°C pendant 24h.
- Rinçage au solvant (Hexane).

### III.2.2. Préparation des produits d'analyse

Les produits d'analyse solides et liquides utilisés sont répertoriés dans les tableaux suivants :

#### III.2.2.1. Produits solides

**Tableau 3.1:** Référence et utilisation des produits chimiques solide dans le traitement des hydrocarbures

Produit solide	Références	Marque	Matrice utilisée	Etape d'utilisation
<b>Florisil (MgO: 15,5%. SiO<sub>2</sub>: 84% Na<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>:0,5%)</b>	-Florisil R 100 a 200 mesh ASTM. -destiné à la chromatographie sur colonne. - PH = 8,5.	MERCK	eau de mer.	-purification en chromatographie sur colonne ouverte.
<b>gel de silice(SiO<sub>2</sub>)</b>	-70 - 230 mesh -ASTM ou (0,032-0.063mm). -PH (10%,20°C).pour colonnes chromatographiques.		eau de mer Sédiment marin.	-fractionnement des hydrocarbures en chromatographie sur colonne ouverte.
<b>alumine ou oxyde d'alumine (AL<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)</b>	-70 - 230 mesh. -PH neutre	B.D.H	eau de mer Sédiment marin.	-fractionnement de l'échantillon en chromatographie sur colonne ouverte.
<b>sulfate de sodium anhydre(Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)</b>		B.D.H	eau de mer Sédiment marin.	pouvoir déshydratant (utilisé dans toutes les étapes pour l'eau et le sédiment marins).

#### Préparation des adsorbants

Le Florisil, le gel de silice, et l'alumine servant en chromatographie à colonne ouverte sont conditionnés comme suit :

##### -Etape d'activation

Une quantité d'adsorbant pesée et mise à l'étuve à 120°C pendant 24 heures.

##### - Etape de désactivation partielle

L'adsorbant est ensuite désactivé partiellement par addition de 5% d'eau distillée. De même, les produits solides (alumine, gel de silice et sulfate de sodium) ainsi que la laine de verre, les cartouches en cellulose font l'objet d'une extraction à blanc. Cette étape intermédiaire permet leur nettoyage avec de l'hexane pur dans le dispositif Soxhlet pendant 4 heures.

### III.2.2.2. Les produits liquides

**Tableau 3.2** : Références et utilisations des produits chimiques liquides dans le traitement des hydrocarbures

Produit liquide	Références	Marque	Matrice utilisée	Etape d'utilisation
<b>n-Hexane</b> (C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> )	- pour analyses des résidus de pesticides pour I.R.	-B.D.H -R.D.H.	-eau et sédiment marins	- Extraction - Purification - fractionnement
<b>dichlorométhane</b> (C <sub>12</sub> CH <sub>2</sub> )	- Stabilise à l'amylène. - Stabilise à 0,5% d'éthanol.	-R.D.H Pestanal®	-eau et sédiment marins	- Extraction - Purification -fractionnement
<b>Acétone</b> (C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O)	- pour analyses de résidus de pesticides. - eau < 1%. - pour U.V. spectroscopie.	-Fluka chemika.		-Rinçage de la verrerie.

### III.2.3. Quantification de la matière organique dans l'eau de mer

Les hydrocarbures sont introduits dans le milieu marin de différentes manières en s'associant à de la matière organique. Lorsque les hydrocarbures polyaromatiques sont présents à la surface de l'eau de mer, ils s'incorporent au sédiment marin par le biais des pelotes fécales du zooplancton selon *Grimalt et al (1988)*. Afin d'établir une éventuelle corrélation entre les teneurs d'hydrocarbures et le pourcentage de matière organique, la méthode de "pertes au feu" (*Castel et al, 1990*) est adoptée. Cette opération est effectuée sur tous les échantillons:

Les filtres de 0.4 µm de diamètre de pores, ont été préparés de la même façon que pour la matière en suspension. Ils sont alors pesés avec précision dans des creusets en porcelaine, soit P<sub>1</sub>. Après les avoir passés au four à moufle à 450°C pendant deux heures, les creusets et filtres sont à nouveau pesés, soit P<sub>2</sub>. La différence de ces deux poids (P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub>) nous donne celui de la matière organique brûlée :

$$\text{M.O (mg)} = \text{P}_1 - \text{P}_2 \quad (3.2)$$

Avec :

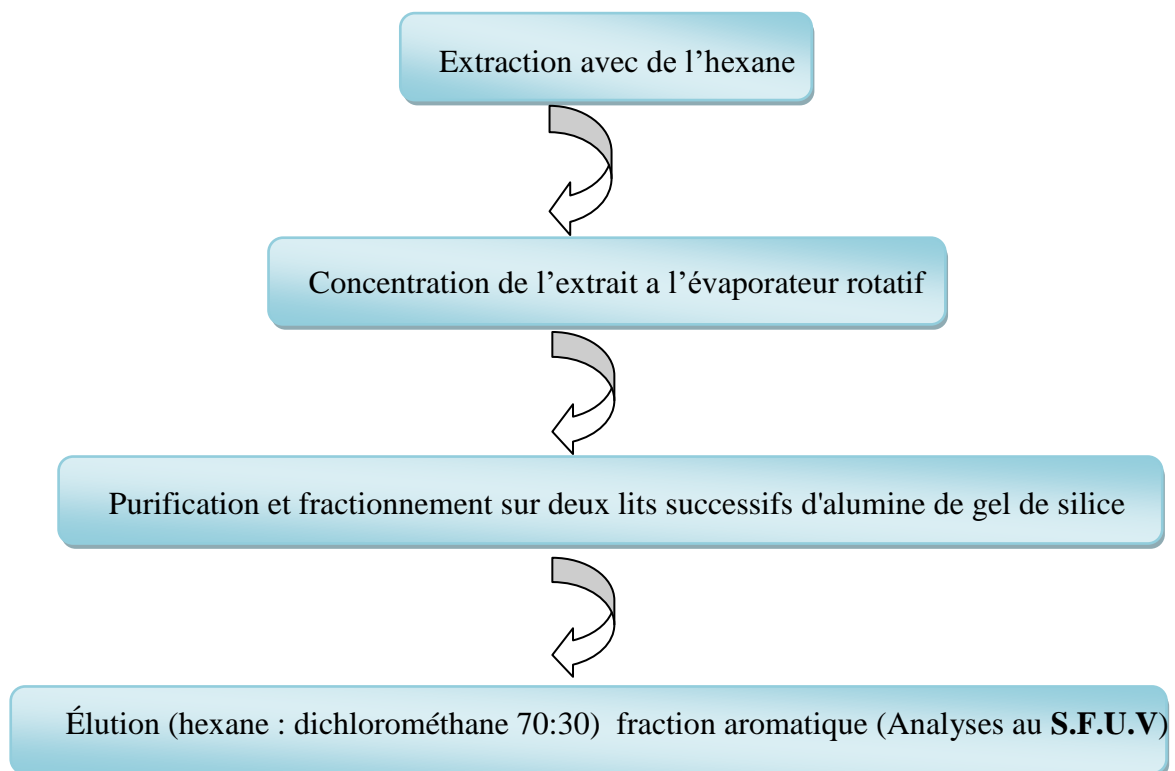
**P<sub>1</sub>** : poids du creuset et du filtre avant séchage

**P<sub>2</sub>** : poids du creuset et du filtre après séchage

### III.2.4. Traitement de l'eau de mer pour l'analyse des hydrocarbures

Les échantillons d'eau de mer ont été rapidement traités afin de minimiser les pertes ou les contaminations par les hydrocarbures. Le protocole appliqué est inspiré des normes françaises T90-114 et T90-203 de l'AFNOR (1972 a et b) (Roussel, 1983) et approuvés par les experts de la C.O.I (1982). Il se base sur deux grandes étapes :

- extraction liquide-liquide.
- purification et fractionnement.



**Figure 3.1** : Diagramme récapitulatif des principales étapes de traitement pour l'analyse des hydrocarbures dissous/dispersés dans l'eau de mer.

### III.2.4.1. Protocole d'extraction des hydrocarbures dissous /dispersés

#### • Extraction

Le procédé d'extraction adopté est celui décrit par [Roussel et Marchand \(1983\)](#). L'extraction des échantillons doit être pratiquée dès que possible après le prélèvement (il faut ajouter «*in situ*» 50 ml de l'hexane et agiter pendant 3 minutes pour chaque échantillon). En principe, elle doit être effectuée en mer si les conditions et l'espace disponible le permettent. Sinon, elle doit être faite dès que le navire arrive à terre. Les échantillons ne doivent en aucun cas être conservés plus de trois à quatre heures avant l'addition de solvant et ils doivent être gardés au frais et dans l'obscurité ([COI, 1984](#)).

Une seconde extraction est réalisée au laboratoire avec 50ml d'hexane. Et comme ce dernier est un solvant organique plus léger que l'eau, au moment de l'agitation il permet la dispersion du solvant dans l'eau de mer et la formation d'une phase organique non miscible, piégeant ainsi les hydrocarbures présents dans l'eau. Cette extraction se fait par agitation mécanique dans une ampoule à décanter pendant 10 minutes. Après décantation, la phase organique supérieure de l'ampoule est récupérée dans un erlenmeyer à col rodé. Une pincée de sulfate de sodium ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) anhydre est ajoutée afin d'absorber d'éventuelles traces d'eau dans l'extrait.

#### • Concentration de l'échantillon

La concentration de l'extrait d'eau de mer est réalisée dans le but d'éliminer le solvant d'extraction à l'aide d'un évaporateur rotatif. L'échantillon donc est concentré jusqu'à un volume d'environ 5ml au bain Marie à une température voisine de 40°C. Cette température est uniquement nécessaire à l'évaporation du solvant. L'échantillon est placé dans un évaporateur rotatif BUCHI R110 muni d'un thermostat. Ce dispositif est raccordé à une pompe aspirante d'une étanchéité au vide inférieure à 1 torr soit à 1,3 millibar. La concentration est une étape intermédiaire qui permet de diminuer le volume du contenant (solvant) dans l'échantillon et de travailler ainsi avec des volumes réduits et manipulables.

#### • Purification

Le solvant organique utilisé piège non seulement les hydrocarbures mais aussi tous les composés organiques polaires tels que les lipides et les acides gras. Afin d'éliminer ces derniers et d'isoler les hydrocarbures, une purification est réalisée par le biais d'une chromatographie d'adsorption sur colonne ouverte. Une colonne en verre de 30ml de volume avec un diamètre interne de 10mm contenant la phase stationnaire, 5g de Florisil (100-200 mesh ASTM) conditionnée, est préparée. Elle est garnie à l'extrémité supérieure par du sulfate de sodium. Le Florisil est maintenu à l'extrémité inférieure par de la soie de verre. La préparation de la colonne se fait par la méthode humide. L'adsorbant est préalablement mélangé au solvant. Cette solution est ensuite introduite dans la colonne. L'élution est effectuée avec 20ml d'hexane. L'éluat récupéré a un volume final de 20ml.

### • Concentration

Une seconde concentration, très délicate cette fois-ci à cause du faible volume final est réalisée. En effet, l'échantillon est évaporé à sec sous jet d'azote et repris avec 5ml d'hexane. Le protocole de la C.O.I (1984) souligne le risque de perte au-dessous d'un volume de 200 $\mu$ l.

### • Purification et fractionnement

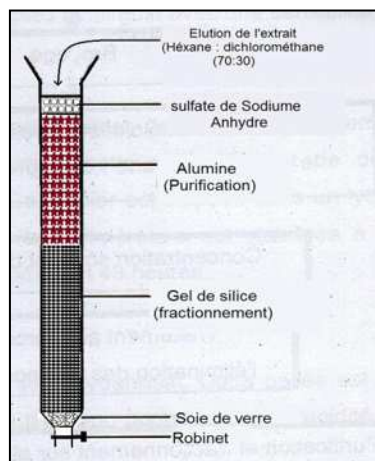
Cette méthode utilise la chromatographie sur colonne ouverte moyennement de l'alumine neutre (pouvoir de purification) et du gel de silice (pouvoir séparateur et/ou rôle de fractionnement) conditionnés. Ces deux composés (70-230 mesh) sont agencés en deux lits successifs :

- L'alumine, est située dans la partie supérieure de la colonne.
- Le gel de silice au-dessous

La quantité utilisée est de cinq gramme pour chacun d'entre eux. L'extrémité supérieure contient du sulfate de sodium. L'extrémité inférieure de la colonne est occupée par de la soie de verre (Figure 3.2).

Une première élution est effectuée sur l'extrait avec 20 ml d'hexane pur (F1 ou fraction aliphatique).

Une seconde élution est réalisée avec un mélange de 20ml d'hexane et de dichlorométhane dans les proportions 70 :30 (F2 ou fraction aromatique).



**Figure 3.2** : Purification et fractionnement par chromatographie sur colonne ouverte.

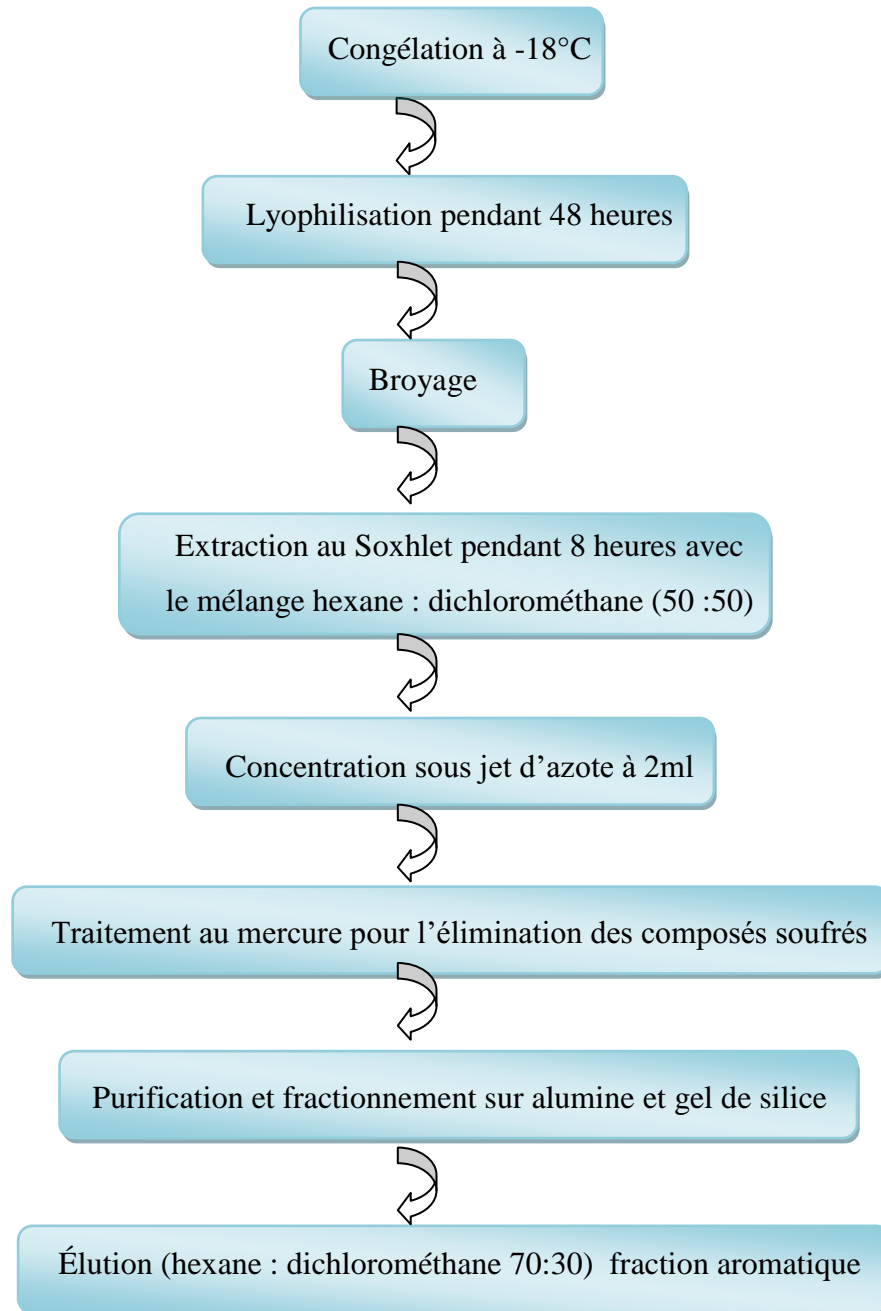
### III.2.5. Traitement du sédiment superficiel marin pour l'analyse des hydrocarbures

Le sédiment, prélevé avec une benne van-veen en fer galvanisé, est récolté (environ 150g) avec une spatule en acier inoxydable et congelé à bord du navire dans des piluliers en verre à -18°C.

La conservation des échantillons à basse température permet de bloquer les processus d'évaporation et de dégradation microbienne pouvant altérer les composants organiques du sédiment parmi lesquels les hydrocarbures.

En effet, les échantillons sont transportés rapidement dans une glacière et remis au congélateur à  $-18^{\circ}\text{C}$  au laboratoire.

Le diagramme suivant décrit le protocole expérimental préconisé par la C.O.I (1982)



**Figure 3.3 :** Diagramme récapitulatif des principales étapes de traitement pour l'analyse des hydrocarbures dans le sédiment superficiel marin.

### III.2.5.1. Protocole d'extraction des hydrocarbures dans le sédiment

#### • Pesée du poids frais (P.F) ou poids humide

Chaque échantillon est pesé avant d'être déshydraté. Les pesées sont réalisées dans le but de déterminer le pourcentage d'eau piégée dans le sédiment après l'opération de lyophilisation. Les pesées sont effectuées sur une balance électronique avec une précision de 4 chiffres.

#### • Lyophilisation

Passage de l'eau sous forme solide (état de cristaux) directement sous forme gazeuse. Appelée sublimation, cette étape permet de dessécher ou de déshydrater l'échantillon à froid. Ce dernier est disposé dans un lyophilisateur. La température est stabilisée à  $-40^{\circ}\text{C}$  avec une pression sous cloche de  $10^{-1}\text{atm}$  pendant 48 heures.

#### • Pesée poids sec (P.S)

Une seconde pesée est réalisée sur le lyophilisat. Cette pesée est appelée « **pesée poids sec P.S** ». le pourcentage d'eau ou pourcentage d'humidité contenu dans le sédiment est calculé comme suit :

$$\% \text{eau} = (\text{P.F} - \text{P.S}) / \text{P.F} \times 100 \quad (3.3)$$

#### • Broyage

Le sédiment est broyé en poudre fine dans un mortier en porcelaine préalablement conditionné. Cette étape est permet de libérer les polluants incrustés dans les particules du sédiment.

#### • Homogénéisation

L'objectif est de répartir uniformément tous les polluants au niveau des particules sédimentaires. Cette opération est réalisée avec un agitateur vibrant.

#### • Extraction

Un dispositif appelé batterie d'extraction ou Soxhlet est indispensable pour l'extraction des hydrocarbures (Figure 3.4). Cette opération permet d'extraire, par lessivage, tous les hydrocarbures contenus dans le sédiment avec un mélange de solvants. Celui-ci se compose d'hexane et de dichlorométhane dans les proportions 50:50. Le volume de solvant consommé est de 150ml. Des grains "boiling ships" sont introduits avec les solvants pour obtenir une température homogène comprise entre  $65$  et  $72^{\circ}\text{C}$  dans toute la phase organique.

5g de sédiment broyé sont déposés dans une cartouche en cellulose Wattman (préalablement nettoyée lors d'une extraction à blanc avec de l'hexane pendant 4 heures. Chaque série d'extraction est complétée avec :

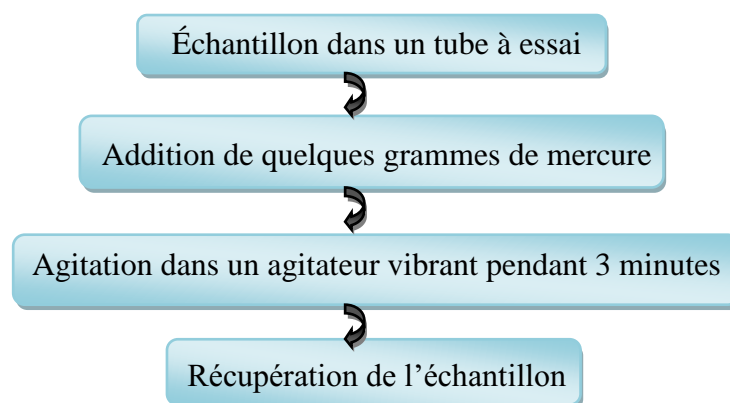
- Un blanc de procédure contenant du  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .
- un échantillon d'intercalibration lyophilisé fourni par l'Agence Internationale de l'Energie Atomique (A.I.E.A). deux sédiments d'intercalibration ont été traités :



Figure 3.4 : Un extracteur Soxhlet

#### • **Élimination des composés soufrés/ traitement au mercure**

Les sédiments marins contiennent une part importante de soufre, particulièrement ceux riches en matière organique. Le soufre résulte en particulier, de l'oxydation de la matière organique des milieux anaérobies. Cet élément interfère dans les analyses de spectrofluorimétrie U.V. et en chromatographie en phase gazeuse. Afin d'optimiser les résultats et d'éliminer les contraintes de cet élément, un traitement au mercure préconisé par le protocole utilisé, est appliqué à tous les échantillons de sédiment. Le diagramme suivant résume les étapes de traitement au mercure :



L'échantillon est concentré puis récupéré dans un tube à essai conditionné. Quelques grammes de mercures y sont ajoutés. Une agitation de 3 minutes avec un agitateur vibrant est effectuée.

Lorsque le soufre a été piégé par le mercure, ce dernier noirci. L'opération est répétée autant de fois que nécessaire et cela jusqu'à ce que le mercure garde sa couleur d'origine (gris argenté).

#### • Purification et fractionnement

Cette opération est identique à celle décrite pour l'eau de mer. Deux lits successifs de gel de -silice et d'alumine (70-230 mesh) permettent d'obtenir deux fractions :

F1 : Fraction aliphatique après élution avec 25 ml d'hexane.

F2 : Fraction aromatique après élution avec 25 ml d'un mélange d'hexane/dichlorométhane (70 :30).

### III.3. Technique d'analyse des hydrocarbures

Différentes techniques ont été mises en œuvre pour l'analyse des polluants organiques marins. Les méthodes spectrales avec la chromatographie en phase gazeuse offrent des résultats particulièrement satisfaisants du point de vue quantitatif et qualitatif.

La Spectroscopie est une technique d'analyse des molécules qui se base sur la manière dont celle-ci absorbe les radiations. Parmi les techniques les plus souvent utilisées en chimie organique, nous avons utilisé dans notre travail la spectrofluorimétrie à rayonnement ultraviolet (S.F.U.V).

#### III.3.1. Spectrofluorimétrie à rayonnement ultraviolet (S.F.U.V)

La SFUV sensible essentiellement aux hydrocarbures aromatiques, elle ne permet pas un dosage au sens strict des hydrocarbures totaux dans un échantillon marin; les teneurs mesurées ne représentent pas réellement les concentrations absolues d'hydrocarbures. Par contre, la réponse de fluorescence fournit un excellent indice de pollution pétrolière, du fait des très faibles teneurs en hydrocarbures aromatiques biogènes dans le milieu marin. La SFUV est beaucoup plus sensible que la SIR : la limite de détection est de l'ordre de 0,1 g/l pour l'eau de mer (Roussel, 1983).

La SFUV est préconisée par la COI, (1984) pour la surveillance de la pollution par les hydrocarbures en mer. Elle permet d'apprécier globalement la teneur en hydrocarbures aromatiques. Elle est très sensible et peu sujette aux interférences. Elle ne fournit que très peu d'informations sur la nature des produits dosés lorsque les longueurs d'onde d'excitation et d'émission sont fixées.

##### III.3.1.1.Principe

La fluorescence est un phénomène qui se produit en deux phases :

• **L'excitation** : l'excitation d'une molécule par une radiation électromagnétique ultraviolette est un phénomène rapide qui se traduit par le transfert d'un électron d'une orbitale liante vers une orbitale antiliante. La molécule passe ainsi de son état électronique fondamental vers un état excité. L'ensemble des transitions électroniques constitue le spectre d'excitation. La radiation ultraviolette

de même que la lumière visible possède suffisamment d'énergie pour transférer des électrons vers des orbitales antiliantes créant ainsi un état électronique excité.

• **L'émission** : le retour à un état électronique de moindre énergie ou désactivation est relativement stable. Il fait intervenir un grand nombre de transitions produisant chacune l'émission d'une radiation dans toutes les directions. L'ensemble des transitions constitue le spectre d'émission du rayonnement de fluorescence. L'intensité de la fluorescence est proportionnelle à la concentration de l'échantillon à condition que cette dernière soit comprise dans la gamme étalon. Cette technique s'applique en particulier aux molécules possédant des liaisons doubles conjuguées tels que les hydrocarbures aromatiques et polyaromatiques.

### III.3.1.2. Appareillage analytique.

Les hydrocarbures polyaromatiques sont analysés avec un spectrofluorimètre HITACHI modèle 650-10s, équipé d'une lampe à xénon avec des fentes de 1.5 nm à 20 nm et un balayage allant de 220 à 830 nm. L'appareil contient des cellules en quartz de 1 centimètre de trajet optique, polies sur les quatre faces. Un volume minimal de 0,5ml d'échantillon est suffisant à l'analyse.

### III.3.1.3. Etalonnage et préparation des standards.

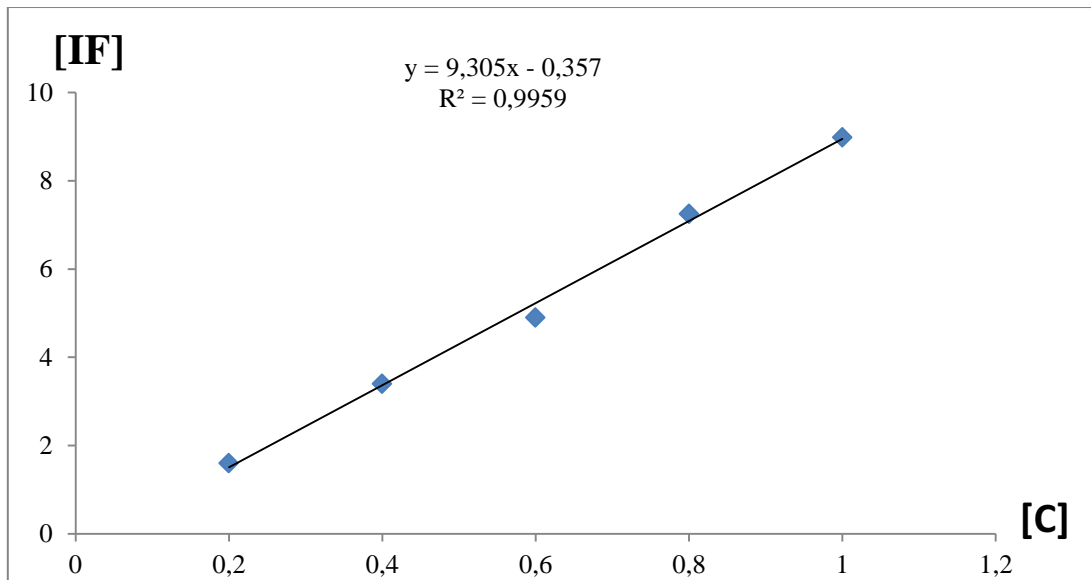
La standardisation de l'appareil nécessite un hydrocarbure de comparaison ou étalon de référence. Celui préconisé est le chrysène ou 1,2 benzophenanthrène ( $C_{18}H_{12}$ ).

La gamme étalon se compose de 2 mg de chrysène dissous dans 10ml d'hexane soit de 10mg/50 ml ou bien 200 $\mu$ g/ml. Cette préparation est la solution mère ou solution initiale. Un volume de 1 ml est prélevé de cette dernière et dilué dans 25ml afin d'obtenir une solution intermédiaire de 8  $\mu$ g/ml. A partir de cette seconde solution, des dilutions sont réalisées pour aboutir aux cinq solutions filles ou gamme étalon.

**Tableau 3.3** : Concentrations des différents standards préparés à partir de la solution mère.

Etalon	S1	S2	S3	S4	S5
Concentration ( $\mu$ g/ml)	0,20	0,40	0,60	0,80	1,00

Les fioles contenant les solutions standards sont placées dans un bac à ultrasons pendant deux minutes dans le but de faire dissoudre le chrysène dans de l'hexane.



**Figure 3.5 :** Courbe d'étalonnage à 360 nm pour le dosage des HPA par SFUV.

#### III.3.1.4. Le blanc de procédure

Le blanc analytique provient impérativement des réactifs utilisés, en particulier des solvants. Pour le déterminer, on prend le même volume de solvant (n-hexane) que l'on a utilisé pour l'extraction d'un échantillon et on lui fait subir exactement le même traitement. Dans ce cas, une purification et un fractionnement à blanc sont réalisés.

#### III.3.1.5. Limite de détection

La limite de détection est la résultante des mesures effectuées sur les blancs échantillons, elle est de 0,1 ppm pour l'eau de mer. En pratique, différents facteurs peuvent influencer la détection limite, parmi lesquels, la sensibilité des appareillages et la qualité du traitement des échantillons. Cette donnée indique d'éventuelles contaminations survenues en pratique. L'augmentation du seuil de détection révélerait l'importance des contaminations. L'utilisation des blancs de procédure permet de contrôler les étapes de traitement et d'écarter la contamination des échantillons.

#### III.3.1.6. Limite de Quantification méthodologique

La limite de quantification méthodologique des HAP a été évaluée pour les matières liquides aqueuses et les matières solides respectivement. Ces LQ sont respectivement de l'ordre de 0,15  $\mu\text{g/l}$  et 0,03  $\text{mg/kg}$ . La LQ pour des HAP dans les matières dangereuses liquides et solides est fixée arbitrairement à 100  $\text{mg/kg}$ , soit 10 % de la norme la plus sévère selon le Règlement sur les matières dangereuses.

### III.3.1.7. Reproductibilité de la SFUV

La reproductibilité d'une méthode est un terme statistique qui implique sa précision, celle-ci définit jusqu'à quel degré une détermination représentative d'une substance dans un échantillon donnera une mesure qui approche la moyenne d'un nombre infini de détermination de même échantillon (C.O.I, 1982).

La reproduction de la spectrofluorimètre à rayonnement ultraviolet est testée pour l'eau et le sédiment marin sur des échantillons à concentration moyenne.

a- L'eau de mer

La reproductibilité est effectuée sur un échantillon de concentration moyenne, les lectures se font à 360nm, 380nm et 410nm avec une excitation à 310nm. Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau suivant :

**Tableau 3.4:** Test de reproductibilité sur la lecture de la concentration d'un échantillon d'eau de mer

Paramètres	360nm	380nm	410nm
Moyenne	1.003	0.525	0.161
Ecart-type	±0.011	±0.03	±0.01
Erreur relative %	1.530	3.579	10.889
Précision %	98.469	96.427	89.112

La précision et la reproductibilité de la S.F.U.V sont prouvées par les résultats obtenus avec une augmentation de l'erreur relative à 410nm qui est le domaine d'absorption minimale des HPA.

b- Sédiment superficiel marin

De même que pour l'eau de mer, la reproductibilité est vérifiée sur un échantillon de concentration moyenne. Les lectures se font aux mêmes longueurs d'ondes avec une excitation à 310nm. Les résultats obtenus sont condensés dans le tableau suivant :

**Tableau 3.5:** Test de reproductibilité sur la lecture de la concentration d'un échantillon de sédiment

Paramètres	360nm	380nm	410nm
Moyenne	0.760	0.124	0.754
Ecart-type	±0.029	±0.074	±3.651
Erreur relative %	3.021	20.524	3.651
Précision %	95.845	79.501	96.324

Les résultats montrent que la technique est reproductible. La précision est satisfaisante quelle que soit la longueur d'onde d'émission elle est de 95.979% pour la longueur d'onde où la fluorescence est la plus intense soit à 360nm.

### III.3.1.8. Mesure des intensités de fluorescence

Les concentrations des hydrocarbures polyaromatiques sont déterminées à partir de courbe étalon.

Les conditions opératoires à la lecture des intensités de fluorescence (IF) sont les suivantes :

- ◆ L'analyse de l'échantillon nécessite une longueur d'onde d'excitation 310 nm.
- ◆ L'émission de fluorescence est mesurée entre 310 et 500nm pour des longueurs d'ondes d'émission fixées à 360 nm, 380nm et 410 nm avec un pic d'absorption maximale à 360 nm pour les hydrocarbures aromatiques polynucléaires.
- ◆ L'ouverture des fentes d'excitation et d'émission est respectivement égale à 2 nm et 5 nm.

L'intensité de fluorescence (IF) est proportionnelle à la concentration C de l'échantillon dans la gamme étalon de réponse linéaire du spectrofluorimètre déterminée par la courbe d'étalonnage.

Elle permet d'établir le tracé d'une droite d'étalonnage pour chaque longueur d'onde d'émission  $\lambda = 360$  nm,  $\lambda = 380$ nm,  $\lambda = 410$ nm à partir des données de lecture correspondant aux 3 longueurs d'onde précisées.

Les droites d'étalonnage ont la forme suivante :  $IF = a C + b$  (3.4)

**IF** : intensité de fluorescence en unité arbitraire U.A

**C** : concentration en hydrocarbures polyaromatiques HPA (en  $\mu\text{g/ml}$ )

**a** : pente de la droite

**b** : ordonnée à l'origine.

### III.3.1.9. Calcul des concentrations finales en hydrocarbures polyaromatiques

Les concentrations en hydrocarbures aromatiques sont :

Pour l'eau :

$$[\text{Hydrocarbure}] \mu\text{g/l} = C \times v/V \quad (3.5)$$

Pour le sédiment (poids sec) :

$$[\text{Hydrocarbure}] \mu\text{g/g} = C \times v/P \quad (3.6)$$

**C** : concentration d'hydrocarbures dans l'extrait purifié, déterminé d'après la courbe étalon, après déduction du blanc ( $\mu\text{g/ml}$ ).

**v** : volume d'extrait purifié (ml).

**V** : volume de l'échantillon d'eau de mer extrait (l).

**P** : poids de l'échantillon du sédiment lyophilisé extrait (g).

### III.4. Images satellitaires utilisées

#### 1. Système optique du satellite SPOT

Le système SPOT (Système Pour Observation de la Terre) est une série de satellite d'observation de la terre qui ont été conçu et lancés par le Centre National d'Etudes Spatiales (CNES) de la France, avec l'aide de la Belgique et du Suède. SPOT 1 a été lancé en 1986, et les autres satellites ont été lancés tous les trois ou quatre ans (Bonn, F. et G. Rochon, 1992).

Tous les satellites sont en orbite héliosynchrone polaire à une altitude de 850 Km, ce qui produit une répétitivité de 26 jours.

Tous les satellites SPOT ont deux balayeurs multibandes HRV (Haute résolution visible) à barrettes, qui peuvent opérer indépendamment ou simultanément.

Chaque HRV peut capter en mode panchromatique (une seule bande) et offre une excellente limite de résolution spatiale de 10m. Ils peuvent aussi capter en mode multibande (trois bandes) qui offre une résolution spatiale de 20m.

**Tableau 3.6** : Caractéristiques des bandes du satellite SPOT

Mode/bande	Domaine spectrale (microns)
<b>Panchromatique (PLA)</b>	0,51 - 0,73 (bleu-vert-rouge)
<b>Multispectrale (MLA)</b>	
<b>Bande 1 (XS1)</b>	050 - 0,59 (vert)
<b>Bande 2 (XS2)</b>	0,61 - 0,68 (vert - rouge)
<b>Bande 3 (XS3)</b>	0,79 - 0,89 (proche infrarouge)

SPOT est utile pour les applications qui requièrent une excellente résolution spatiale. Les images SPOT trouvent plusieurs applications dans des domaines qui nécessitent des images fréquentes, telle la foresterie, l'océanographie et l'agriculture.

#### 2. Système optique du satellite LANDSAT

Les satellites de la série LANDSAT portent plusieurs capteurs comme les systèmes de caméras RBV (Return Beam Vidicom), le système MSS (Multi Spectral Scanner), et plus tard, le TM (Thematic Mapper). Chacun de ces capteurs à une fauchée de 185 Km, avec une scène complète de 185 Km sur 185 Km (Bonn, F. et G. Rochon, 1992).

Le système TM observe la terre dans sept gammes optiques qui s'étendent du visible à l'infrarouge thermique en passant par le proche infrarouge.

**Tableau 3.7** : caractéristiques des bandes du satellite LANDSAT (TM)

Bandes	Domaine spectral (microns)
TM 1	0,45 - 0,52 (bleu)
TM 2	0,52 - 0,60 (vert)
TM 3	0,63 - 0,69 (rouge)
TM 4	0,76 - 0,90 (proche infrarouge)
TM 5	1,55 - 1,75 (infra rouge de courte longueur d'onde)
TM 6	10,4 - 12,5 (infrarouge thermique)
TM 7	2,08 - 2,35 (infra rouge de courte longueur d'onde)

La résolution spectrale du LANDSAT TM est de l'ordre de 30m à 40m. Vu la richesse spectrale et la bonne résolution spatiale du système Landsat TM, ce dernier est utilisé pour la cartographie des soles pour des différentes applications, la qualité et la quantification de l'eau, la désertification et les zones côtières etc.

Un autre capteur multi spectrale du LANDSAT : MSS à quatre bandes spectrales. Le MSS capte rayonnement électromagnétique de la surface de la terre provenant de quatre bandes spectrales. Chaque bande possède une résolution spatiale de 60 sur 80 mètres.

**Tableau 3.8** : caractéristiques des bandes du satellite LANDSAT (MSS)

Bandes	Longueur d'onde (microns)
MSS4	0,50 - 0,60 (vert)
MSS5	0,60 - 0,70 (rouge)
MSS6	0,70 - 0,80 (proche infrarouge)
MSS7	0,8 - 0,11 (proche infra rouge)

Le capteur TM apporte plusieurs améliorations. Les données des capteurs TM et MSS sont utilisés pour plusieurs applications comme la gestion des ressources, la cartographie et la surveillance de l'environnement.

**Résultats**  
**Et**  
**Discussions**

Nous allons analyser dans ce chapitre les résultats des paramètres physico-chimiques et paramètres indicateurs de pollution des prélèvements réalisés en mai 2010 et ceux du mois de janvier 2011 respectivement au niveau de la baie de Bousmail.

#### VI-1-Evaluation de l'état de pollution de la baie d'El Djamila

Les résultats des paramètres mesurés au niveau de la baie d'El-Djamila sont résumés dans le tableau suivant :

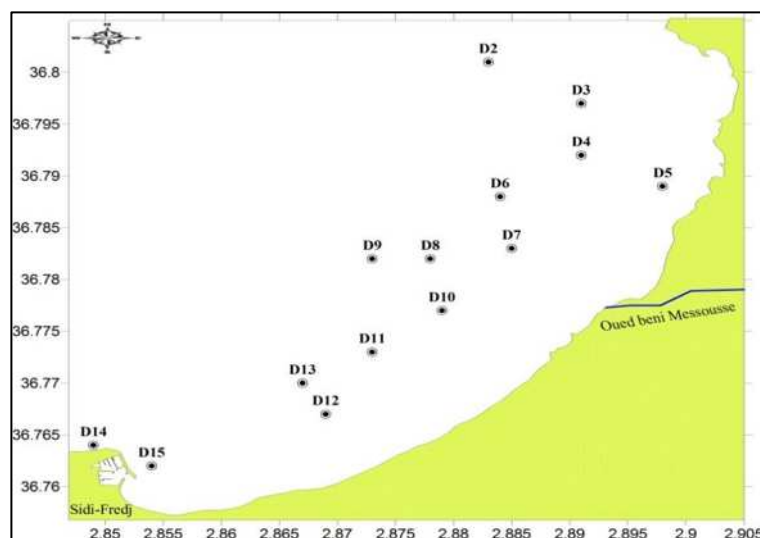
**Tableau 4.1:** Résultats des paramètres mesurés au niveau de la baie d'El-Djamila

Stations	Longitude	Latitude	T°	S%	PH	MES (mg/l)	HAP (µg/L)	HAP (µg/g)	Norme pour l'eau	Norme sédiment
D1	2,888	36,8	19,6	36,6	8,19	80,92	0,359	/	<0.1 µg/l	<12µg/g
D2	2,883	36,801	19,6	36,7	8,2	92,04	/	3,433	//	//
D3	2,891	36,797	19,6	36,5	8,17	79,44	0,372	6,867	//	//
D4	2,891	36,792	19,8	36,6	8,19	79,72	/	3,433	//	//
D5	2,898	36,789	19,8	36,5	8,18	87,28	0,492	4,578	//	//
D6	2,884	36,788	19,7	36,4	8,2	78,32	/	8,011	//	//
D7	2,885	36,783	19,9	36,7	8,19	81,04	/	24,034	//	//
D8	2,878	36,782	19,7	36,7	8,15	84,64	0,284	7,439	//	//
D9	2,873	36,782	19,8	36,2	8,17	75,56	/	5,722	//	//
D10	2,879	36,777	19,8	36,2	8,16	80	0,158	9,156	//	//
D11	2,873	36,773	19,6	36,4	8,16	77,88	0,533	4,578	//	//
D12	2,869	36,767	19,9	36,1	8,22	91,64	/	6,867	//	//
D13	2,867	36,77	20	36,8	8,22	77,48	/	24,034	//	//
D14	2,849	36,764	19,8	36,7	8,2	83,08	/	5,722	//	//
D15	2,854	36,762	20,1	36,7	8,21	79,92	0,265	10,872	<0.1 µg/l	<12µg/g

Les normes sont pour la somme des composés : benzo[b]fluoranthène, benzo[k]fluoranthène, benzo[ghi]pérylène, indéno[1,2,3-cd]pyrène (Journal officiel de la république Française 6-02-2007).

#### ➤ Localisation des stations

Le choix des stations a été effectué de manière qu'elles couvrent la totalité de la baie.

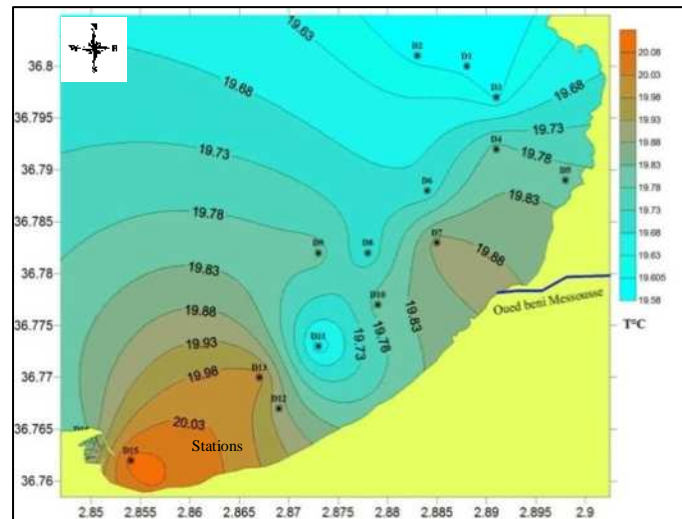
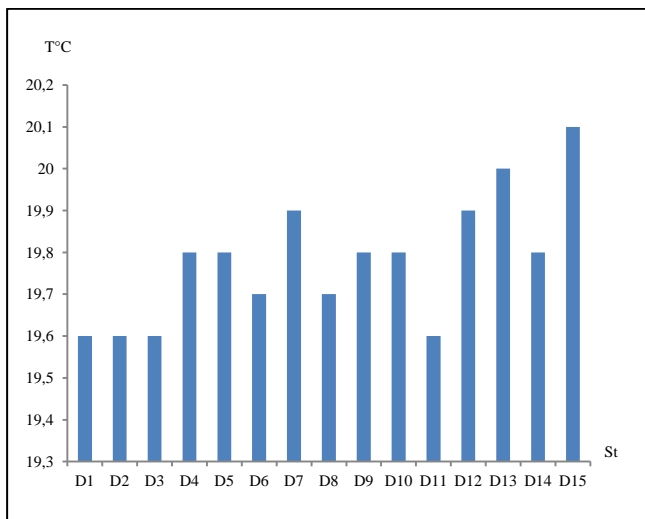


**Figure 4.1:** Localisation des stations dans la baie d'El-Djamila

L'analyse des cartes de la distribution spatiale des paramètres physico-chimiques montre :

➤ **Température**

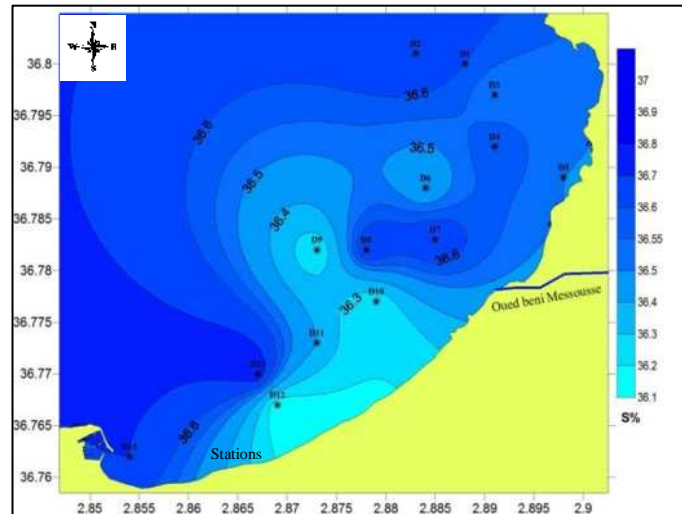
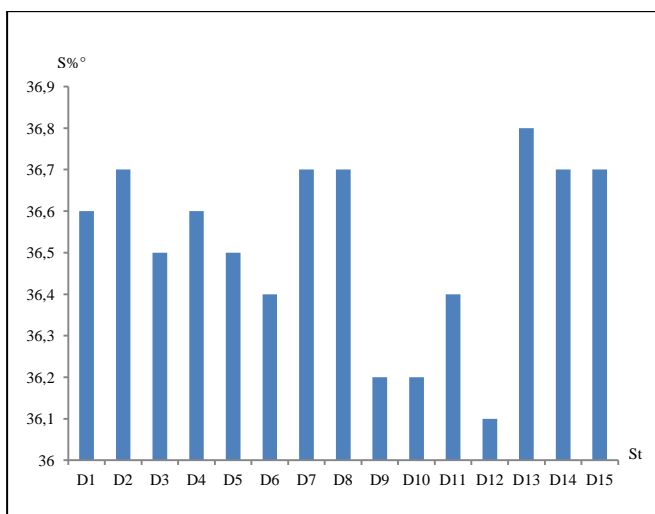
De façon générale les températures mesurées reflètent la période saisonnière en relation avec les conditions météorologiques. Donc les valeurs obtenues sont influencées par celles de l'air ; elles varient entre 19,6 et 20,1 °C, en plus, nous avons constaté que la distribution spatiale de la température est homogène sur l'ensemble des stations, mais en même temps un gradient allant de l'Est vers l'Ouest et de large vers la côte est remarqué. Cette répartition peut être soumise à l'influence du port de Sidi-Fredj et d'Oued Beni Messousse.



**Figure 4.2:** Variation de la température dans la baie d'El-Djamila

➤ **Salinité**

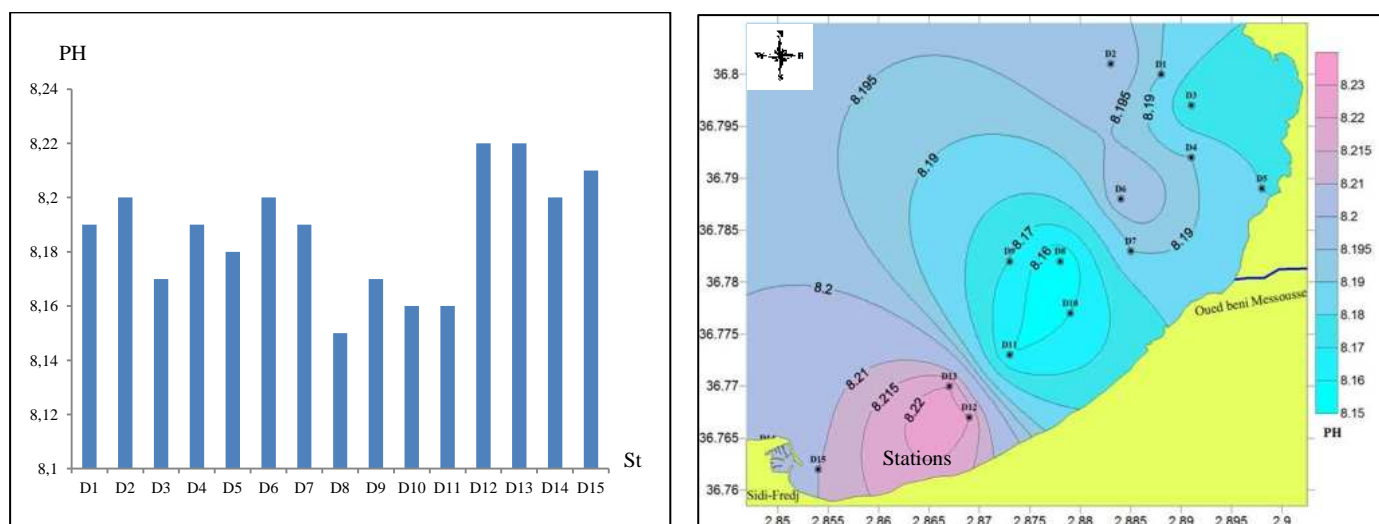
La salinité varie entre 36,1 et 36,8 ‰, elle montre un gradient décroissant en allant du large vers la côte, cela est dû à l'influence des apports d'eau douce dans la baie. Où nous avons remarqué que les valeurs minimales de salinité se situent face à l'embouchure d'oued Beni-Messous qui sont de l'ordre de 36,3 ‰.



**Figure 4.3 :** Variation de la salinité dans la baie d'El-Djamila

### ➤ Potentiel d'Hydrogène :

D'une manière générale, la variation de PH entre les différentes stations est négligeable, en revanche, nous avons vu que les concentrations du PH présentent une distinction entre l'Est et l'Ouest de la baie, les concentrations élevées de la partie occidentale peut être expliquées par les rejets dans le port de Sidi-Fredj et les apports domestiques des complexes touristique dans cette région.

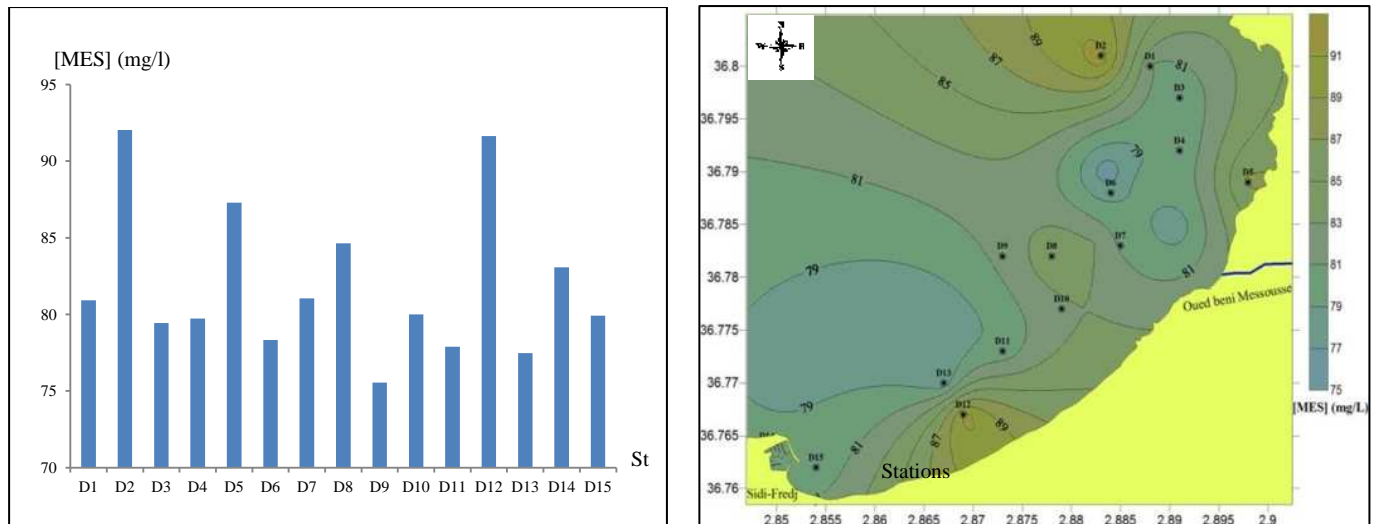


**Figure 4.4:** Variation du PH dans la baie d'El-Djamila

### ➤ Matière en suspension

La matière en suspension est un paramètre important pour étudier la charge de l'eau de mer par la matière organique et minérale. La distribution de celle-ci dépend essentiellement de l'état de la mer ; des courants et de l'agitation. Pour réaliser une étude spatiale de la matière en suspension nous avons présenté les teneurs de cette dernière dans 15 stations qui couvrent la totalité de la baie. La concentration de la matière en suspension augmente au fur et à mesure en s'approchant de la côte et atteint une valeur de 91,64 mg/l auprès de l'hôtel El-Riadh (stations D12) ce qui montre l'influence des rejets domestiques des eaux usées et la mise en suspension des éléments fins par les courants surtout au niveau des faibles profondeurs. Au niveau de la station D2 dans la partie Nord-Est de la baie, une forte concentration en matière en suspension est signalée (atteint 92,04 mg/l), cette station se trouve à 2km de la côte de la ville d'El-Djamila ce qui confirme l'apport important des eaux usées de cette ville.

En plus de ces 2 stations, nous avons observé à l'Est de l'embouchure d'oued Beni-Messous une forte concentration au niveau de la station D5 de l'ordre de 87,28 mg/l Ce qui montre l'influence des eaux usées apportées par les oueds (Boughrira et al, 2011).



**Figure 4.5:** Variation de la matière en suspension dans la baie d'El-Djamila

#### ➤ Hydrocarbures polyaromatiques dans l'eau de mer

Le nombre insuffisant des stations pour l'eau de surface nous a empêché de voir la distribution réelle des hydrocarbures polyaromatiques au niveau de cette baie malgré ça nous avons pu constater que :

La baie d'El-Djamila présente des concentrations en hydrocarbures polyaromatiques comprises entre  $0,158 \mu\text{g/l}$  et  $0,533 \mu\text{g/l}$  avec une moyenne de  $0,352 \mu\text{g/l}$ . L'écart type, inférieur à la moyenne des échantillons indique que la distribution spatiale des hydrocarbures polyaromatiques dans l'eau de surface est peu variable.

Les valeurs les plus élevées se localisent au centre de la baie et dans la partie Est (stations D<sub>5</sub>, D<sub>11</sub>), les lignes d'iso-concentration forment deux zones précises, ponctuelles et peu étendues non loin de la côte au niveau des stations D<sub>5</sub>, D<sub>11</sub>.

La concentration la plus faible est de l'ordre de  $0,158 \mu\text{g/l}$  elle se situe près de la côte face à l'embouchure de Oued Beni Messous.

La variabilité spatiale des hydrocarbures polyaromatiques dans l'eau de mer s'expliquerait d'une part, par des apports potentiels ; d'autre part, par la dispersion des nappes d'hydrocarbures sur l'eau, cette hétérogénéité peut être causée par une dégradation biologique. En effet, selon [Halmann \(1996\)](#), les hydrocarbures polyaromatiques sont ingérés par les organismes marins pour subir par la suite des transformations partielles. Le seston semble jouer un rôle important dans l'augmentation des teneurs en hydrocarbures dans les couches d'eau superficielles. [Broman et al., \(1988\)](#) insistent sur l'importance de ce flux sestonique (apport de matière organique) en période estivale probablement du à l'activité planctonique. Ce qui expliquerait, en partie, les teneurs extrêmes dans certaines stations (D<sub>5</sub> et D<sub>11</sub>).

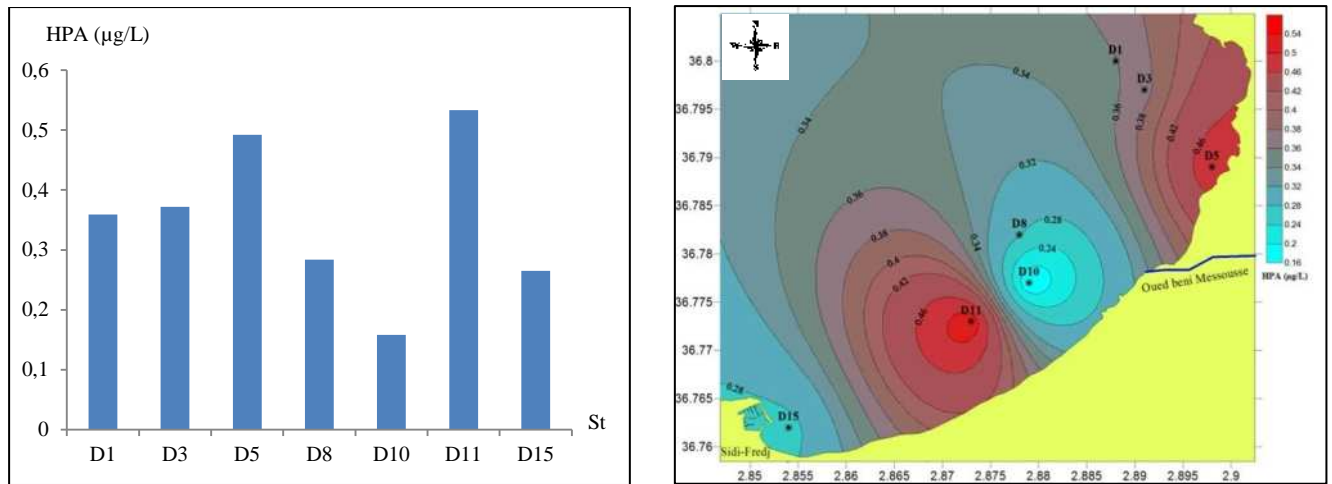


Figure 4.6: Variation des hydrocarbures polyaromatiques dans l'eau de mer

➤ Hydrocarbures polyaromatiques dans le sédiment

Les teneurs des hydrocarbures polyaromatiques varient dans un intervalle de 3.433 µg/g à 24.034µg/g avec une valeur moyenne de 8.91µg/g et un écart type de 6.74µg/g. La teneur la plus faible (3.433 µg/g) a été enregistrée au large de la baie (station D<sub>2</sub>). Les concentrations les plus importantes (24.034µg/g) ont été enregistrées à l'embouchure de l'oued de Beni Messous (D<sub>7</sub>) et à la station(D<sub>13</sub>) devant l'Hôtel Riadh.

En analysant de plus près les concentrations obtenues, nous avons remarqué que pour la majorité des stations de la côte, les valeurs varient entre [3.433 – 9.156 µg/g] mises à part une augmentation des concentrations au niveau des deux stations (D<sub>7</sub> et D<sub>13</sub>) qui se trouvent à l'Est du port de Sidi Fredj et devant l'embouchure de Oued Beni-Messouss, cette pollution ponctuelle est due au trafic portuaire et urbain de la station d'essence et de fioul de l'unité NAFTAL du port de Sidi Fredj.

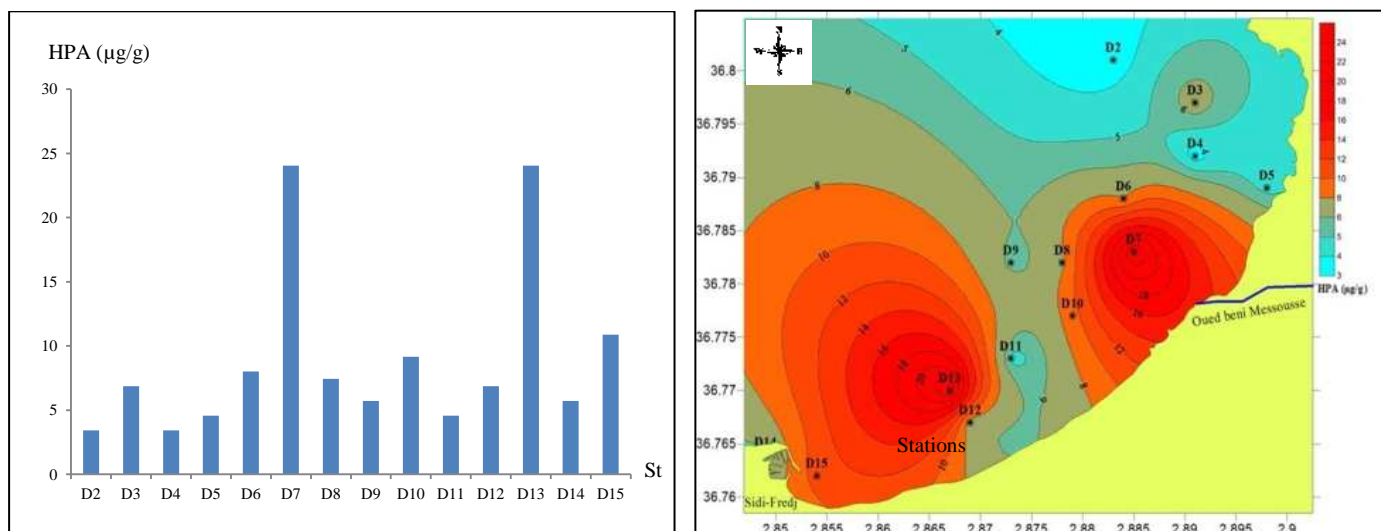


Figure 4.7: Variation des hydrocarbures polyaromatiques dans le sédiment

### IV-2-Evaluation de l'état de pollution au niveau du port de Sidi-Fredj :

Les résultats des paramètres mesurés au niveau du port de Sedi-Fredj sont résumés dans le tableau suivant :

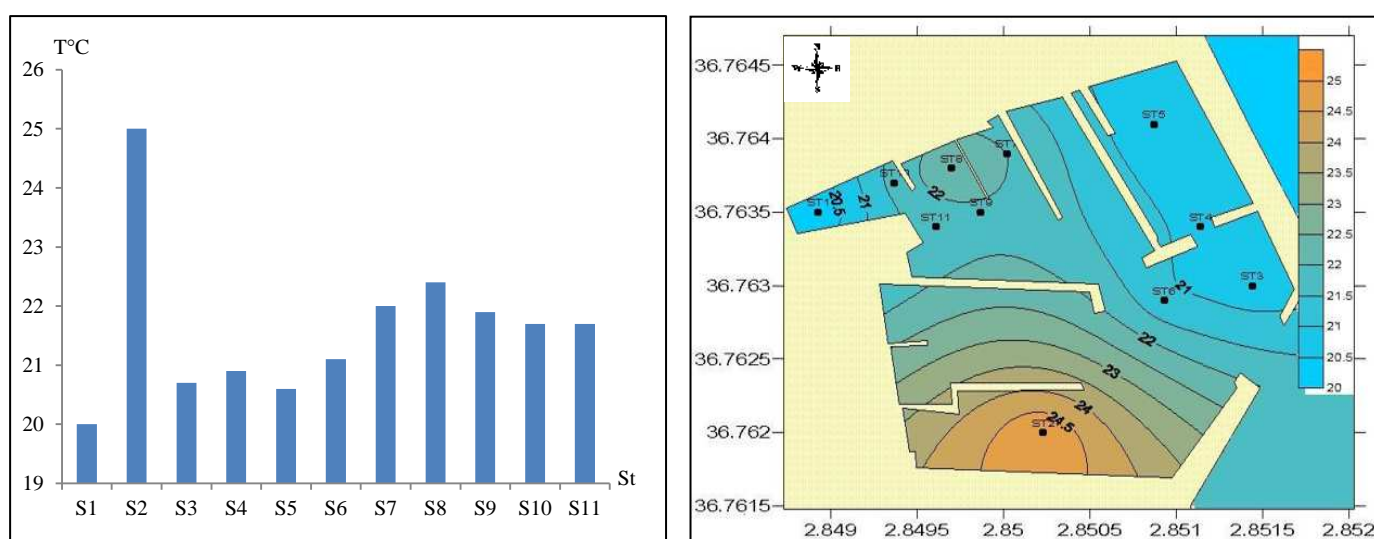
**Tableau 4.2** : Paramètres mesurés au niveau du port de Sedi-Fredj

Stations	Longitude	Latitude	T°	S%°	PH	MES (mg/l)	O <sub>2</sub> dis	HPA (µg/L)
S1	2.84893	36.7635	20	36.6	8.19	83.44	9.9	/
S2	2.85023	36.762	25	36.3	8.22	75.44	9.1	/
S3	2,85144	36,763	20,7	36,48	8,16	78	8,6	0,132
S4	2,85114	36,7634	20,9	36,6	7,92	87,8	8,4	0,284
S5	2,85087	36,7641	20,6	36,6	8,16	75	8,3	0,63
S6	2,85093	36,7629	21,1	36,6	8,12	66	8,6	0,306
S7	2,85002	36,7639	22	36,1	8,11	74,28	8,1	0,309
S8	2,8497	36,7638	22,4	36,2	8,19	90,4	8,3	0,199
S9	2,84987	36,7635	21,9	36,4	8,2	63,16	8,7	0,526
S10	2,84937	36,7637	21,7	36,7	8,17	79,56	8,4	0,479
S11	2,84961	36,7634	21,7	36,7	8,23	87,8	7,8	0,243

L'analyse des cartes de la distribution spatiale des paramètres physico-chimiques montre :

#### ➤ Température

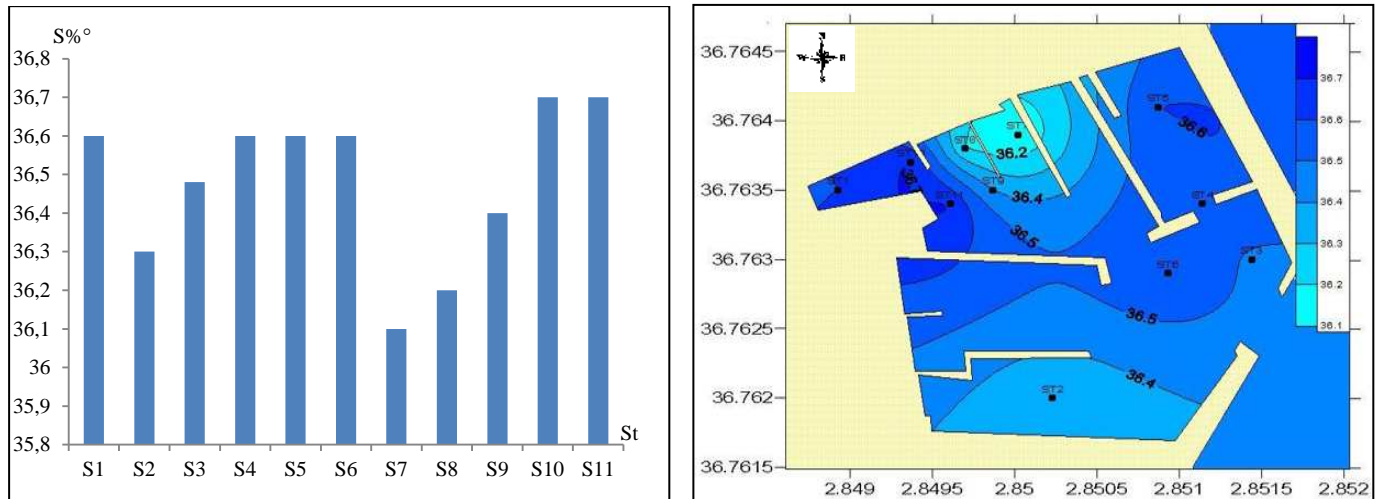
La distribution de la température au niveau du port de Sidi-Fredj varie d'une manière remarquable dont les valeurs les plus élevées sont situées au niveau du bassin limité par le jeté Sud du port ; elle est de l'ordre de 25°C et qui s'explique par l'absence du contact avec les autres bassins par des conduites d'aérations. En revanche, les valeurs les plus basses (de l'ordre de 20°C) se trouvent à l'entourage de la conduite d'aération.



**Figure 4.8** : Variation de la température dans le port de Sidi-Fredj

➤ **Salinité**

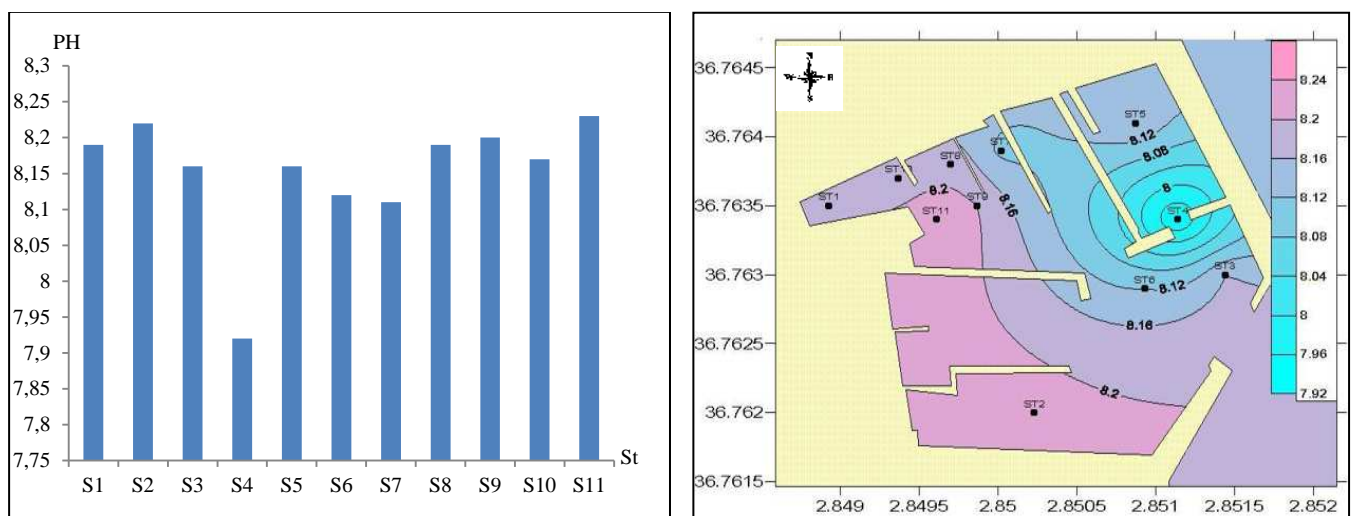
La distribution spatiale de la salinité au niveau du port de Sidi-Fredj montre un gradient allant de 36.1 à 36.7‰ où se voit clairement que la valeur la plus basse est localisée au niveau de la conduite d'aération (stations 7 ; 8) cela est dû aux apports d'eau douce qui viennent des rejets domestiques des restaurants.



**Figure 4.9:** Variation de la Salinité dans le port de Sidi-Fredj

➤ **Potentiel d'Hydrogène**

Les valeurs mesurées du PH montrent un gradient allant de 7.92 au niveau de la station 4 à 8.22 au niveau de la station 2 dont les valeurs les plus élevées se situent dans les bassins semi fermés et qui sont loin de la passe d'entrée et de la conduite d'aération. Cela est dû d'un côté de la procédure de la dégradation de la matière organique et d'autre côté des rejets domestiques des restaurants qui sont situés à bord du port.



**Figure 4.10:** Variation du PH dans le port de Sidi-Fredj

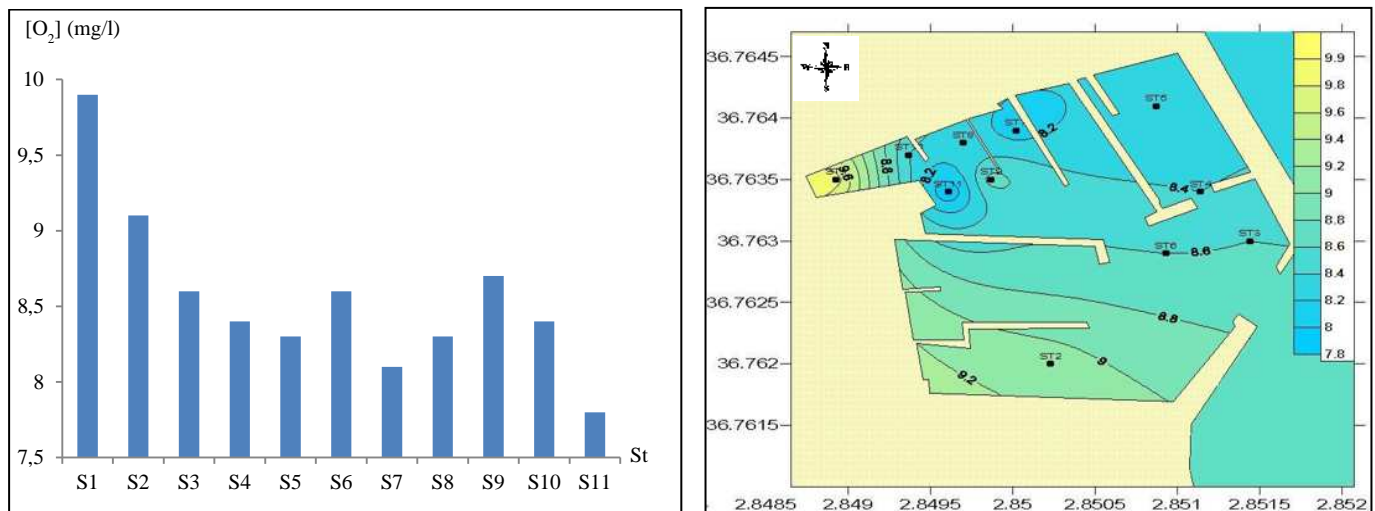
### ➤ Oxygène dissous

La teneur minimale en oxygène dissous enregistrée est de 7,8 mg/l (station 11). Cette faible concentration indique une intense consommation d'oxygène par le processus de reminéralisation de la matière organique en provenance des eaux usées des entretiens des bateaux et de l'ancienne conduite d'égout qui est fermée actuellement.

La plus forte teneur en oxygène dissous se trouve au niveau de la station 1 qui est de l'ordre de 9,9 mg/l. A ces endroits, les eaux sont relativement bien oxygénées. Ces eaux sont en contact permanent avec celles de la baie et ce qui permet leur renouvellement continu.

Les concentrations de l'oxygène dissous à l'intérieur du port montrent que les eaux des bassins ne sont pas suffisamment aérées, ce qui peut être expliqué par :

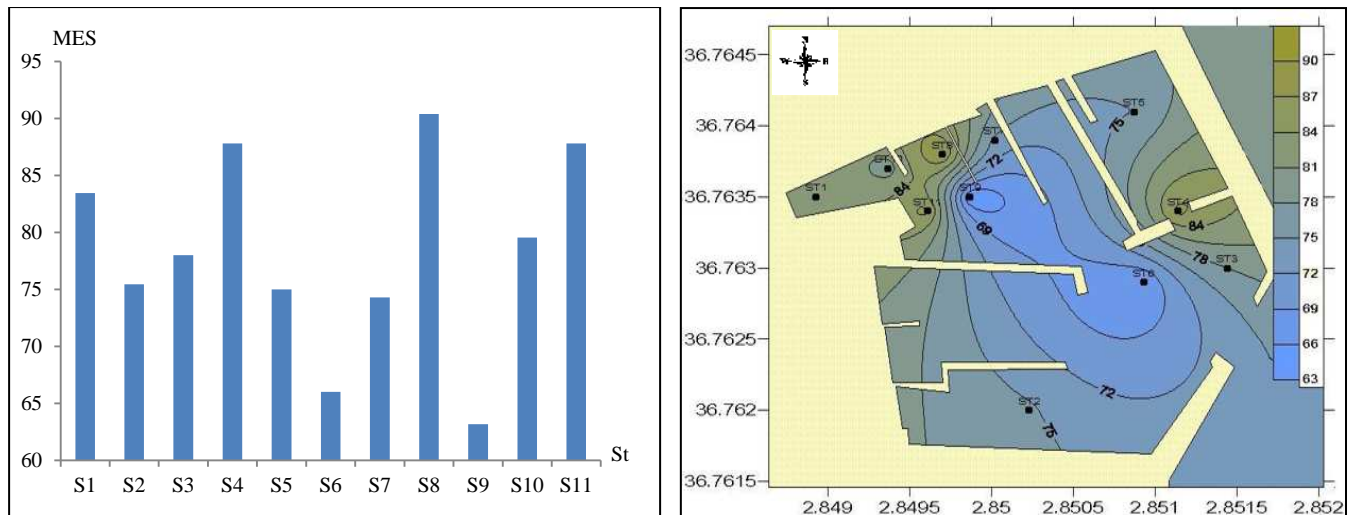
- La morphologie du port (bassins semi fermés et à faibles profondeurs).
- La forte charge en matière en suspension, le faible hydrodynamisme (endroit calme), peuvent diminuer la dissolution de l'oxygène dans l'eau.
- Les films formés par les hydrocarbures (essence, fuel, huiles,...) à la surface de l'eau ralentissent ou peuvent même entraver la ré-oxygénation de l'eau par l'atmosphère (Aminot et Kérouel, 2004)



**Figure 4.11:** Variation de l'oxygène dissous dans le port de Sidi-Fredj

### ➤ Matière en suspension

Les taux de la matière en suspension sont importants à l'intérieur du port et deviennent faibles à partir de la passe d'entrée vers l'extérieur. Ceci est dû à la faible profondeur des bassins, la nature du fond (sable fin), l'agitation causée par la circulation des bateaux qui favorisent la remise en suspension des sédiments superficiels.



**Figure 4.12:** Variation de la matière en suspension dans le port de Sidi-Fredj

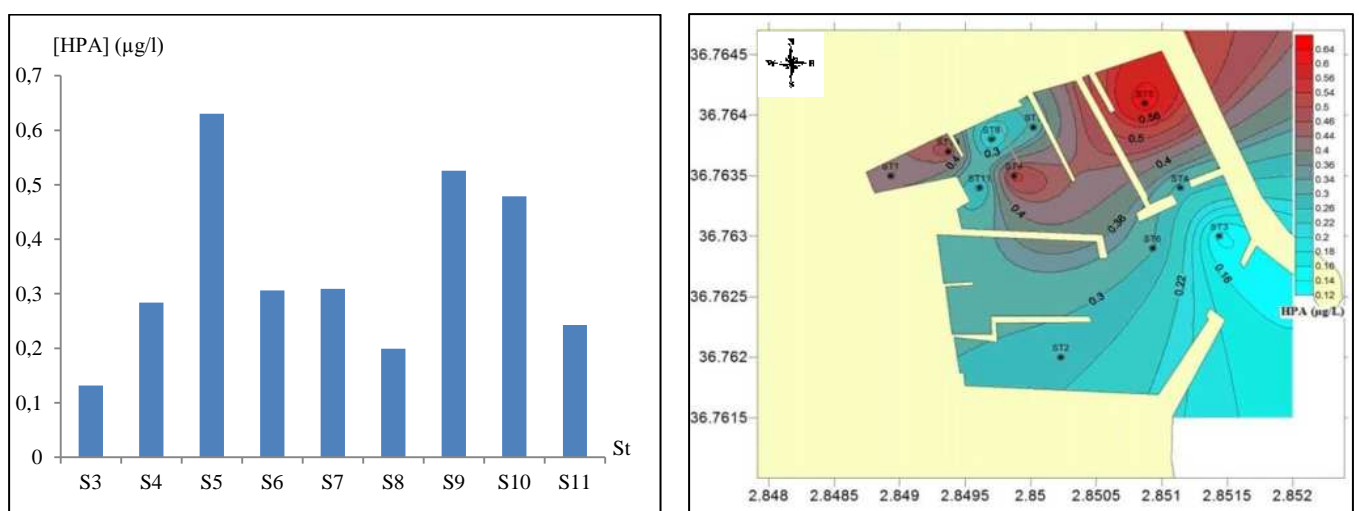
➤ **Hydrocarbures polyaromatiques dans l’eau de mer**

Les concentrations en hydrocarbures polyaromatiques du port de Sedi-Fredj varient entre un minimum de 0.132µg/l et un maximum de 0.63µg/l avec une moyenne de 0.345µg/l.

La valeur minimale se localise à la station S<sub>3</sub>. Celle-ci est située à la sortie du port. Cette zone est une région d’échange entre le milieu portuaire confiné et le milieu marin.

La concentration la plus élevée est rencontrée à la station S<sub>5</sub> qui se trouve dans une partie quasi-fermée du port et loin de la passe d’entrée et de la conduite d’aération.

Une pollution ponctuelle au niveau des stations S<sub>9</sub> et S<sub>10</sub> est observée (0.526 et 0.479µg/l). Cette teneur peut être encore causée par le trafic maritime et à la conception générale du port. Cependant les stations S<sub>8</sub> et S<sub>11</sub> qui se localisent entre ces deux dernières stations ont connus des concentrations plus bas ce qui exprime l’importance de la conduite d’aération au niveau de ces stations.



**Figure 4.13:** Variation des hydrocarbures polyaromatiques dans le port de Sidi-Fredj

## VI-3-Evaluation de l'état de pollution de la baie de Bousmail

Tableau 4.3 : Résultats des paramètres physico-chimiques et des stations de prélèvement dans la baie de Bousmail.

Stations	LONG	LAT	T°C	O <sub>2</sub> dissous	S% (PSU)	PH	MES (mg/l)	MO (mg/l)	HPA (µg/l)	HPA (µg/g)
S1	2,42	36,65	16	4	36,71	8,21	141,6	0,135	11,34	62,635
S2	2,43	36,63	15,8	10	36,73	8,27	149,6	0,098	5,36	68,314
S3	2,5	36,63	15,7	9,91	36,7	8,25	148,8	0,093	4,372	31,82
S4	2,58	36,64	15,6	9,61	36,71	8,24	149,6	0,095	4,947	65,175
S5	2,58	36,66	15,5	9,51	36,7	8,24	148	0,295	22,316	76,311
S6	2,67	36,65	15,9	8,61	36,74	8,27	134,4	0,072	0,947	14,359
S7	2,67	36,67	15,8	5,77	36,72	8,27	136	0,071	0,188	6,375
S8	2,67	36,7	16	8,45	36,68	8,22	149,6	0,106	7,36	25,045
S9	2,75	36,69	16,2	7,46	36,82	8,22	150,4	0,083	0,309	1,787
S10	2,75	36,71	16	7,76	36,7	8,25	157,6	0,066	0,065	7,001
S11	2,8	36,72	16,6	7,56	36,48	8,22	61,6	0,085	0,455	2,549
S12	2,8	36,74	16,3	8,26	36,64	8,21	152	0,065	0,074	1,582
S13	2,83	36,76	17,1	8,46	36,53	8,22	152	0,083	0,261	4,64
S14	2,86	36,77	16,8	6,36	36,71	8,25	216,8	0,075	0,122	4,764
S15	2,88	36,78	16,7	6,66	36,36	8,2	150,4	0,091	0,288	8,906

HPA (µg/l)	Hydrocarbures polyaromatiques dans l'eau
HPA (µg/g)	Hydrocarbures polyaromatiques dans le sédiment

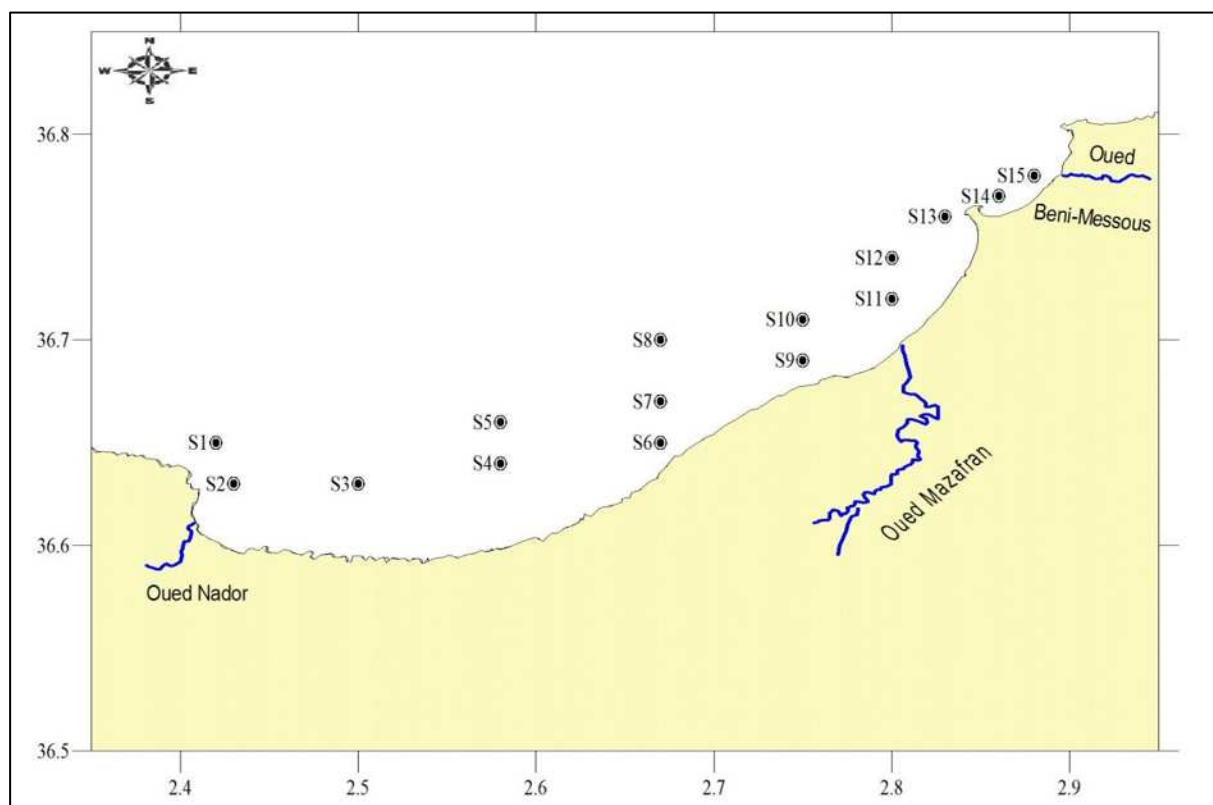
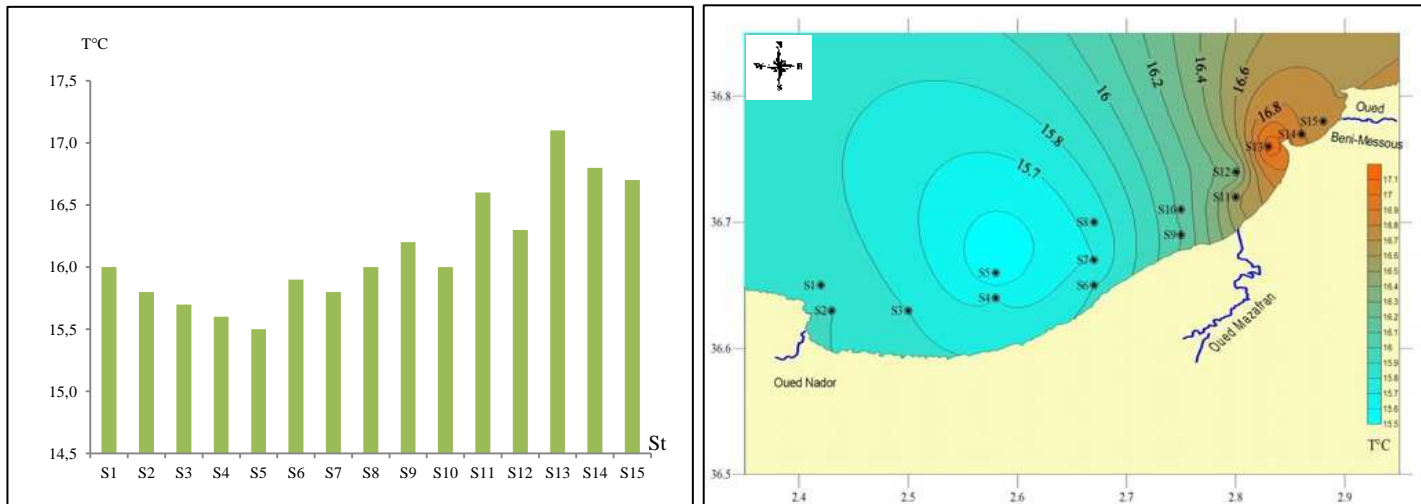


Figure 4.14: Localisation des stations dans la baie de Bousmail

### ➤ Température

La température est un paramètre pouvant influencer la biodégradation du pétrole en modifiant son état physique, sa composition chimique, l'activité physiologique des microorganismes et par conséquent la vitesse de dégradation des hydrocarbures, ainsi que la nature et la concentration des espèces microbiennes présentes (Atlas, 1981; Leahy et Colwell, 1990).



**Figure 4.15:** Variation de la température dans l'eau de mer de la baie de Bousmail.

Les températures mesurées reflètent la période saisonnière en relation avec les conditions météorologiques. Ces valeurs sont influencées par celles de l'air ; elles varient entre 15,5 et 17,1°C. La distribution spatiale de la température est homogène sur la totalité de la baie en présence d'un gradient allant de l'Ouest vers l'Est.

Une diminution de la température est généralement accompagnée par une diminution de la vitesse de biodégradation qui peut être expliquée par une décroissance de l'activité enzymatique. Des températures plus élevées ont pour effet d'augmenter la vitesse de biodégradation (Walworth et al., 2001; Sandvik et al., 1986; Song et al., 1990) et par conséquent elle entraîne une diminution des teneurs des hydrocarbures en eau de mer.

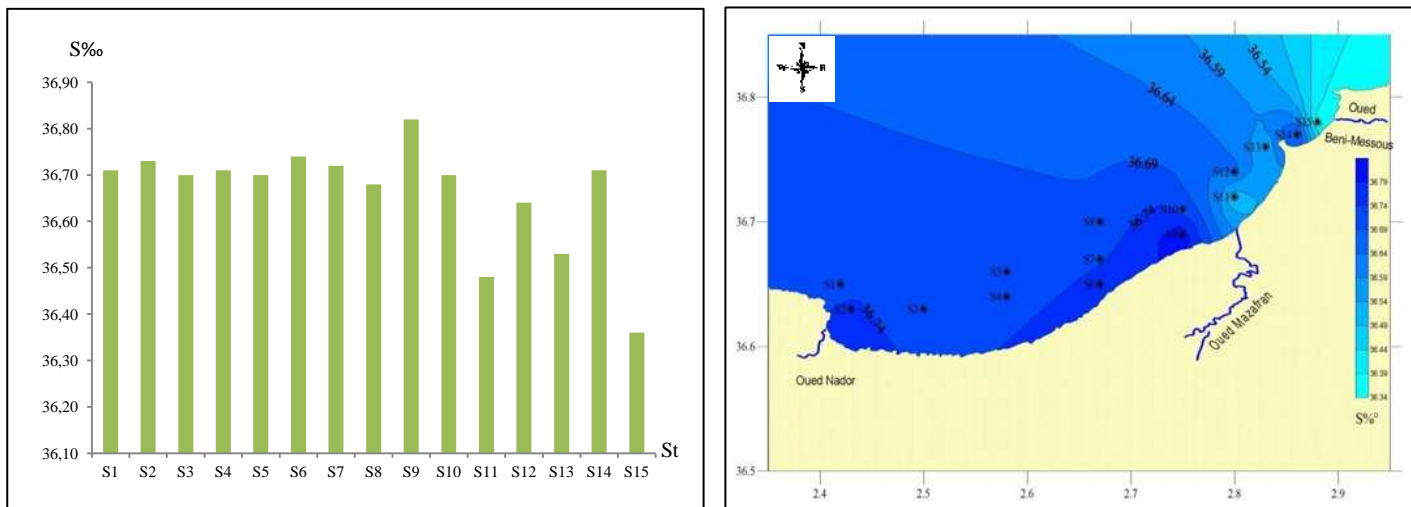
### ➤ Salinité

La salinité des eaux de l'océan Atlantique est comprise entre 36 et 36.9 PSU, et en méditerranée, elle est comprise entre 37.8 et 39.39 PSU.

Nous remarquons alors que les valeurs de salinité sont relativement faible que nous pouvons expliqué par la proximité des stations de la côte où il est apparu clairement l'influence des oueds et des apports des eaux de ruissellement qui déversent l'eau douce.

Quand la concentration en chlorure de sodium dépasse 1 mg, l'élimination du pétrole brut diminue rapidement. Pour ce type de substrat, les fortes salinités constituent donc une barrière naturelle pour la biodégradation (Al Mallah, 1988; Tagger et al., 1976; Bertrand et al., 1990).

Ward et Brock (1978) ont montré que la vitesse de la biodégradation des hydrocarbures décroît lorsque la salinité passe de 3,3 à 28,4‰, et ils ont attribué ces résultats à une réduction générale des vitesses métaboliques des microorganismes.



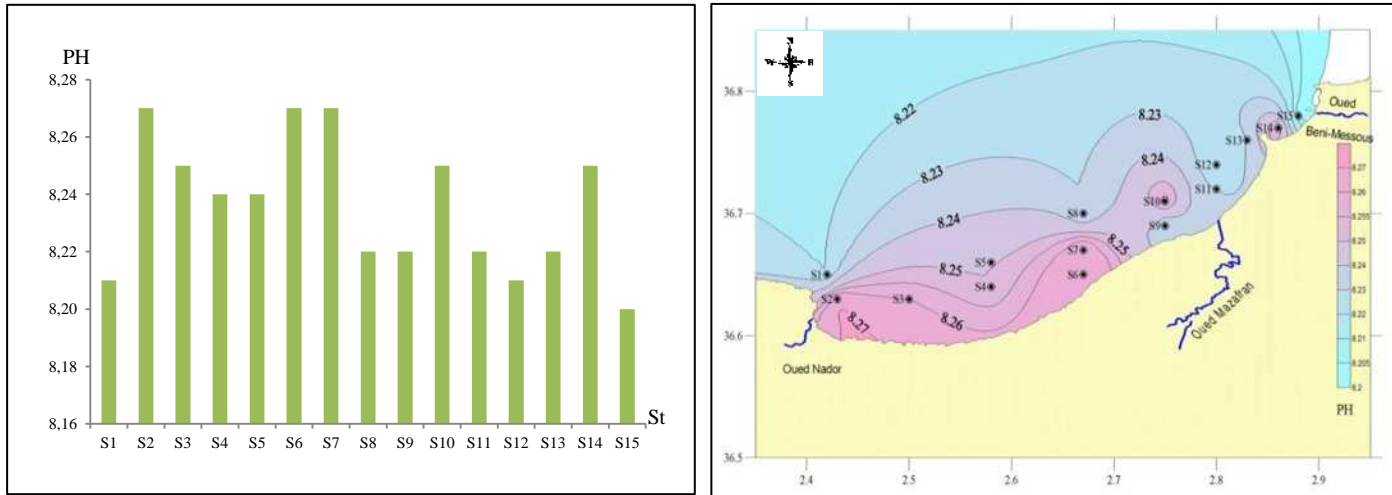
**Figure 4.16** : Variation de la salinité dans l'eau de mer de la baie de Bousmail.

Les valeurs de la salinité sont comprises entre 36.36 et 36.82‰ avec une moyenne de 36.66‰ et un écart-type de 0,12, elle montre un gradient décroissant en allant de l'Ouest vers l'Est, cela est dû à l'influence des apports d'eau douce dans la baie. Les valeurs minimales de salinité sont situées face à l'embouchure des oueds Beni-Messous et Mazafran qui sont de l'ordre de 36.36 et 36.48 ‰ respectivement. En revanche, dans le cas d'Oued Nador, des valeurs relativement élevées (de l'ordre de 36.73 ‰) sont observées, ce qui explique l'influence du port de Tipaza dans cette zone.

#### ➤ Potentiel d'Hydrogène

Les valeurs de PH au niveau de la baie de Bou-Ismaïl sont comprises entre 8.2 et 8.27. La moyenne est de 8.24 et un écart type de 0.02. Ces valeurs sont relativement homogènes sur l'ensemble des stations de surface de la baie.

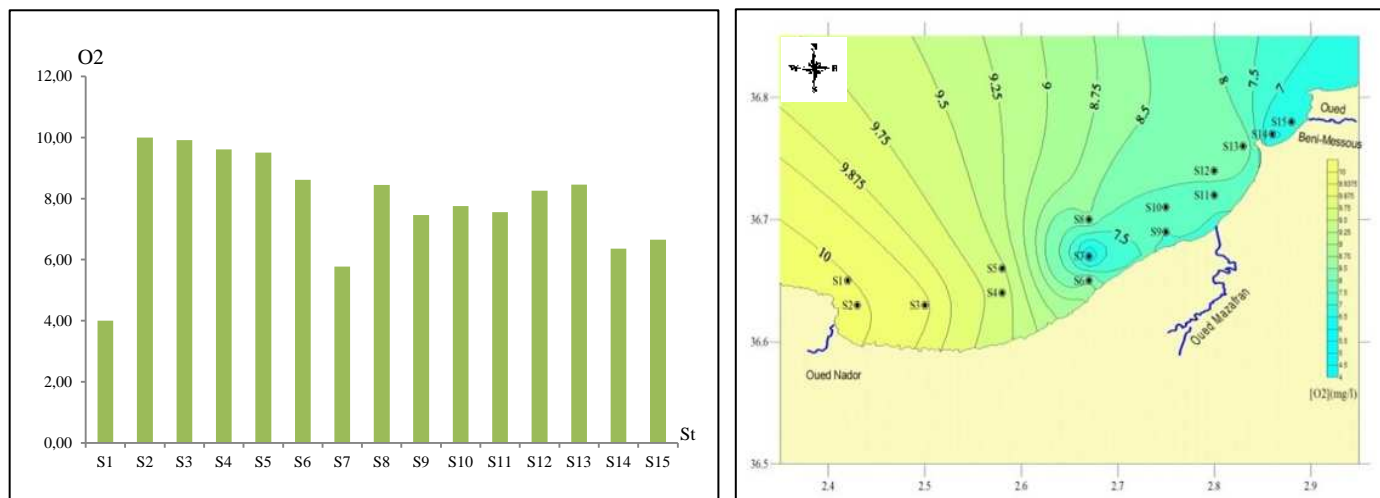
Cependant, la distribution spatiale du PH montre un faible gradient allant du large vers la côte, avec les valeurs les plus élevées sont clairement localisées près des côtes et surtout au niveau des trois ports de la région (Tipaza, Bouharoun, et Sidi-Fredj) ce qui s'explique par les rejets des eaux usées et se dépend également de la quantité de la matière organique présente au niveau de ces stations et de sa dégradation.



**Figure 4.17:** Variation de PH dans l'eau de mer de la baie de Bousmail.

➤ **Oxygène dissous**

L'étape initiale du catabolisme des hydrocarbures aliphatiques, cycliques et aromatiques par les bactéries et les champignons inclut l'oxydation de ces substrats par l'intermédiaire d'hydroxylases et d'oxygénases, pour lesquelles l'oxygène moléculaire est indispensable (Leahy et Colwell, 1990; Atlas, 1981; Bertrand et Mille, 1989).



**Figure 4.18 :** Variation de l'oxygène dissous dans l'eau de mer de la baie de Bousmail.

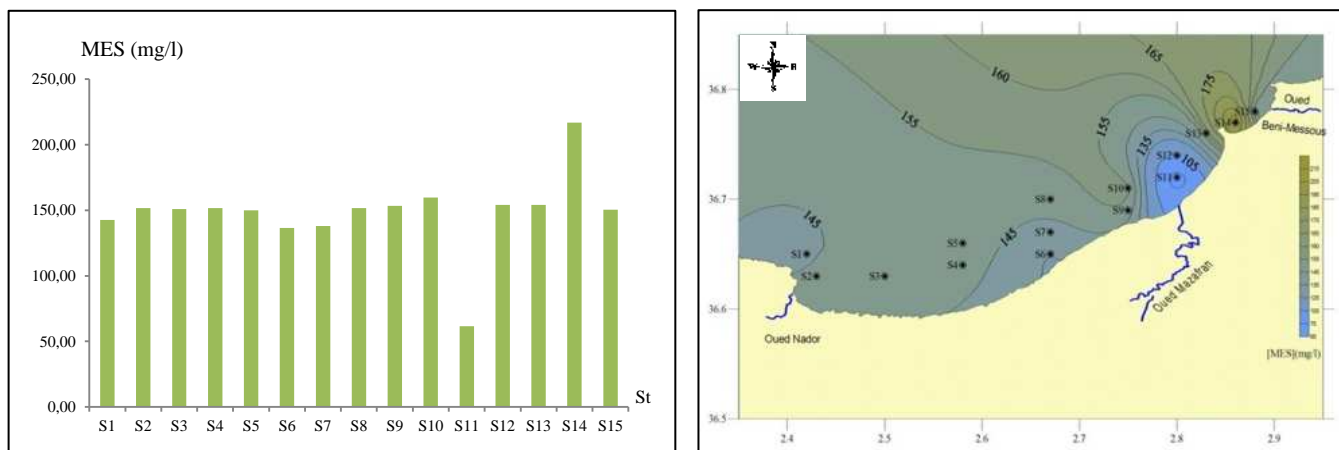
La teneur minimale en oxygène dissous enregistrée est de 4 mg/l. Cette faible concentration indique une intense consommation d'oxygène par l'oxydation de la matière organique. La plus forte teneur en oxygène dissous se trouve au niveau de la station 2 qui est de l'ordre de 10 mg/l. A cet endroit, les eaux sont relativement bien oxygénées. Ces eaux sont en contact permanent avec celles de la baie et ce qui permet leur renouvellement continu.

Le problème de la limitation de l'oxygène moléculaire dans les couches superficielles des colonnes d'eau est inexistant, Théoriquement, 3,5 g d'oxygène sont nécessaires pour l'oxydation complète de

1 g de pétrole; Zobell (1969), a calculé que la quantité d'oxygène dissoute dans 320m<sup>3</sup> d'eau de mer est nécessaire pour l'oxydation de 1 litre de pétrole brut.

#### ➤ Matière en suspension

La distribution de la matière en suspension dans l'eau de mer dépend essentiellement de l'état de la mer, des courants et de l'agitation. Pour réaliser une étude spatiale de la matière en suspension nous avons présenté les teneurs en MES dans 15 stations qui couvrent la totalité de la baie.



**Figure 4.19** : Variation de la matière en suspension dans l'eau de mer de la baie de Bousmail

Les valeurs de la matière en suspension sont comprises entre 61.6 et 216.8 mg/l avec une moyenne de 148.16 mg/l et un écart-type de 30.18 mg/l, la distribution spatiale de la matière en suspension montre une distribution hétérogène avec des fortes valeurs au niveau des embouchures d'oued Beni-Messous et Oued Nador, cela est dû à l'influence des rejets domestiques des eaux usées (forte urbanisation) et la mise en suspension des éléments fins par les courants surtout au niveau des faibles profondeurs. Nous avons pu constater également que les valeurs maximales de la matière en suspension se situent face aux ports (sidi-Fredj) qui sont de l'ordre de 216.8 et 150.4 mg/l respectivement.

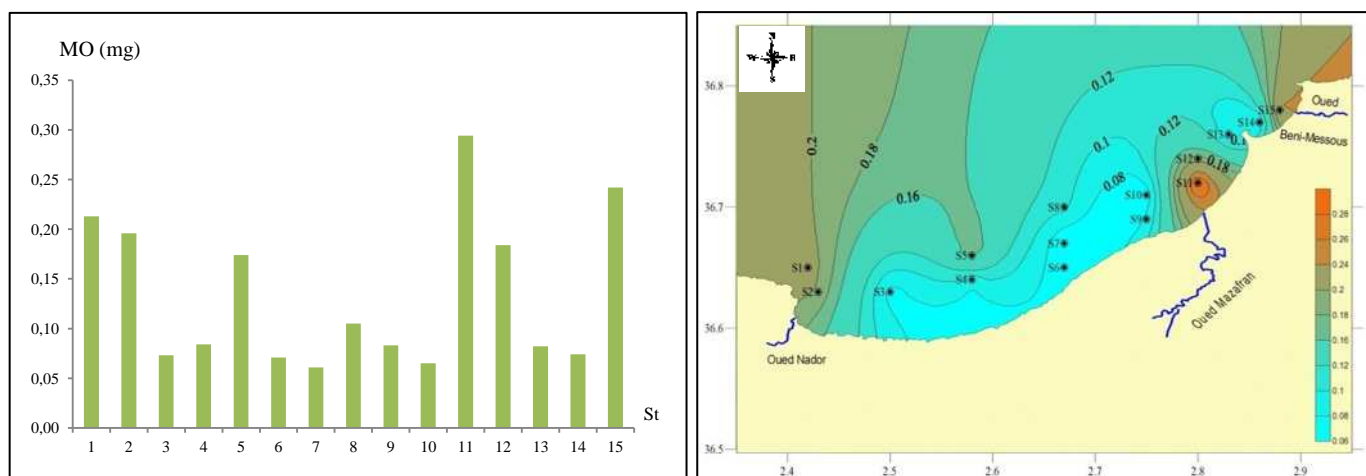
#### ➤ Matière organique

La baie est caractérisée par des valeurs variables de la matière organique, celles-ci varient en surface de 0.065 mg/l pour la station S<sub>12</sub> et atteint 0.295 mg/l pour la station S<sub>5</sub> avec une moyenne de 0.101 mg/l et un écart type de 0.057.

Les teneurs en matière organique augmentent d'ouest en est avec un maximum enregistré au niveau des embouchures d'oued Beni Messous et de Mazafran. Les plus faibles concentrations sont enregistrées tout au long de la côte de la baie.

Les facteurs physiques, biologiques et chimiques (disponibilité d'éléments nutritifs) contrôlent l'activité biologique des espèces trophiques primaires de l'environnement marin.

Les nutriments sont assimilés par le phytoplancton pendant la photosynthèse et produisent la matière organique considérée comme une source d'énergie et de nutriments pour les microorganismes (bactéries, protozoaires), elle correspond à la fraction endogène qui est facilement dégradée.



**Figure 4.20** : Variation de la matière organique dans l'eau de mer de la baie de Bousmail

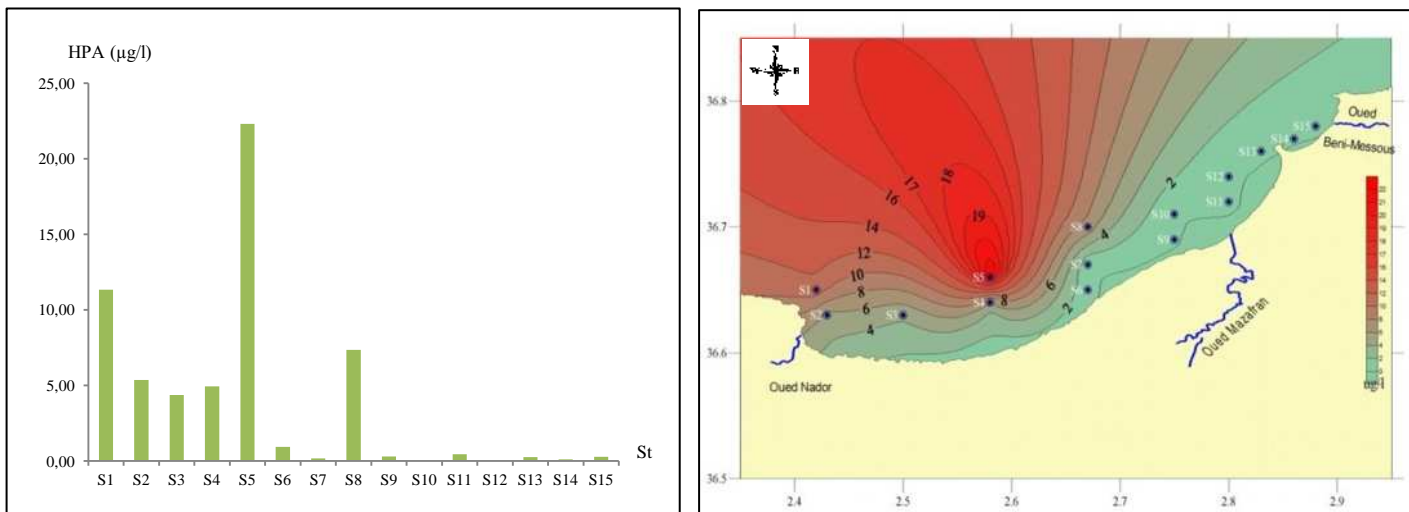
La fraction endogène correspond à la matière organique produite par l'assimilation des nutriments par le phytoplancton lors de la photosynthèse. Cette matière organique qui est facilement dégradable sera source d'énergie et de nutriments pour les microorganismes (bactéries, protozoaires) (Boulaïdid, 1987). Reste la fraction exogène formée par les débris des animaux et des végétaux possède une certaine résistance à la dégradation bactérienne. Cette fraction est nécessaire au fonctionnement des cycles biogéochimiques par la régénération des sels nutritifs (Lacaze, 1980; Aminot & Kérouel, 2004).

#### ➤ Hydrocarbures polyaromatiques dans l'eau de mer

Les valeurs mesurées des hydrocarbures polyaromatiques dans la matrice eau montrent un gradient allant de 0.0737  $\mu\text{g/l}$  au niveau de la station S12 à 22.316  $\mu\text{g/l}$  au niveau de la station S5 dont les valeurs les plus élevées sont enregistrées dans la partie occidentale de la baie, avec une moyenne de 6.007  $\mu\text{g/l}$ .

La variabilité spatiale des hydrocarbures polyaromatiques dans l'eau de mer s'expliquerait d'une part, par des apports potentiels ; d'autre part, une élimination spontanée des hydrocarbures polyaromatiques à la surface marine provoquerait une diminution des teneurs. Selon Lacaze (1980), cette hétérogénéité peut être causée par une dégradation biologique. En effet, selon Halmann (1996), les hydrocarbures polyaromatiques sont ingérés par les organismes marins pour subir par la suite des transformations partielles. Broman et al., (1988) insistent sur l'importance de ce flux sestonique (apport de matière organique) en période estivale probablement du à l'activité planctonique. Ce qui expliquerait les teneurs extrêmes dans certaines stations.

Les faibles teneurs en hydrocarbures près des côtes peuvent être expliquées par la présence des moules et des autres espèces filtreuses qui s'installent tout au long de la côte; Les moules peuvent absorber directement les hydrocarbures polycycliques aromatiques de faible poids moléculaire, alors que des hydrocarbures plus lourds sont principalement ingérés par le système digestif. En considérant que le phénanthrène et le pyrène sont absorbés à 88% et à 74%, respectivement. [Galgani F et al., \(2010\)](#).



**Figure 4.21:** Variation des hydrocarbures polycycliques aromatiques ( $\mu\text{g/l}$ ) dans l'eau de mer de la baie de Bousmail

#### ➤ Hydrocarbures polycycliques aromatiques dans le sédiment

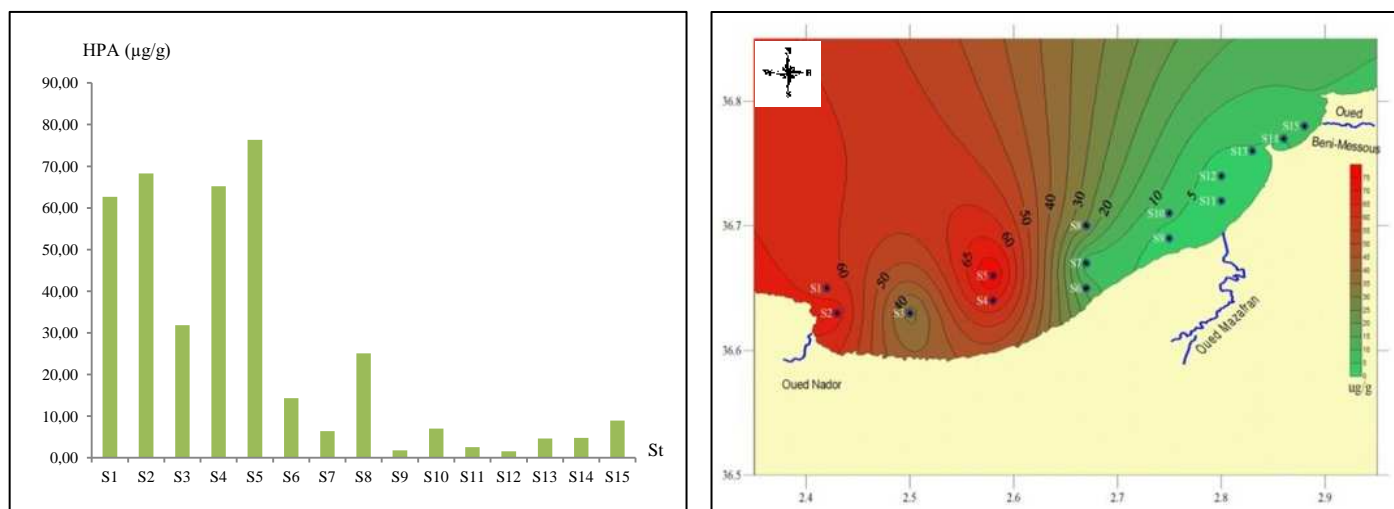
La spatialisation des hydrocarbures polycycliques aromatiques dans le sédiment de la baie montre une séparation bien claire entre la partie orientale et la partie occidentale de la baie dont les concentrations les plus élevées sont localisées à l'Ouest de la baie et qui se varient entre  $35.045\mu\text{g/g}$  ( $S_8$ ) et  $96.311\mu\text{g/g}$  ( $S_5$ ) avec un maximum dans la station  $S_5$ . À l'Est de la baie, des faibles teneurs en hydrocarbures polycycliques aromatiques dans la totalité des stations sont observées, avec une valeur minimale de l'ordre de  $1.582\mu\text{g/g}$  dans la station  $S_{12}$ .

Ces variations des hydrocarbures polycycliques aromatiques sont a priori, dues à l'intensité du trafic maritime au voisinage des deux ports (Bouharoun et Tipaza) et au mouillage permanent et prolongé des navires.

La présence d'Oued Nador et le port de Tipaza avec ses exutoires à rejets urbains, le lessivage des terres agricoles en plus du trafic automobile et différentes sources domestiques d'origine pyrolytique contribuent de manière directe ou indirecte à l'enrichissement du milieu marin. En ajoutant la nature vaseuse du sédiment qui favorise la rétention des polluants organiques.

Les concentrations en hydrocarbures polycycliques aromatiques dans constituent un indice non négligeable de pollution pétrolière dans cette zone du fait de la succession des naufrages pétroliers en méditerranée

comme le naufrage du Cougar (2003) au large de Tipaza, avec des galettes de fioul répandues sur quelques plages de la baie qui ont fait augmenter les concentrations en hydrocarbures polyaromatiques.



**Figure 4.22 :** Variation des hydrocarbures polyaromatiques ( $\mu\text{g/g}$ ) dans le sédiment de la baie de Bousmail

**Tableau 4.4 :** Comparaison entre les teneurs en hydrocarbures polyaromatiques étudiés dans l'eau de mer de surface de la côte Algérienne

Type d'Hydrocarbure		Sellali (1996)			Khetib (1999)		Présente étude
		Baie d'Alger (1989)	Golf d'Arzew (1988)	Golf d'Arzew (1989)	Golf de Bejaia (1995)	Golf de Skikda (1995)	Baie de Bousmail (2010)
HPA ( $\mu\text{g/l}$ )	Min	0.813	0.9	0.235	0.333	0.264	0.065
	Max	4.912	8	9.747	6.69	19.965	22.316
	Moy	1.869	2.828	2.58	1.069	3.546	3.394
	E.T	1,173	2,013	2,567	/	/	6.13

Les quantités en hydrocarbure sont en générale, plus important dans l'eau de mer de surface de la baie de Bousmail que dans les eaux de surface des autres baies, malgré que les ports de Skikda, et d'Arzew sont des ports pétroliers, et les ports de Bejaia et d'Alger sont connus par leurs très forts trafics maritimes.

Selon une étude réalisée sur la méditerranée occidentale par [Faraco et Ros \(1978\)](#), lorsque les teneurs moyennes ne dépassent pas  $10\mu\text{g/l}$ , une zone est considérée comme moyennement polluée. Dans le cas de la présente étude, la baie de Bousmail seraient considérée comme moyennement polluée avec cependant, des pollutions ponctuelles dans quelques stations pouvant atteindre le double de la teneur indiqué par ces auteurs, mais il faut signaler aussi que ces trois études sont faites dans des circonstances et des périodes différentes donc il faut prendre en considération l'année de réalisation de ces trois études pour mieux comprendre le phénomène de la pollution marine.

## **VI-4-Extraction de la réflectance de l'eau de mer**

### **VI-4-1-Données et conditions atmosphériques**

Les bandes spectrales visibles des satellites peuvent servir pour mettre en évidence l'ampleur de la pollution de la zone côtière puisque l'eau réfléchit le rayonnement solaire dans cette partie visible du spectre électromagnétique (Guyot, 1989; Houma et al.,2004).

Nous avons utilisé les images satellite SPOT et LANDSAT de la même période de prélèvement des échantillons. L'observation est réalisée dans les différentes bandes spectrales. L'image englobe la zone analysée et présente une bonne résolution spatiale.

Lors de la prise des images et des échantillons cités, nous avons noté les données des conditions atmosphériques enregistrées au niveau de la *Station de l'Office National de Météorologie*. Et nous avons utilisé ces informations comme étant des données d'entrée pour le calcul de la réflectance.

### **VI-4-2-Extraction de la luminance de l'eau par simulation SDDS.**

Les réflectances sont obtenues à partir des luminances des pixels des stations analysées dans la baie d'Bousmaïl. Le modèle de simulation regroupe l'ensemble des données géométriques et atmosphériques, les résultats obtenus en luminance des canaux des satellites donnent la radiométrie des zones. (Figure 4.24).

Dans notre étude, nous allons simuler les luminances captées par les radiomètres embarqués à bord des satellites dans différents canaux, pour cela, nous utiliserons le logiciel SDDS qui va nous calculer les luminances apparentes des surfaces marines interceptées par les capteurs des satellites : SPOT XS, LANDSAT TM et LANDSAT MSS, les conditions géométriques et atmosphériques étant établies au préalable.

Pour déterminer les différentes radiations au niveau des stations étudiées, nous avons considéré les paramètres d'entrées qui sont des paramètres astronomiques, géographiques et atmosphériques caractérisant principalement les coordonnées géographiques des points et les données météorologiques au moment de l'échantillonnage.

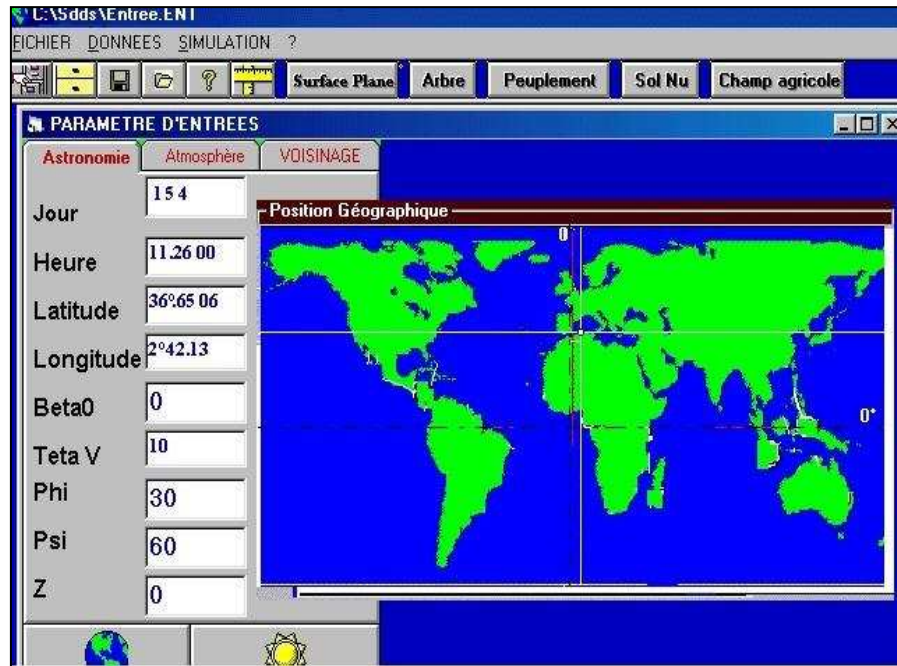


Figure 4.23 : Application des paramètres atmosphériques et coordonnées d'une station de prélèvement



Figure 4.24: Résultats des luminances simulées de la station sur les canaux satellites.

Les images multi bandes des capteurs SPOT XS et Landsat TM & MSS donnent les luminances  $L_{\lambda}$  des stations étudiées.

**Tableau 4.5 :** Valeurs de la luminance pour les trois canaux du satellite SPOT pour différent  $\theta_v$ .

Téta V	$\theta_v=10$			$\theta_v=30$		
stations	XS1	XS2	XS3	XS1	XS2	XS3
S1	65,829	45,227	14,047	64,83	44,651	13,934
S2	65,828	45,226	14,041	64,829	44,65	13,927
S3	65,829	45,227	14,05	64,83	44,651	13,937
S4	65,828	45,225	14,035	64,829	44,65	13,921
S5	65,829	45,224	14,008	64,83	44,648	13,894
S6	65,831	45,224	13,997	64,832	44,649	13,882
S7	65,829	45,224	14,011	64,83	44,649	13,897
S8	65,83	45,225	14,018	64,831	44,65	13,904
S9	65,832	45,226	14,018	64,832	44,651	13,904
S10	65,83	45,229	14,08	64,83	44,654	13,966
S11	65,831	45,23	14,08	64,832	44,655	13,967
S12	65,833	45,231	14,075	64,833	44,656	13,961
S13	65,831	45,23	14,074	64,831	44,654	13,961
S14	65,831	45,23	14,08	64,832	44,655	13,967
S15	65,833	45,287	14,969	64,833	44,712	14,872

**Tableau 4.6:** Valeurs de la luminance pour les canaux du satellite LANDSAT (TM & MSS).

Téta V	$\theta_v=10$			$\theta_v=30$		
stations	TM1	TM2	MSS4	TM1	TM2	MSS4
S1	71,89	61,739	65,732	70,811	60,801	64,734
S2	71,889	61,738	65,731	70,81	60,8	64,733
S3	71,89	61,739	65,732	70,811	60,8	64,734
S4	71,889	61,739	65,731	70,81	60,8	64,733
S5	71,89	61,739	65,732	70,811	60,8	64,734
S6	71,892	61,741	65,734	70,814	60,802	64,736
S7	71,89	61,739	65,732	70,811	60,8	64,734
S8	71,891	61,74	65,733	70,813	60,801	64,735
S9	71,893	61,742	65,735	70,814	60,803	64,736
S10	71,891	61,74	65,733	70,812	60,801	64,734
S11	71,892	61,741	65,734	70,914	60,802	64,736
S12	71,894	61,742	65,735	70,815	60,804	64,737
S13	71,892	61,741	65,734	70,813	60,802	64,735
S14	71,892	61,714	65,734	70,814	60,802	64,736
S15	71,894	61,742	65,736	70,815	60,804	64,737

Les luminances de l'eau de mer sont fortes dans le premier canal par rapport au deuxième où elles sont aussi plus importantes que celles calculées dans le canal XS3 et ce qui le même cas par rapport aux autres canaux du satellite Landsat.

#### VI-4-2-1-Modélisation des paramètres

L'objectif de cette partie est la modélisation entre les luminances calculées à partir du logiciel *SDDS* et les résultats des mesures in situ. Nous déterminons l'ajustement des paramètres dans chaque canal SPOT, TM et MSS de Landsat. (Houma *et al.*,2008).

L'ajustement linéaire entre les variables luminances des différents canaux et les paramètres physico-chimiques a donné des relations à forte, à moyenne et à faible corrélation. Nous distinguons que les meilleurs résultats des coefficients de détermination sont sur Spot(XS1) ; TM1 et MSS4 du satellite Landsat.

Donc les bandes spectrales SPOT(XS1), Landsat(TM1) et Landsat(MSS4) qui donnent les meilleurs coefficients de détermination avec les luminances des canaux correspondants sont les mieux adaptées pour le suivi de la qualité des eaux.

**Tableau 4.7:** Variation de la luminance en fonction des canaux de satellites Spot et NOAA pour un  $\theta_v = 10$  (Stations d'El Djamilia)

Stations	XS1	XS2	XS3	Noaa1	Noaa2
D1	68,107	46,788	14,359	57,641	13,738
D3	65,972	45,332	13,885	55,843	13,284
D5	65,708	45,162	13,797	55,628	13,191
D8	67,491	46,387	14,167	57,137	13,545
D10	74,878	48,464	13,252	61,726	12,624
D11	65,748	45,188	13,815	55,661	13,212
D15	67,493	46,388	14,162	57,139	13,536

**Tableau 4.8:** Variation de la luminance en fonction des canaux de satellite Landsat pour un  $\theta_v = 10$  (Stations d'El Djamilia)

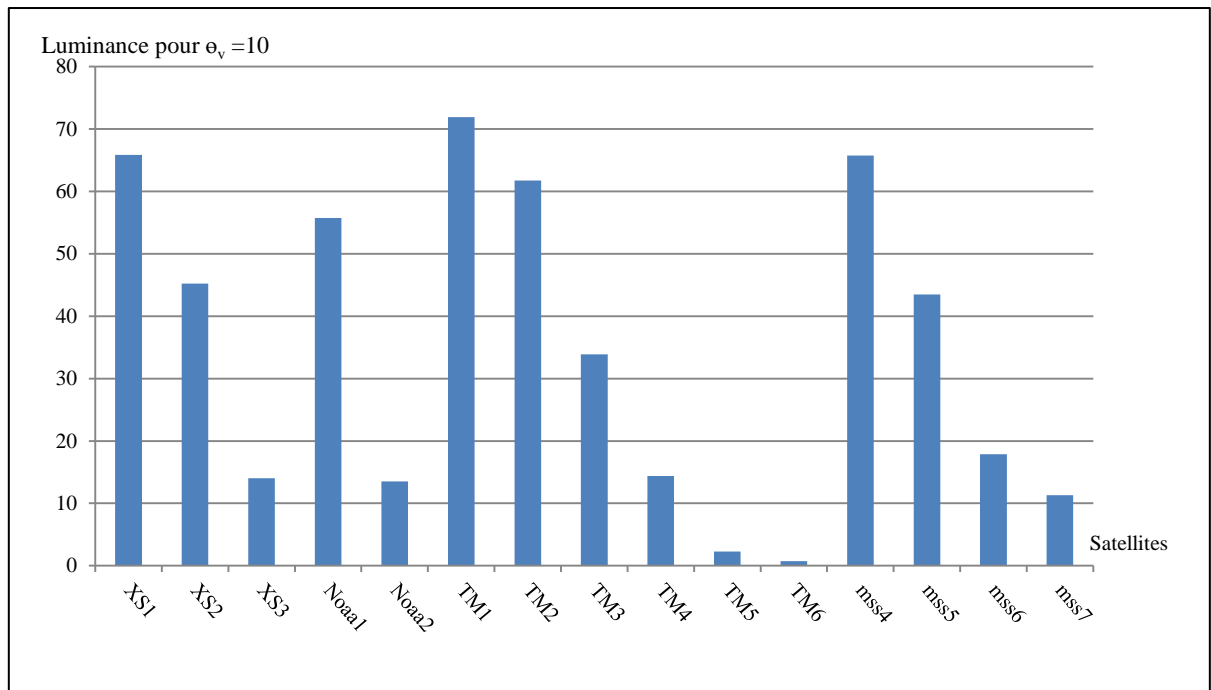
Stations	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM6	MSS 4	MSS 5	MSS6	MSS 7
D1	74,337	63,895	34,946	14,704	2,303	0,782	68,007	44,963	18,263	11,431
D3	71,969	61,909	33,801	14,213	2,247	0,763	65,875	43,548	17,613	11,079
D5	71,65	61,677	33,626	14,121	2,245	0,763	65,612	43,371	17,471	11,014
D8	73,593	63,35	34,537	14,501	2,304	0,783	67,392	44,548	17,942	11,307
D10	83,542	69,212	35,031	13,564	2,209	0,747	74,753	46,443	16,844	10,529
D11	71,698	61,712	33,653	14,14	2,247	0,763	65,652	43,398	17,497	11,032
D15	73,596	63,352	34,537	14,496	2,302	0,782	67,394	44,548	17,937	11,296

**Tableau 4.9:** Variation de la luminance en fonction des canaux de satellites Spot et NOAA pour un  $\theta_v = 10$  (Stations de Bousmail)

Stations	XS1	XS2	XS3	Noaa1	Noaa2
S1	65,829	45,227	14,047	55,711	13,504
S2	65,828	45,226	14,041	55,709	13,495
S3	65,829	45,227	14,05	55,711	13,508
S4	65,828	45,225	14,035	55,709	13,486
S5	65,829	45,224	14,008	55,709	13,448
S6	65,831	45,224	13,997	55,711	13,431
S7	65,829	45,224	14,011	55,709	13,452
S8	65,83	45,225	14,018	55,71	13,461
S9	65,832	45,226	14,018	55,712	13,462
S10	65,83	45,229	14,08	55,712	13,551
S11	65,831	45,23	14,08	55,713	13,551
S12	65,833	45,231	14,075	55,714	13,543
S13	65,831	45,23	14,074	55,713	13,543
S14	65,831	45,23	14,08	55,713	13,551
S15	65,833	45,287	14,969	55,732	15,278

**Tableau 4.10:** Variation de la luminance en fonction des canaux de satellite Landsat pour un  $\theta_v = 10$  (Stations de Bousmail)

Stations	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM6	MSS4	MSS5	MSS6	MSS7
S1	71,89	61,739	33,878	14,373	2,2631	0,7631	65,732	43,487	17,865	11,285
S2	71,889	61,738	33,875	14,367	2,2606	0,7048	65,731	43,485	17,859	11,274
S3	71,89	61,739	33,878	14,376	2,2644	0,7634	65,732	43,487	17,867	11,29
S4	71,889	61,739	33,874	14,362	2,258	0,762	65,731	43,485	17,854	11,263
S5	71,89	61,739	33,867	14,338	2,2466	0,7595	65,732	43,482	17,831	11,215
S6	71,892	61,741	33,865	14,328	2,2416	0,7584	65,734	43,482	17,822	11,194
S7	71,89	61,739	33,868	14,341	2,2479	0,7598	65,732	43,483	17,834	11,221
S8	71,891	61,74	33,87	14,347	2,2504	0,7603	65,733	43,484	17,84	11,232
S9	71,893	61,742	33,871	14,347	2,2504	0,7603	65,735	43,485	17,84	11,232
S10	71,891	61,74	33,887	14,402	2,2771	0,7661	65,733	43,49	17,893	11,343
S11	71,892	61,741	33,887	14,402	2,2771	0,7661	65,734	43,491	17,894	11,343
S12	71,894	61,742	33,887	14,398	2,2746	0,7656	65,735	43,492	17,89	11,333
S13	71,892	61,741	33,886	14,397	2,2746	0,7656	65,734	43,49	17,889	11,333
S14	71,892	61,714	33,888	14,402	2,2771	0,7661	65,734	43,491	17,894	11,343
S15	71,894	61,742	34,077	15,178	3,1564	0,8453	65,736	43,57	18,621	13,553

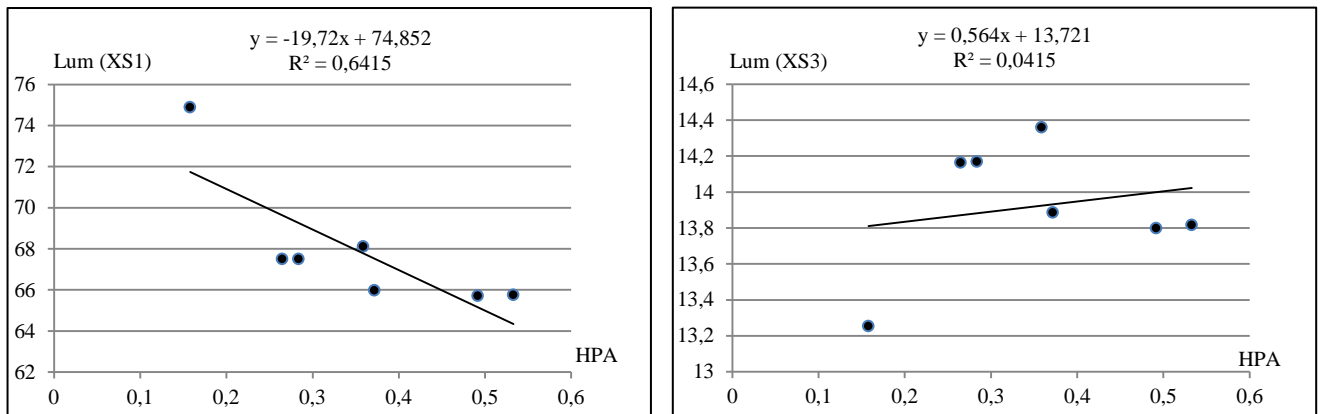


**Figure 4.25** : Variation de la luminance en fonction des différents satellites

Les plus faibles valeurs de luminance sont observées sur le canal XS3, TM4, TM5 et TM6 ce qui est tout à fait logique puisque l'absorption de l'eau devient très importante dans cette bande infrarouge (voir les annexes).

Exemple des coefficients de déterminations de luminance de l'eau de mer en fonction de hydrocarbures polyaromatiques de la baie de d'El Djamila pour des différents canaux des satellites Spot et Landsat.

$Lum = -19,72 HPA + 74,852$        $R^2 = 0,6415$       (pour le canal XS1).



**Figure 4.26** : Modélisation linéaire de luminance de l'eau de mer d'El Djamila pour Spot (XS1 et XS3).

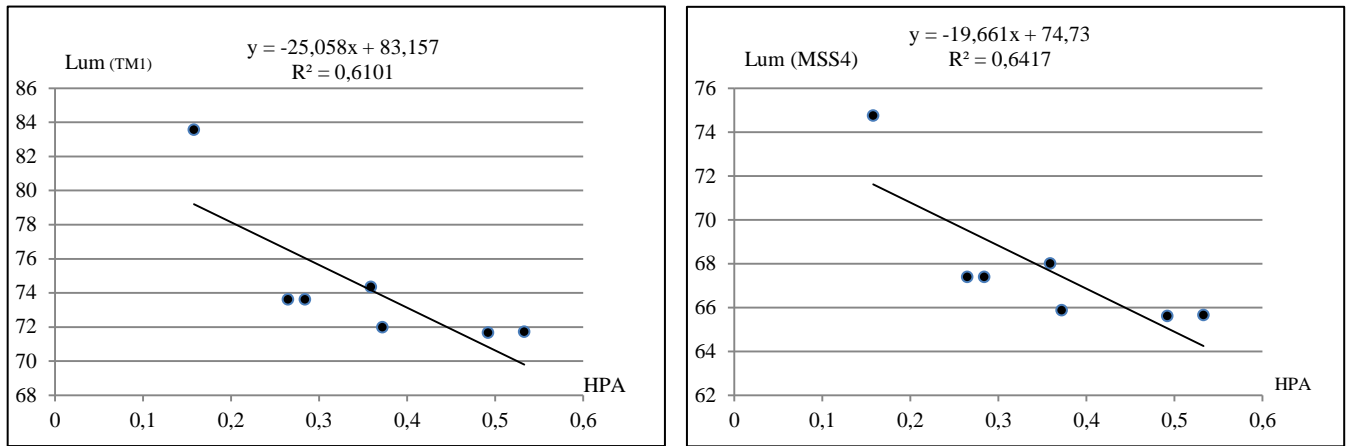


Figure 4.27 : Modélisation linéaire de luminance de l'eau de mer d'El Djamila du canal TM1 et MSS4.

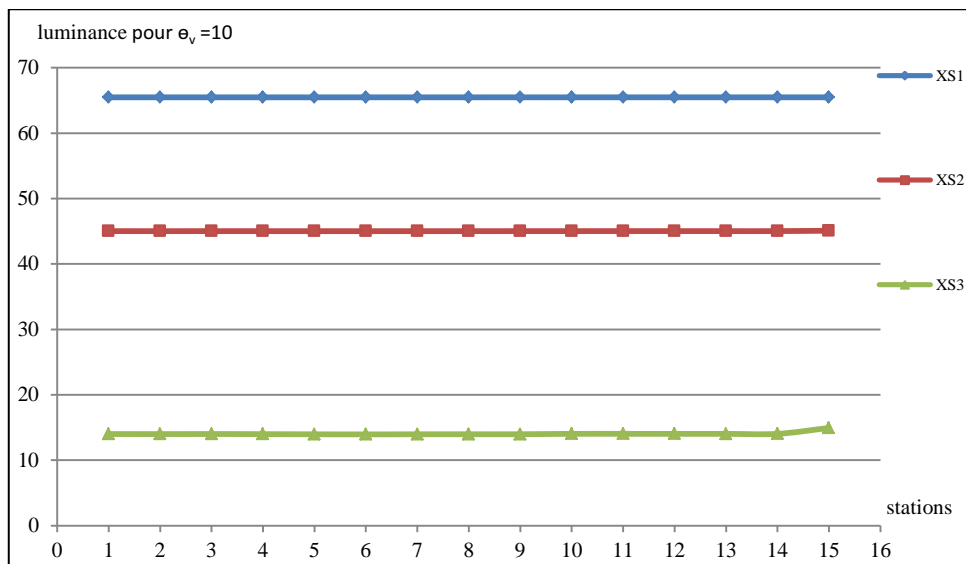


Figure 4.28 : Variation de luminance de l'eau de mer de Bousmaïl pour le satellite Spot.

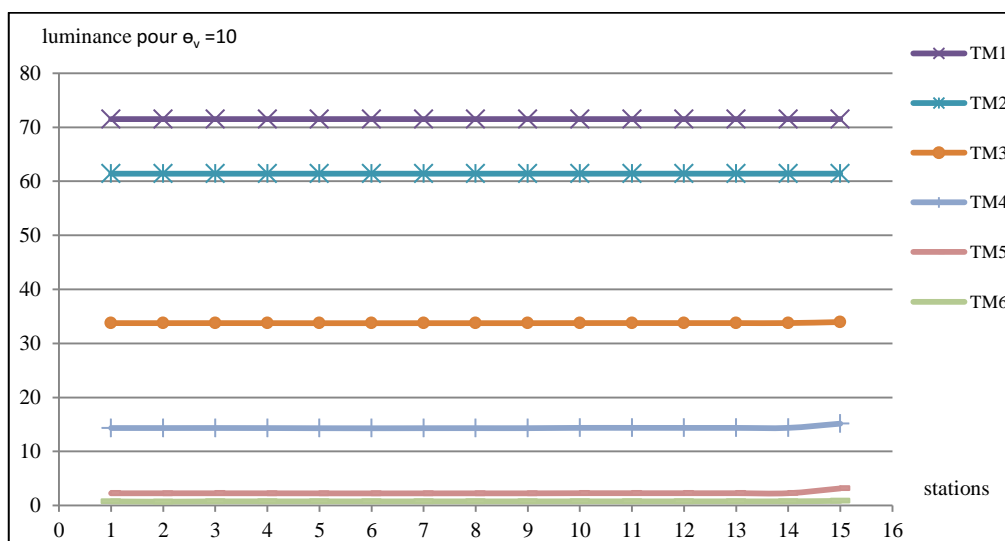
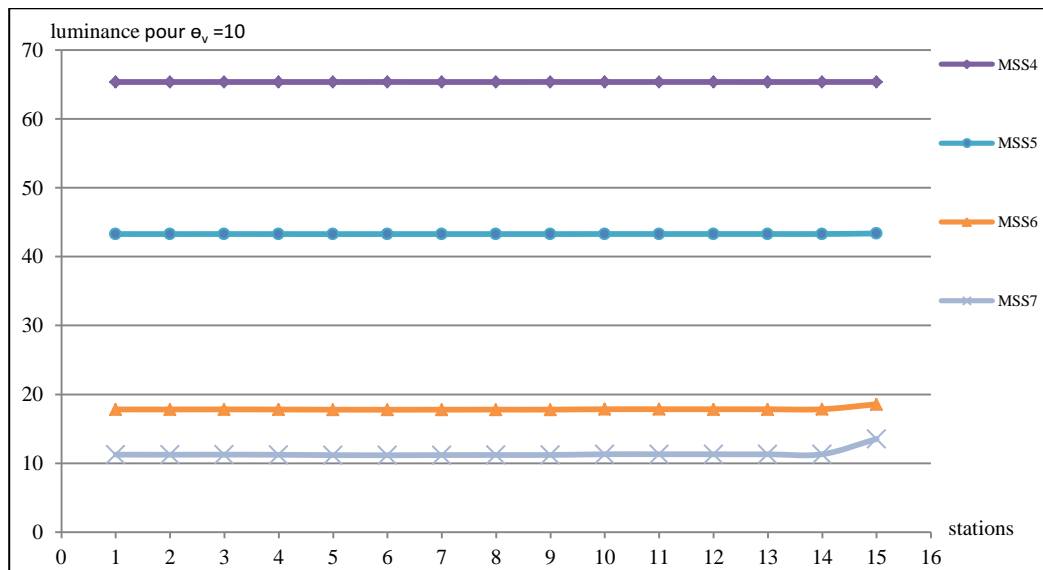


Figure 4.29 : Variation de luminance de l'eau de mer de Bousmaïl pour le satellite Landsat.



**Figure 4.30** : Variation de luminance de l'eau de mer de Bousmaïl pour le satellite Landsat.

#### VI-4-3-Calcul de réflectance

Pour pouvoir transformer des valeurs de luminance en valeurs de réflectances, nous pouvons estimer que dans un canal donné les variations entre les valeurs de luminance pour des objets différents au niveau du sol. La transformation se base sur les différences observées sur les réflectances d'au moins deux surfaces identifiées sur l'image (Baban & Serwan,1993), nous avons porté notre choix sur une zone de l'eau de la mer de 1000 pixels.

Afin de nous permettre de trouver une relation linéaire entre le compte numérique d'un pixel et ça luminance apparente au niveau du capteur, et pour tenir compte des écarts entre les résultats simulés et les résultats réels. Nous avons calculé par simulation les valeurs radiométriques de la zone choisie. (Bachari et al.,1997).

**Tableau 4.11**: Relations de conversion en comptes numériques et en réflectances (application eau de mer)

Canaux	Comptes numériques	Réflectance
XS1	$CN = 1,23 L + 0,22$	$Réf = 3,0604 \cdot 10^{-3} CN - 0,3418$
XS2	$CN = 1,24 L - 0,08$	$Réf = 3,2166 \cdot 10^{-3} CN - 0,2676$
XS3	$CN = 1,32 L - 0,59$	$Réf = 4,7972 \cdot 10^{-3} CN - 0,2136$

## Landsat (TM)

TM1	CN = 1,6611 L + 2,4917	Réf = $2,3320 \cdot 10^{-3}$ CN - 0,3904
TM2	CN = 0,8547 L + 2,3932	Réf = $4,3850 \cdot 10^{-3}$ CN - 0,3307
TM3	CN = 1,2407 L + 1,4888	Réf = $3,4250 \cdot 10^{-3}$ CN - 0,2654
TM4	CN = 1,227 L + 1,8405	Réf = $4,1144 \cdot 10^{-4}$ CN - 0,2801
TM5	CN = 95,525 L + 3,4234	Réf = $5,0293 \cdot 10^{-3}$ CN - 0,2285
TM6	CN = 177,55 L - 21,9809	Réf = $4,9826 \cdot 10^{-4}$ CN - 9,5667

## Landsat (MSS)

MSS4	CN = 4,792 L - 1,437	Réf = $8,0244 \cdot 10^{-4}$ CN - 0,3496
MSS5	CN = 7,216 L - 2,164	Réf = $3,6758 \cdot 10^{-4}$ CN - 0,2717
MSS6	CN = 8,881 L - 4,4405	Réf = $3,9660 \cdot 10^{-4}$ CN - 0,2436
MSS7	CN = 10,583 L - 3,175	Réf = $4,5686 \cdot 10^{-4}$ CN - 0,2246

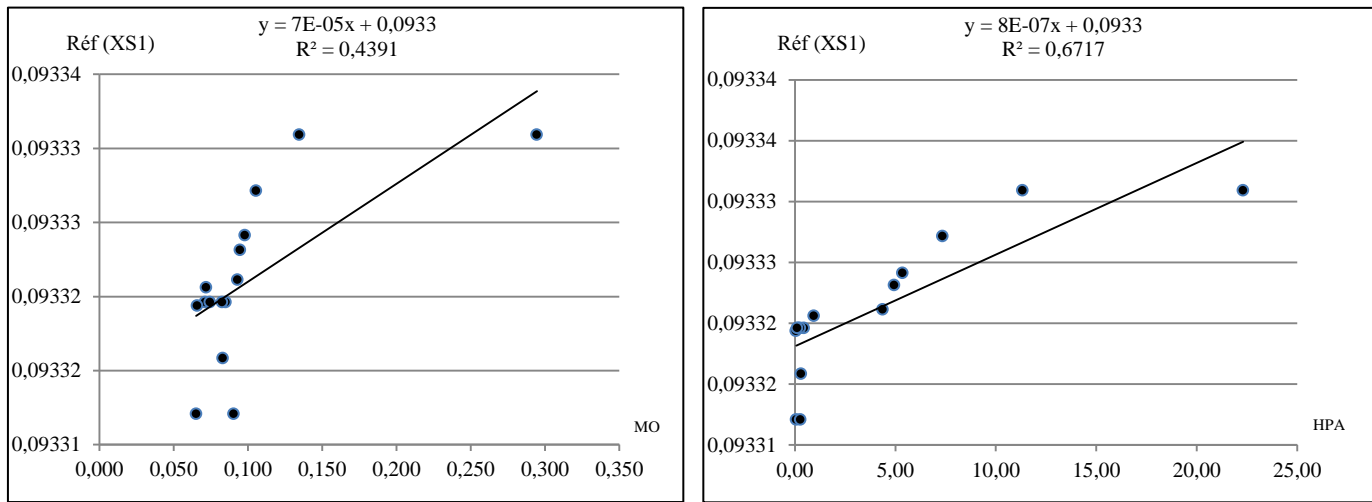
**VI-4-4-Corrélations propriétés optiques aux paramètres indicateurs de pollution**

Après avoir donné les résultats et les réflectances calculées pour les différentes stations et dans les différentes bandes spectrales, nous procédons à l'analyse mathématique qui a pour but de rechercher la possibilité des éventuelles relations d'ajustement entre les réflectances, les paramètres physicochimiques et la teneur des polluants organiques. Nous présentons les différentes relations trouvées et le coefficient de détermination des différents ajustements linéaires entre les réflectances et les paramètres indicateurs de la pollution dans le tableau suivant :

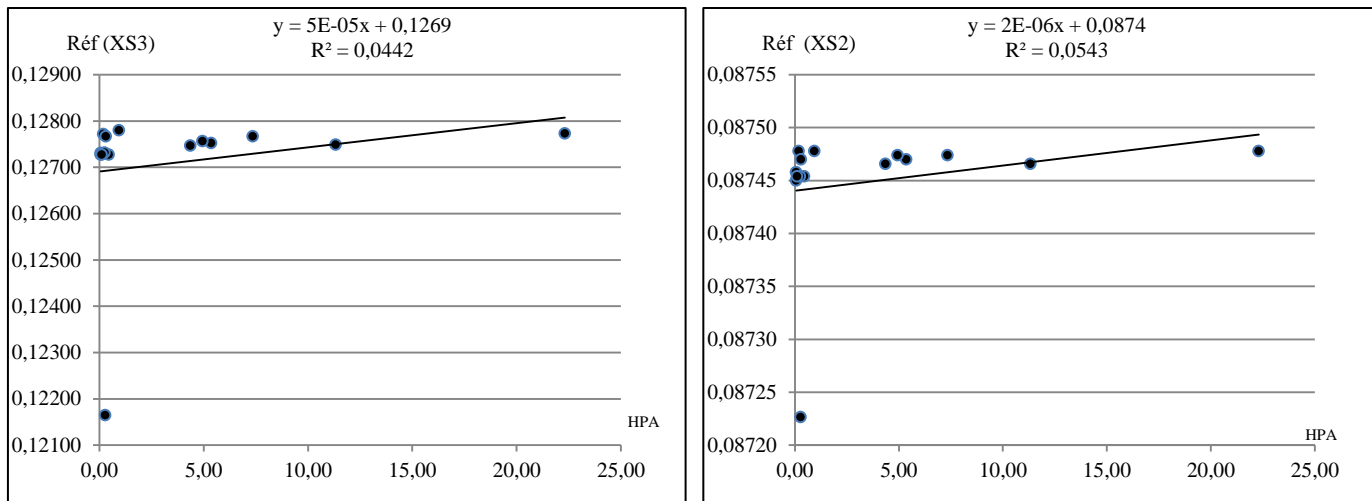
**Tableau 4.12:** Résultats des taux de liaison dans les eaux de mer de Bousmaïl, modélisation linéaire

Fonction	droite d'ajustement	coefficient de Détermination
<b>Réf (XS1) = f(MO)</b>	Réf (XS1) = $7E-05 \cdot MO + 0,0933$	$R^2 = 0,4391$
<b>Réf (XS1) = f(HPA)</b>	Réf (XS1) = $8E-07 \cdot HPA + 0,0933$	$R^2 = 0,6717$
<b>Réf (TM1) = f(MO)</b>	Réf (TM1) = $6E-05 \cdot MO + 0,1061$	$R^2 = 0,3661$
<b>Réf (TM1) = f(HPA)</b>	Réf (TM1) = $8E-07 \cdot HPA + 0,1061$	$R^2 = 0,5795$
<b>Réf (MSS4) = f(HPA)</b>	Réf (MSS4) = $7E-07 \cdot HPA + 0,098$	$R^2 = 0,5685$
<b>Réf (XS1) = f(MES)</b>	Réf (XS1) = $0,0027 \cdot MES - 0,1318$	$R^2 = 0,2536$
<b>Réf (XS1) = f (HPA)</b>	Réf (XS1) = $0,1182 \cdot HPA + 0,0478$	$R^2 = 0,7508$

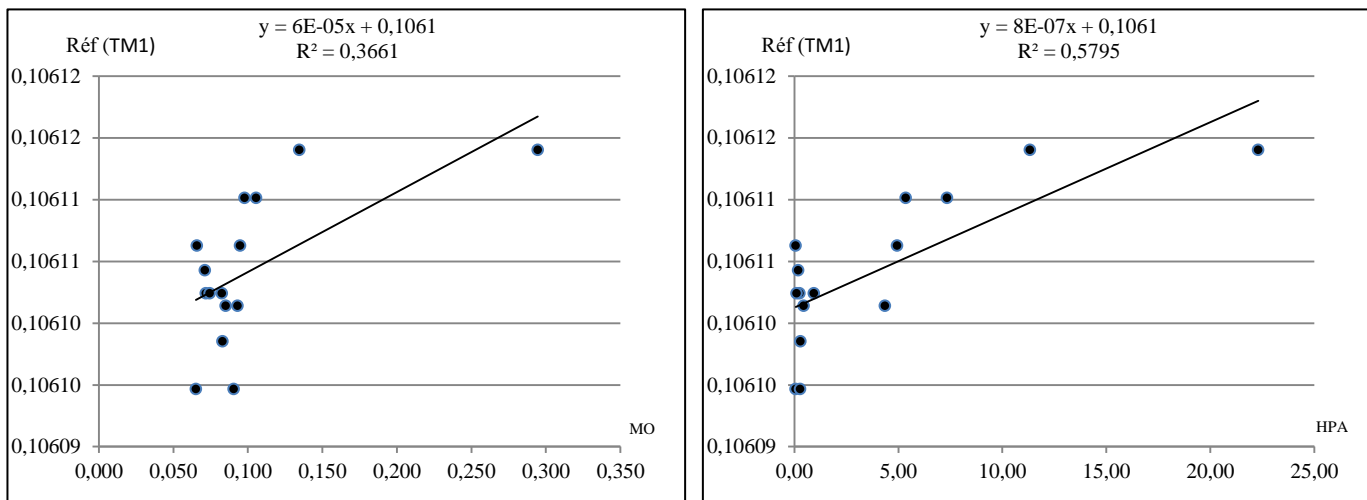
Les résultats sont moyens par rapport à la matière organique. Nous avons un coefficient de détermination de ( $R^2 = 0,4391$ ) pour la matière organique sur le canal XS1 du SPOT et un coefficient de détermination ( $R^2 = 0,3196$ ) sur le canal MSS4 du satellite Landsat.



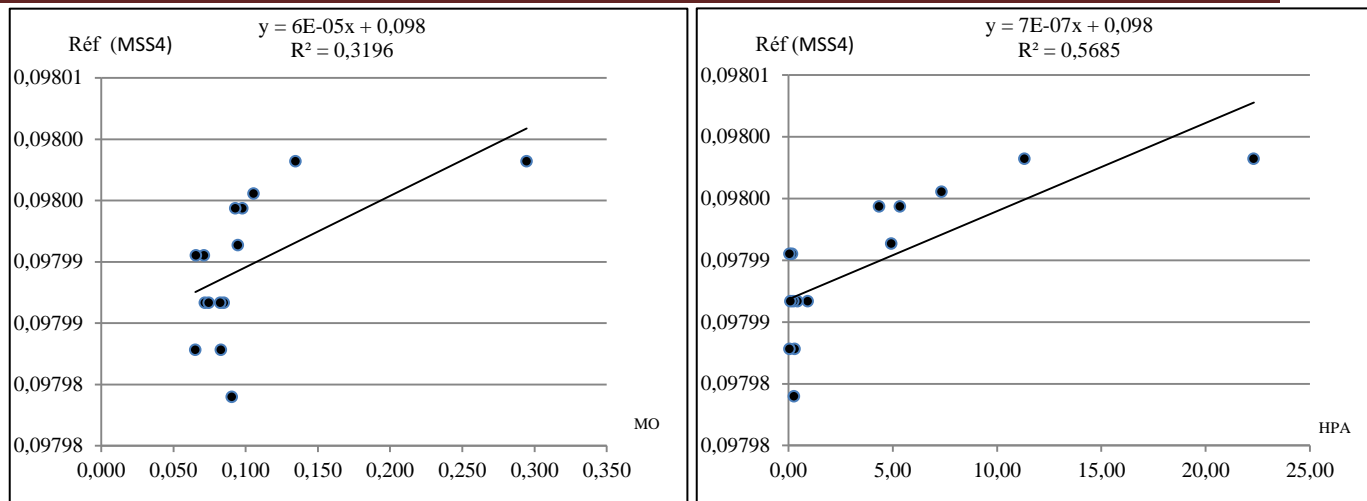
**Figure 4.31:** Modélisation linéaire des différents paramètres dans les eaux de mer de Bousmaïl pour le canal XS1 du satellite Spot



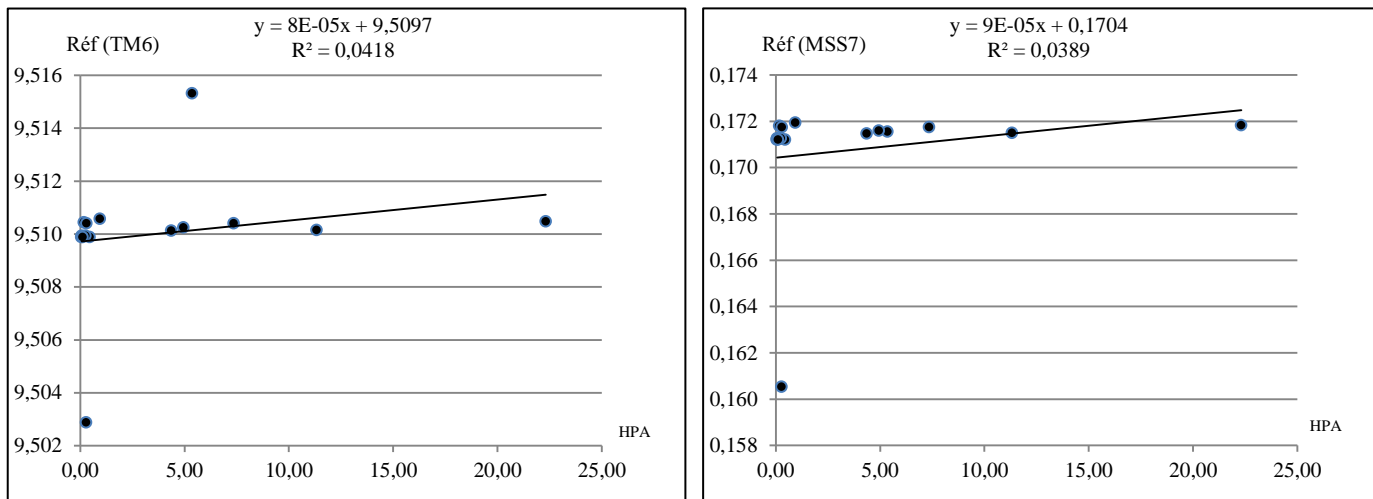
**Figure 4.32:** Modélisation linéaire des différents paramètres dans les eaux de mer de Bousmaïl pour le canal XS2 et XS3 du satellite Spot



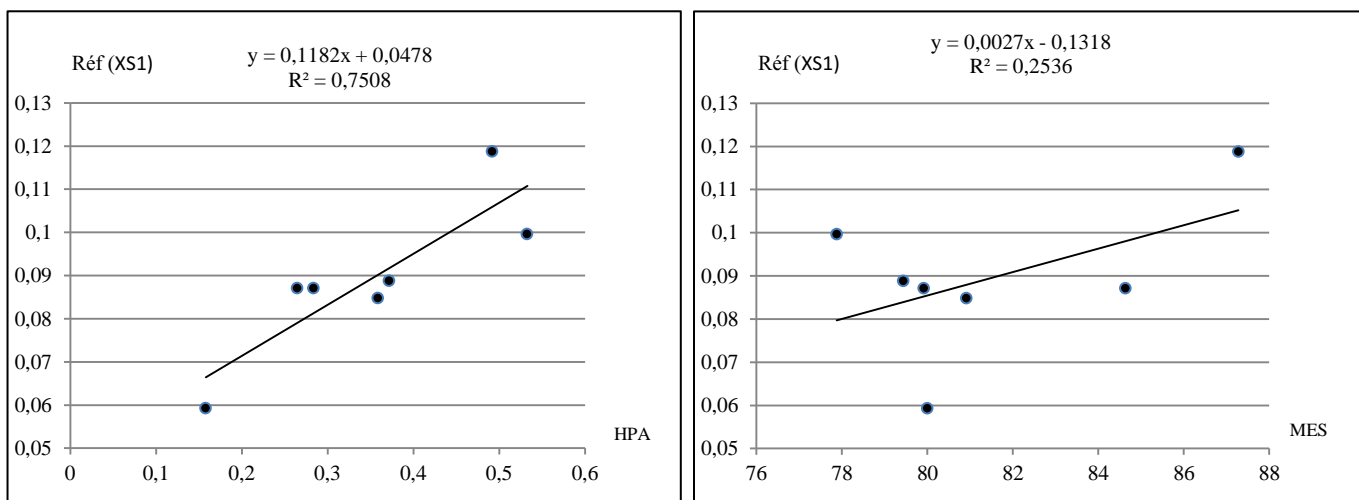
**Figure 4.33 :** Modélisation linéaire des différents paramètres dans les eaux de mer de Bousmaïl pour le canal TM1 du satellite Landsat



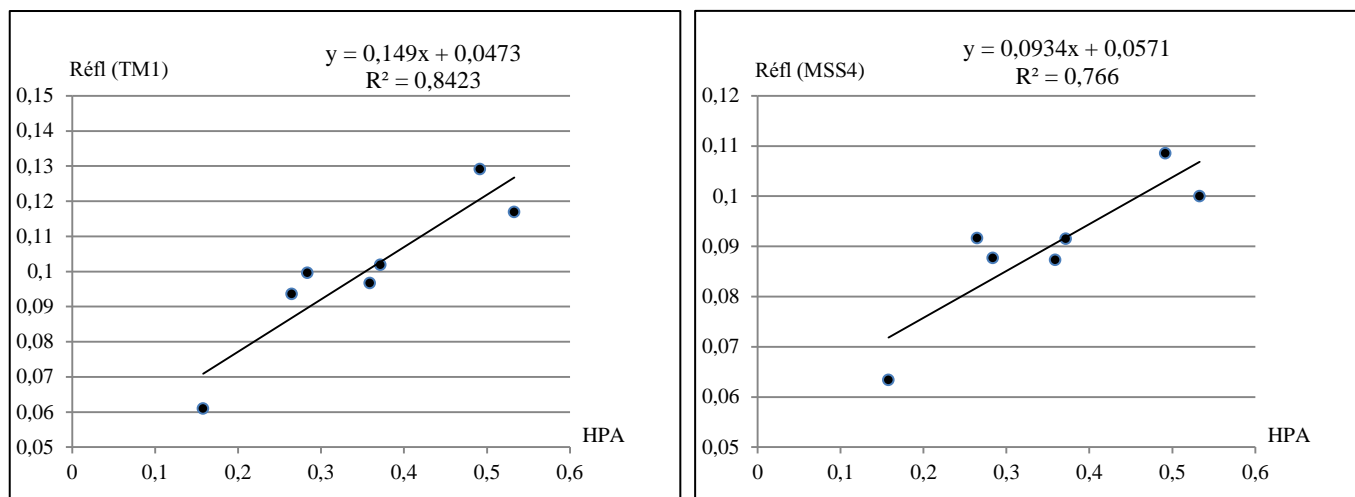
**Figure 4.34:** Modélisation linéaire des différents paramètres dans les eaux de mer de Bousmaïl pour le canal MSS4 du satellite Landsat



**Figure 4.35:** Modélisation linéaire des hydrocarbures polycycliques dans les eaux de mer de Bousmaïl pour le canal TM6 et MSS7 du satellite Landsat



**Figure 4.36:** Modélisation linéaire des différents paramètres dans les eaux de mer d'El Djamilia pour le canal XS1 du satellite Spot



**Figure 4.37** : Modélisation linéaire des hydrocarbures polyaromatiques dans les eaux de mer d'El Djamila pour le canal TM1 et MSS4 du satellite Landsat

La corrélation est meilleure pour le canal XS1 que XS2 et pour XS2 que XS3 sur le satellite SPOT ; le canal TM du satellite Landsat donne une forte liaison sur le premier canal tandis que le capteur MSS4 présente seul le canal intéressant pour notre application.

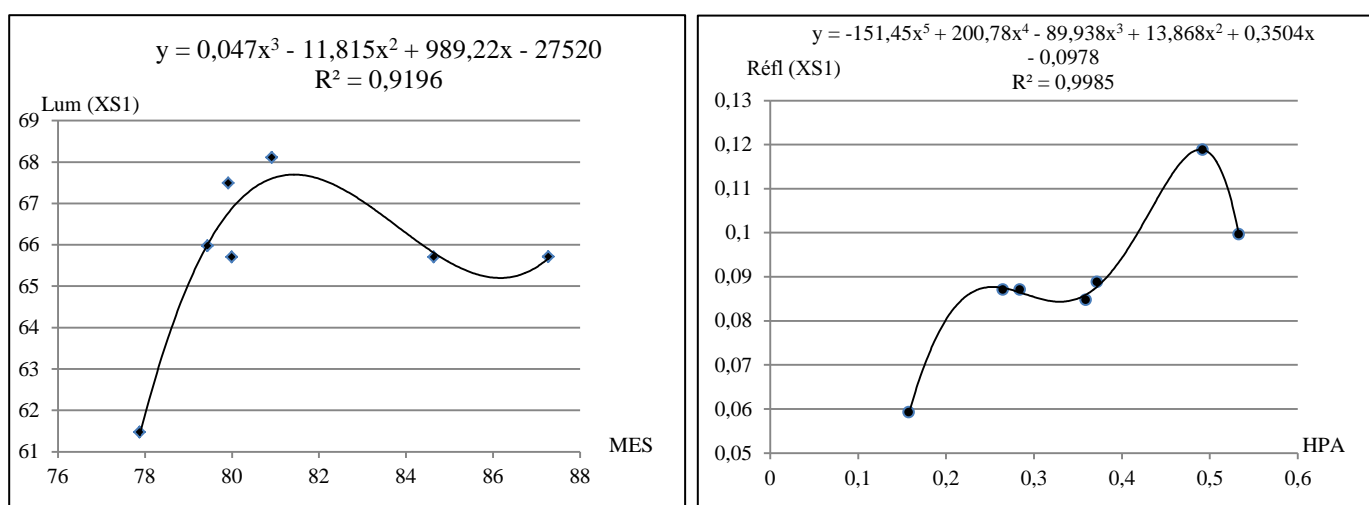
En comparant les coefficients de détermination, nous avons trouvé que l'ajustement linéaire donne les meilleurs résultats sur les premiers canaux des satellites, et par conséquent nous pouvons identifier un domaine adéquat du spectre électromagnétique nécessaire pour étudier ou identifier un paramètre lié à la pollution de l'eau de mer. Une forte liaison est donc obtenue dans notre cas entre les réflectances dans les portions du visible. (Houma, 2009)

Les bandes spectrales XS1, TM1, et MSS4 donnent les meilleurs coefficients de détermination avec les réflectances correspondantes Réf (XS1); Réf(TM1), et Réf(MSS4) ; elles sont donc les mieux adaptées pour le suivi de la qualité des eaux.

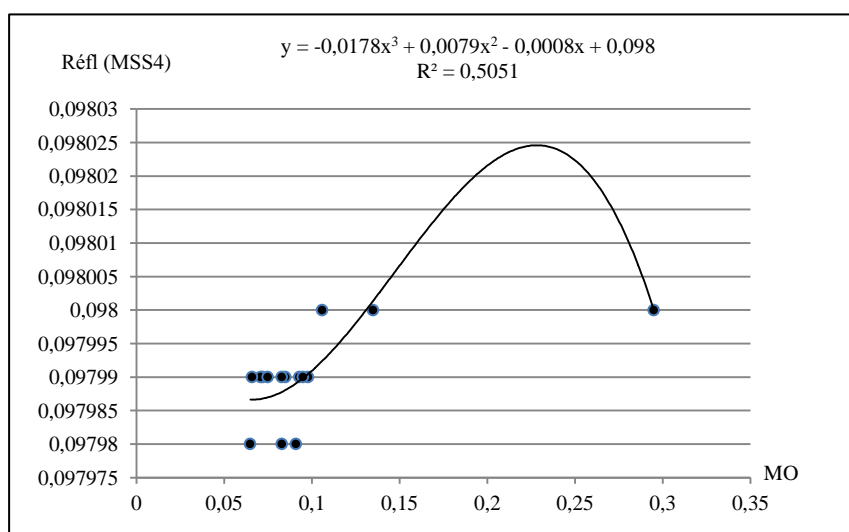
Les plus faibles valeurs sont observées sur le canal XS3, TM5, TM6, MSS6 et MSS7 ce qui est tout à fait logique puisque l'absorption de l'eau devient très importante dans cette bande infrarouge par contre la diffusion du rayonnement devient très faible et presque négligeable ce qui diminue l'information acquise par les capteurs.

**Tableau 4.13:** Résultats des taux de liaison dans les eaux de mer de Bousmaïl, modélisation non linéaire

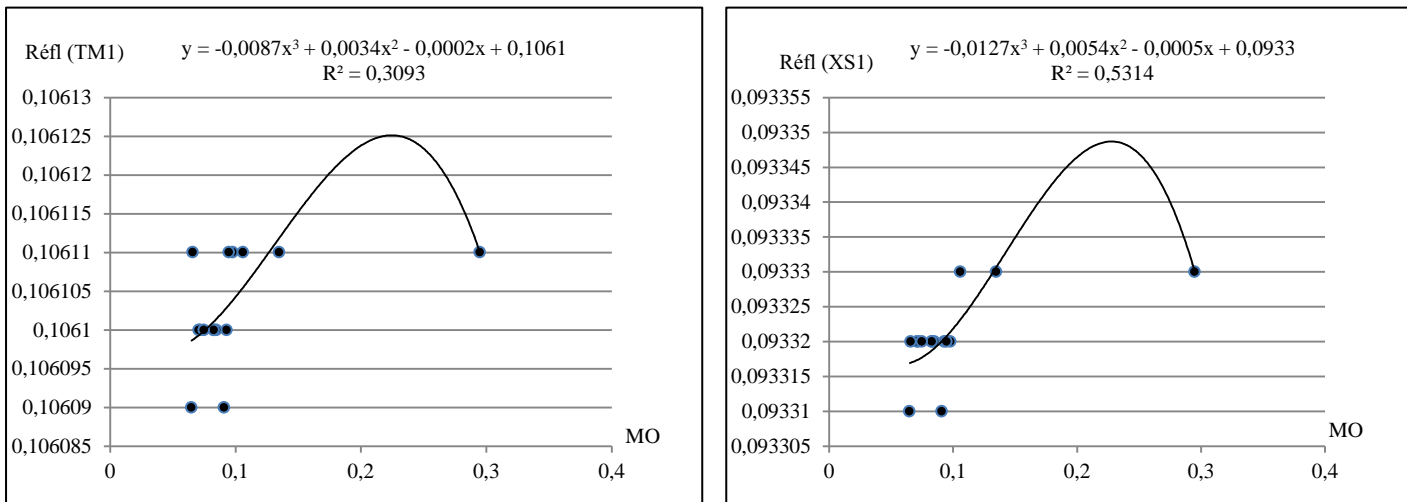
Fonction	droite d'ajustement	coefficient de Détermination
Lum (XS1) = f(MES)	$Lum(XS1) = 0,047MES^3 - 11,815MES^2 + 989,22.MES - 27520$	$R^2 = 0,9196$
Réf (XS1) = f(HPA)	$Réf = -151,45HPA^5 + 200,78HPA^4 - 89,938HPA^3 + 13,868HPA^2 + 0,3504HPA - 0,0978$	$R^2 = 0,9985$
Réf (TM1) = f(HPA)	$Réf(TM1) = -425,3 HPA^5 + 714,55HPA^4 - 459,91HPA^3 + 140,73HPA^2 - 20,15HPA + 1,1421$	$R^2 = 0,9943$
Réf (XS1) = f(MES)	$Réf(XS1) = 0,0015MES^2 - 0,2425.MES + 9,9973$	$R^2 = 0,6983$
Réf (MSS4) = f(MO)	$Réf(MSS4) = -0,0178MO^3 + 0,0079MO^2 - 0,0008.MO + 0,098$	$R^2 = 0,5051$
Réf (MSS4) = f(HPA)	$Réf(MSS4) = -6E-09 HPA^3 + 1E-07HPA^2 + 5E-07HPA + 0,098$	$R^2 = 0,6183$



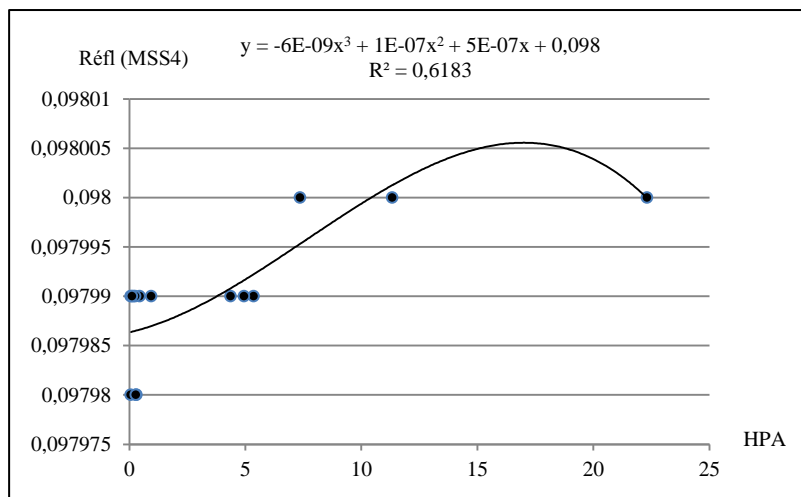
**Figure 4.38:** Modélisation non linéaire des hydrocarbures polyaromatiques et des MES dans les eaux de mer d’El-Djamila pour le canal XS1 du satellite Spot



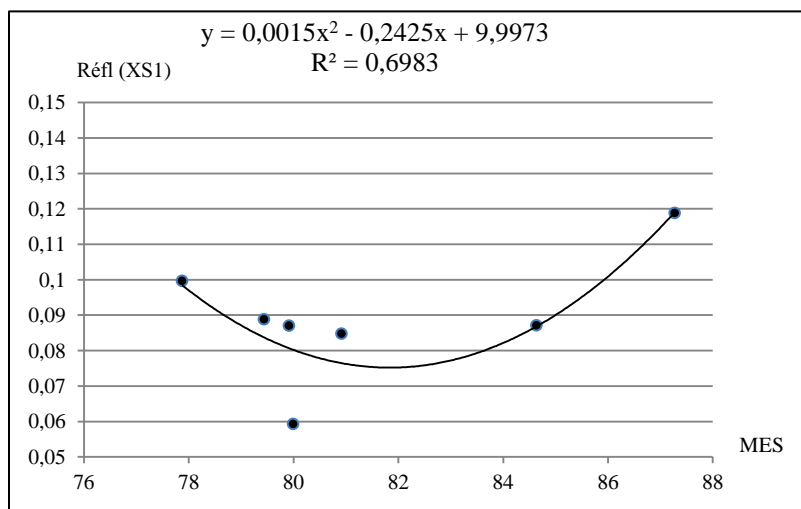
**Figure 4.39:** Modélisation non linéaire de la matière organique dans les eaux de mer de Bousmaïl pour le canal MSS4 du satellite landsat



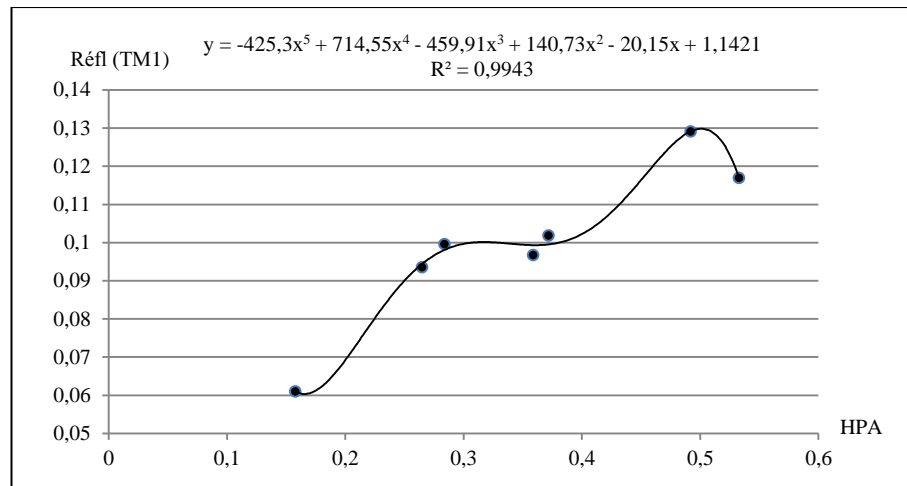
**Figure 4.40 :** Modélisation non linéaire de la matière organique dans les eaux de mer de Bousmaïl pour le canal TM1 et XS1



**Figure 4.41:** Modélisation non linéaire des hydrocarbures polycycliques dans les eaux de mer de Bousmaïl pour le canal MSS4 du satellite Landsat



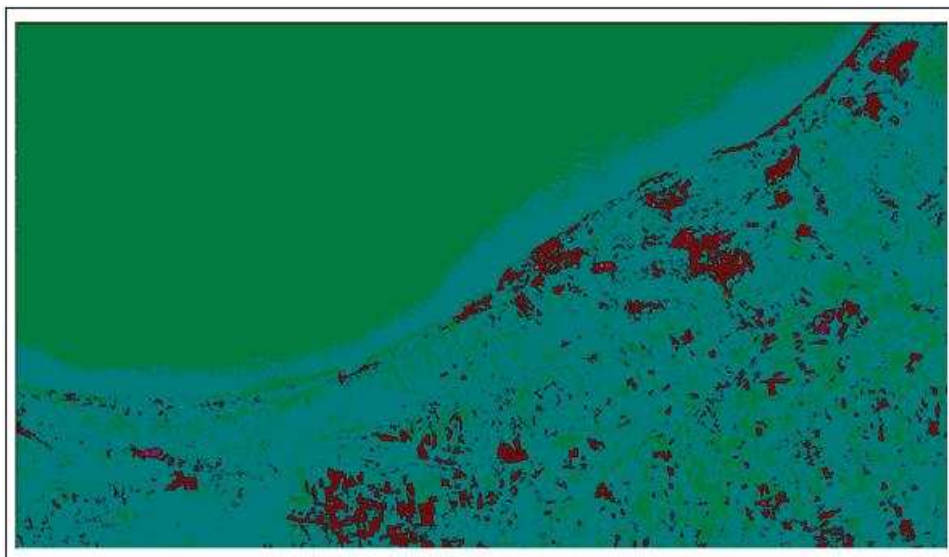
**Figure 4.42:** Modélisation non linéaire de la matière en suspension dans les eaux de mer d'El-Djamila pour le canal XS1 du satellite Spot



**Figure 4.43:** Modélisation non linéaire des hydrocarbures polyaromatiques dans les eaux de mer d'El-Djamila pour le canal TM1 du satellite Landsat

#### VI-4-5- Application des images de Spot et de Landsat

L'image disponible couvre toute la baie d'étude, après la correction radiométrique portée sur l'image brute de la baie, l'inversion de la relation de distribution des hydrocarbures polyaromatique par exemple donnera l'image convertie des hydrocarbures polyaromatiques.



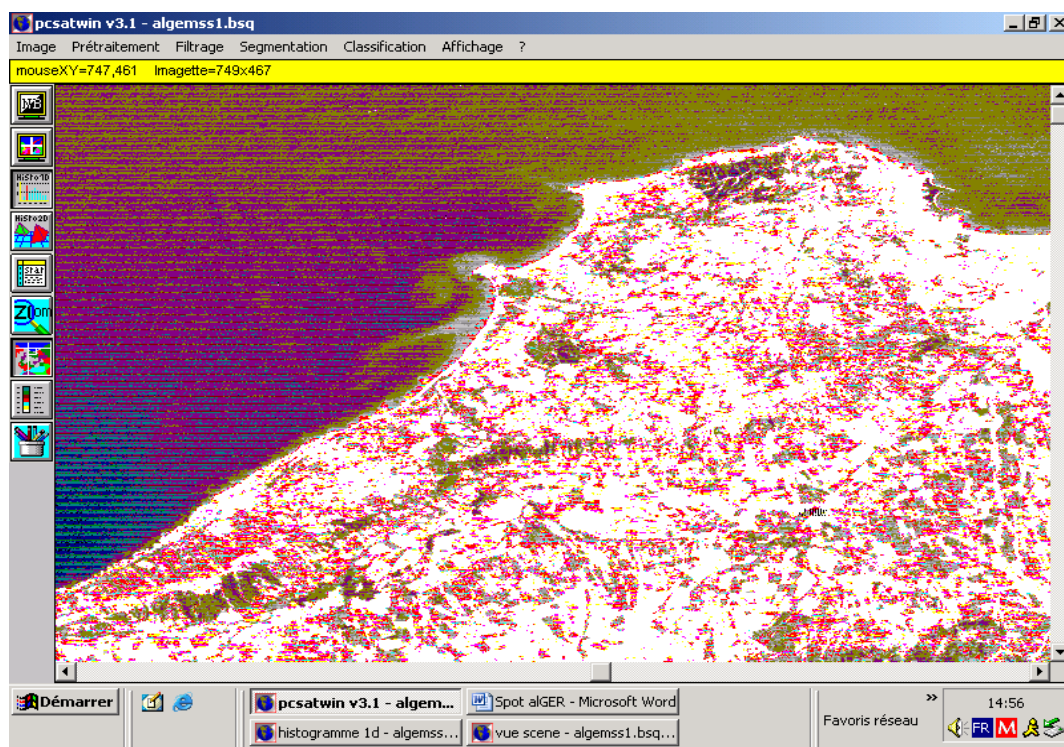
**Figure 4.44:** Image satellitaire brute de la baie de Bousmail sur le canal LANDSAT-TM1

La transformation des images réflectance des satellites SPOT, TM et MSS en images indicatrices des paramètres en appliquant les transformations inverses est possible (utilisation des équations des droites d'ajustement pour certains paramètres).

En utilisant le logiciel de traitement d'images satellites PCSATWIN, nous pouvons transformer l'image réflectance en une image qui permet d'estimer dans une certaine mesure la distribution de la concentration des hydrocarbures polyaromatique au niveau de la baie de Bousmail. La pollution sera indiquée par des valeurs radiométriques élevées.



**Figure 4.45** : Spatialisation des hydrocarbures polyaromatiques. Image Landsat TM1 de la baie de Bousmaïl transformée à partir de la relation  $\text{Réf (TM1)} = -3\text{E-}10\text{HPA}^5 + 2\text{E-}08\text{HPA}^4 - 3\text{E-}07\text{HPA}^3 + 2\text{E-}06\text{HPA}^2 - 4\text{E-}06\text{HPA} + 0,1061$



**Figure 4.46** : Spatialisation de la matière en suspension. Image MSS4 de la baie de Bousmaïl transformée à partir de la relation  $\text{Réf (XS1)} = 0,0015\text{MES}^2 - 0,2425\text{MES} + 9,9973$

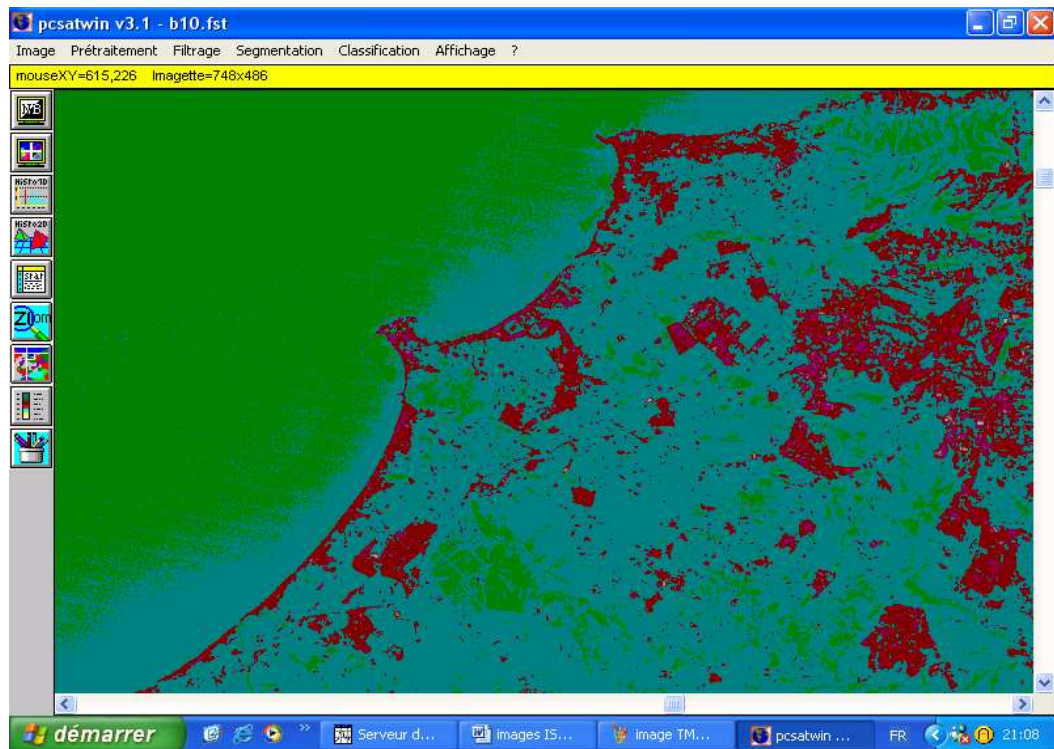


Figure 4.47 : Image SPOT brute de la baie d'El-Djamila.

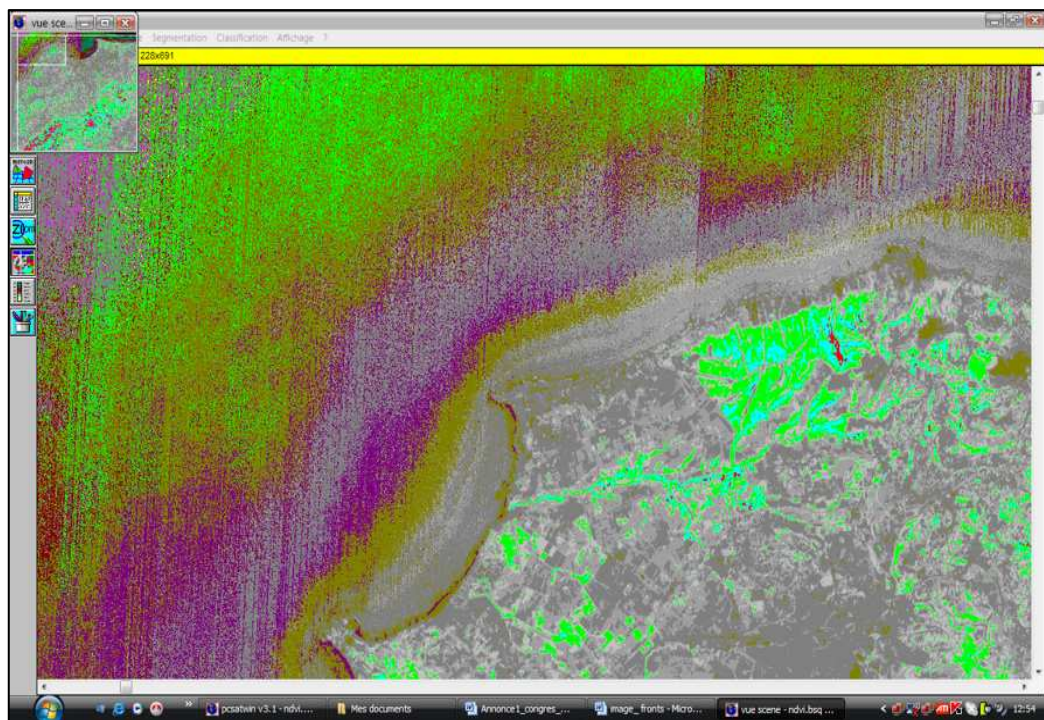
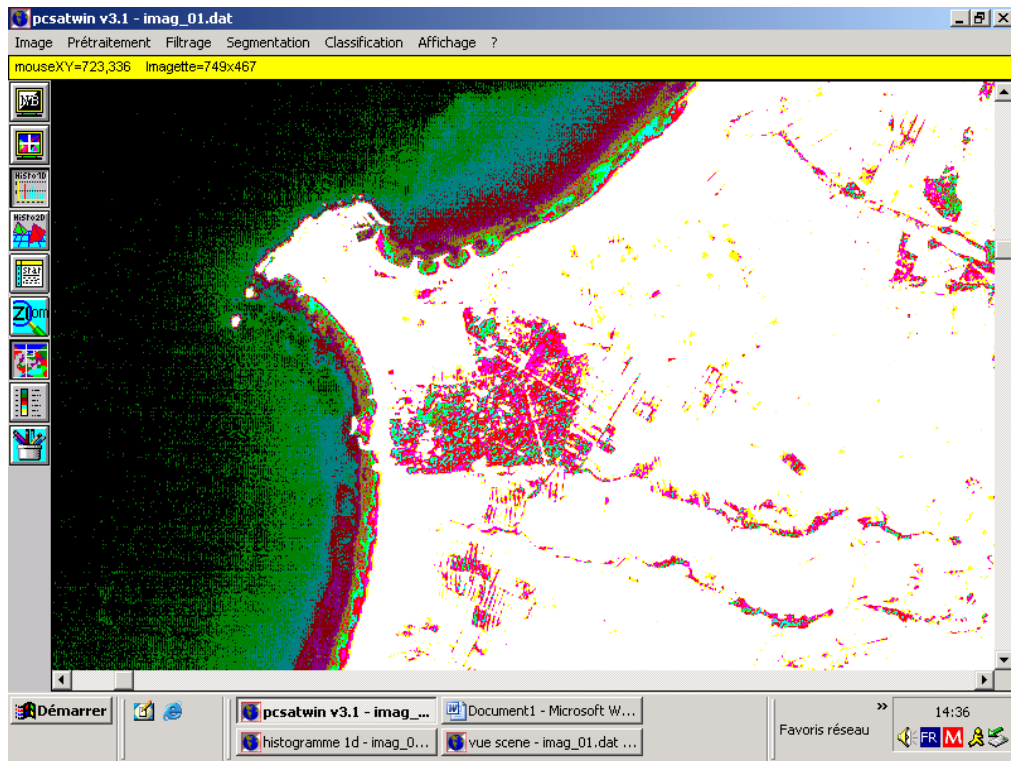
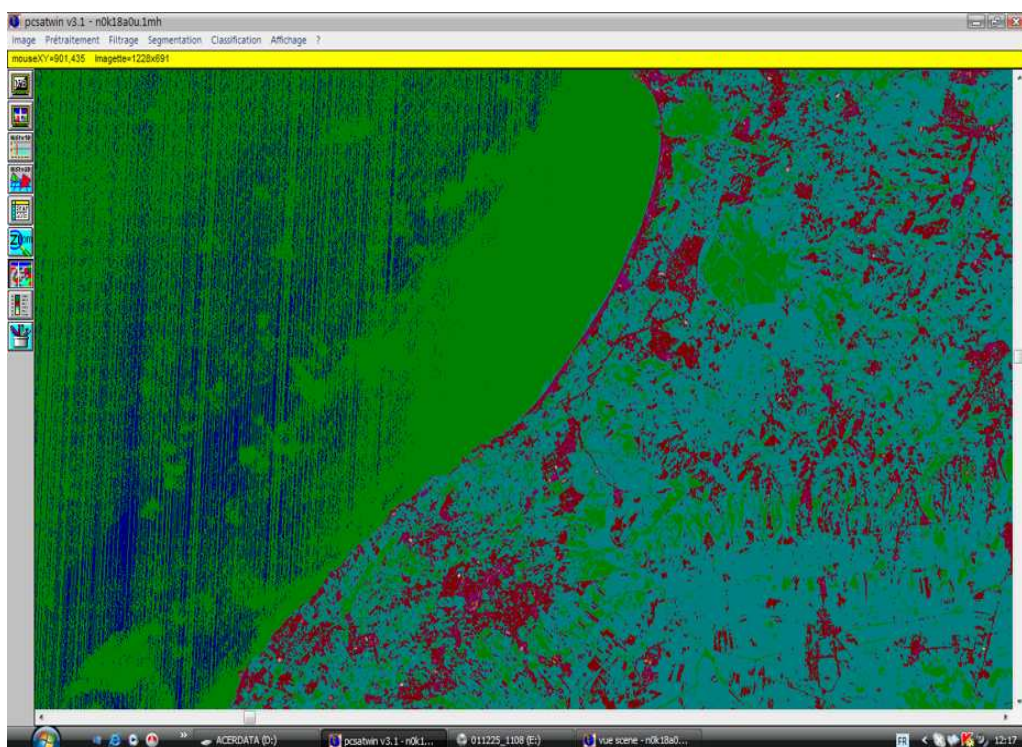


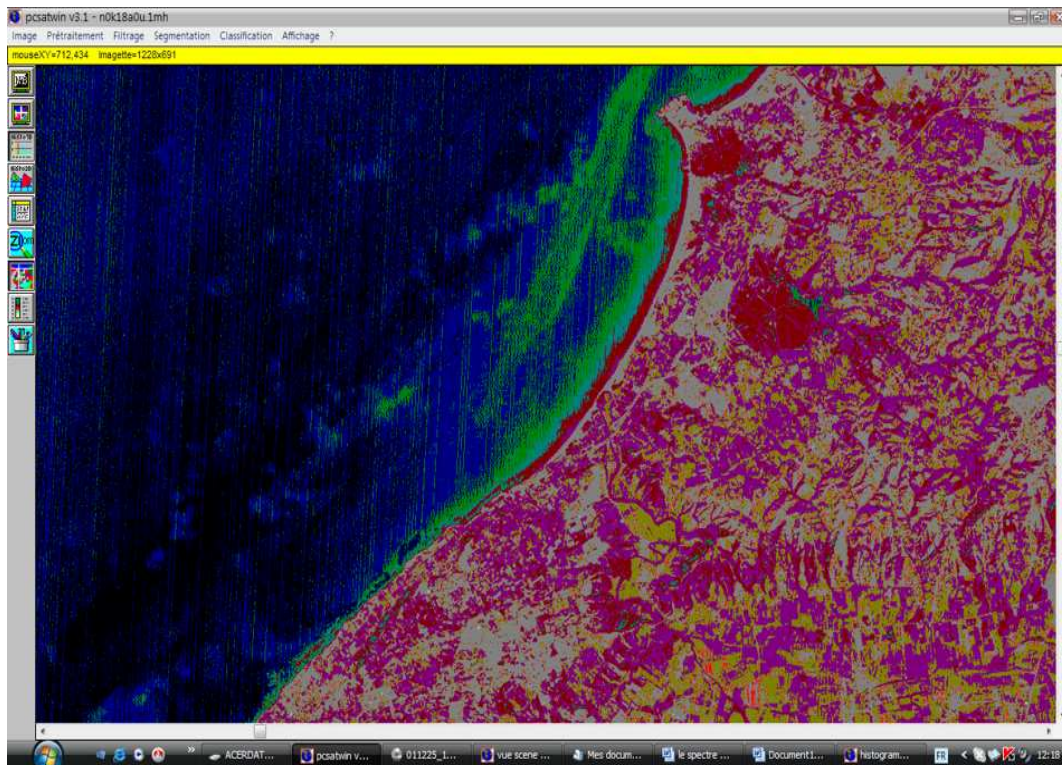
Figure 4.48 : Spatialisation des hydrocarbures polyaromatiques. Image Spot XS1 de la baie d'EL-Djamila transformée à partir de la relation  $\text{Réf}(XS1) = -74,266.HPA^4 + 102,68.HPA^3 - 50,753.HPA^2 + 10,656.HPA - 0,7161$



**Figure 4.49** : Spatialisation de la matière en suspension. Image Spot XS1 de la baie de Bousmail transformée à partir de la relation  $\text{Réf (XS1)} = 7\text{E-}05.\text{MES}^4 - 0,0223.\text{MES}^3 + 2,7658.\text{MES}^2 - 152,24.\text{MES} + 3142,2$



**Figure 4.50** : Image LANDSAT (MSS4) brute de la baie de Bou Ismail.



**Figure 4.51 :** Spatialisation des hydrocarbures polyaromatiques. Image Landsat MSS4 de la baie de Bousmail transformée à partir de la relation  $\text{Réf}(\text{MSS4}) = 2\text{E}-09.\text{HPA}^4 - 8\text{E}-08.\text{HPA}^3 + 9\text{E}-07.\text{HPA}^2 - 2\text{E}-06.\text{HPA} + 0,098$

#### VI-5- Analyse des réflectances pour la baie d'El Djamila

Les luminances des sites étudiés sont converties en réflectances puis corrélées dans chaque canal satellitaire avec les paramètres physico-chimiques, Le spectre de réflectance de l'eau se trouve entièrement entre  $0,4\mu\text{m}$  et  $0,7\mu\text{m}$ , où le maximum de réflexion est enregistré dans les faibles longueurs d'ondes du spectre visible, précisément vers  $0,5\mu\text{m}$  (Guyot, 1989).

La spatialisation de la réflectance est donnée dans les figures 52,53, et 54, les réflectances montrent la variation de la pollution sur toute la baie où nous avons remarqué au niveau des points pollués que la réflectance est relativement forte par rapport à celle des points de moindre pollution, ceci explique parfaitement que la mesure satellite des zones chargées est plus importante que celle des zones moins chargées. La réflectance des eaux turbides et polluées est d'une façon générale plus haute que la réflectance des eaux claires. (Bricaud, 1988), Ces résultats prouvent l'existence d'un lien entre la réflectance, la qualité et la charge de l'eau.

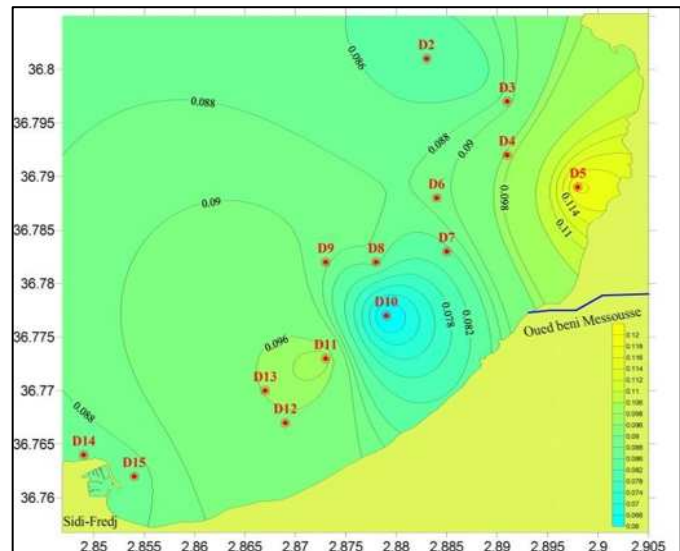
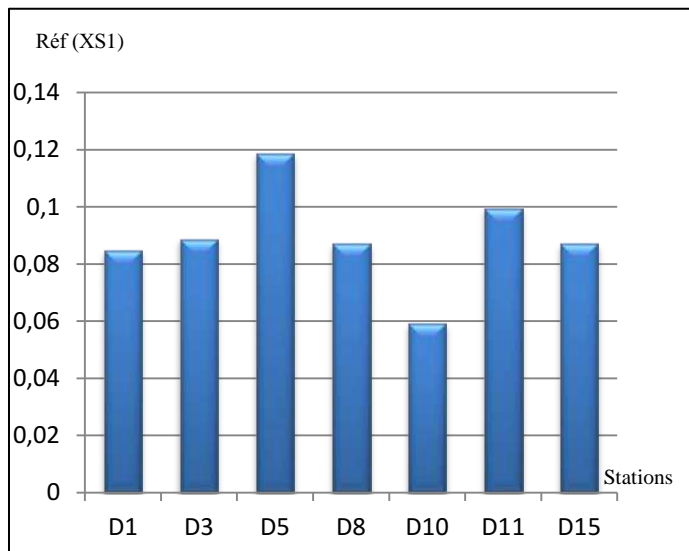


Figure 4.52: Résultats de la réflectance pour le canal XS1 du satellite Spot.

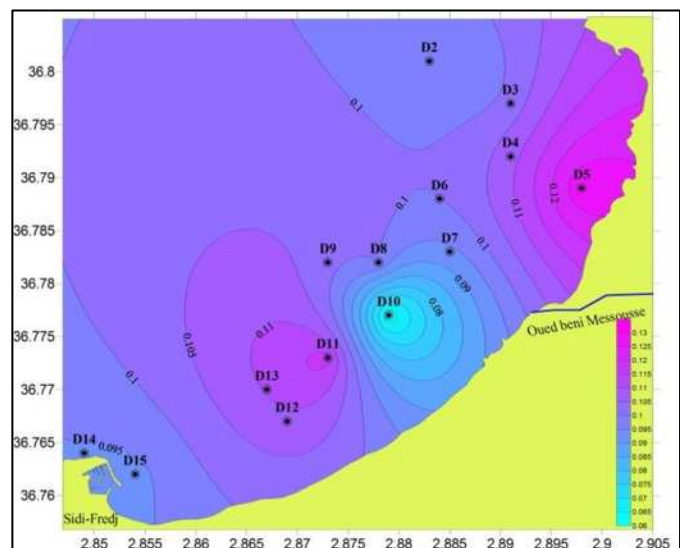
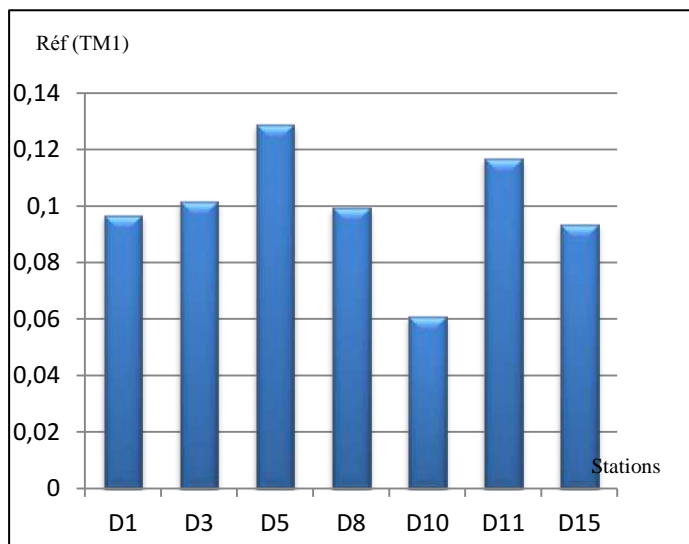


Figure 4.53: Résultats de la réflectance pour le canal TM1 du satellite Landsat.

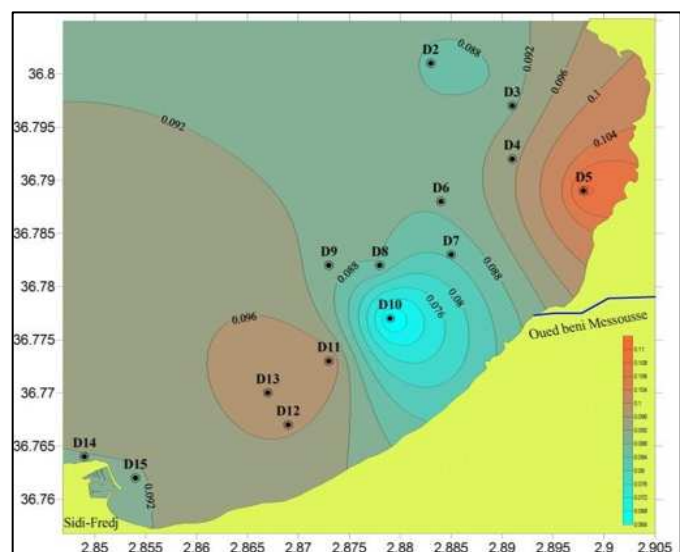
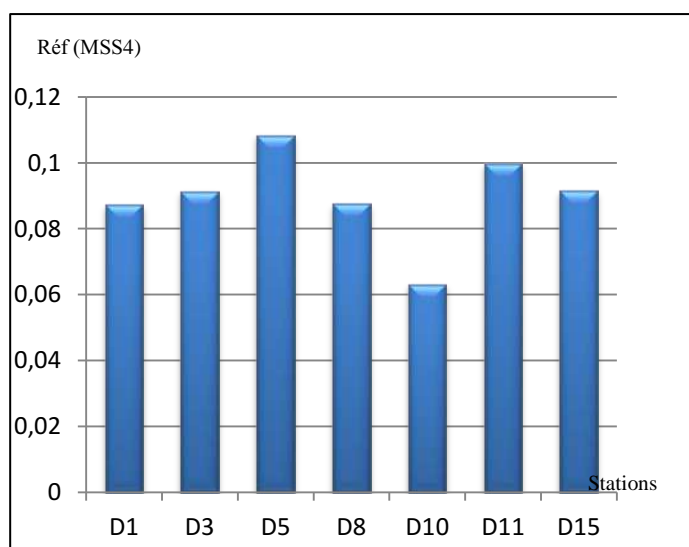


Figure 4.54: Résultat de la réflectance pour le canal MSS4 du satellite Landsat.

La forte présence des matières en suspension dans les lieux diminue la visibilité et limite l'introduction des rayons solaires dans le milieu aquatique, de plus, la turbidité et les matières en suspension ont un effet commun lié à l'élévation du signal de retour influent sur les valeurs de réflectance.

Les canaux XS1, TM1, et MSS4 sont cependant les plus adaptés pour l'étude de la qualité des eaux de mer et les plus utilisés pour la mise en valeur de la pollution des zones côtières par rapport aux autres canaux des satellites.

Les films des hydrocarbures produisent des réponses lumineuses dans des images UV, parce que la lumière du soleil fait briller par fluorescence les hydrocarbures aux longueurs d'onde UV. L'acquisition des images UV est la méthode la plus sensible pour surveiller les hydrocarbures sur l'eau, et il peut détecter des films aussi légèrement que  $0.15 \mu\text{m}$  (L.DE DOMENICO.1994).

La réflectance enregistre une très forte valeur pour les stations D5, D11 et D15. Les données satellites comparées à celles retrouvées sur le terrain sont très similaires, nous pouvons alors faire un suivi sur la côte algérienne dans le cas de la pollution marine par les hydrocarbures.

#### **VI-6- Analyse des réflectances pour la baie de Bousmail**

Les images de réflectance permettent d'estimer la pollution des milieux aquatiques par les polluants organiques. En effet, il existe une forte liaison entre les réflectances et teneur des hydrocarbures polyaromatiques.

Nous remarquons que, plus les teneurs en hydrocarbures augmentent et plus la réflectance devient importante, ce qui nous amène à déduire que la pollution est indiquée par des valeurs radiométriques élevées.

En présence d'hydrocarbures dispersés, les propriétés optiques de l'eau changent, en diminuant la luminance réfléchiée par l'eau aux courtes longueurs d'onde et en l'augmentant aux grandes longueurs d'ondes. La radiance de l'eau réfléchiée est encore modifiée par l'absorption lors de son passage à travers la couche de pétrole et par la transmission à travers l'interface pétrole-air.

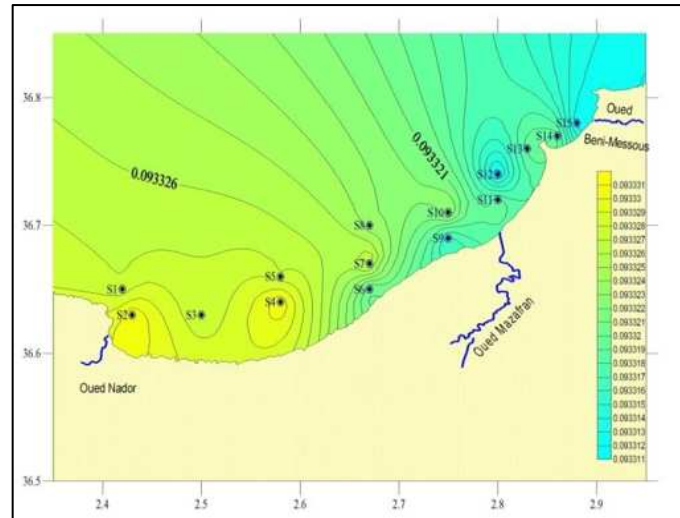
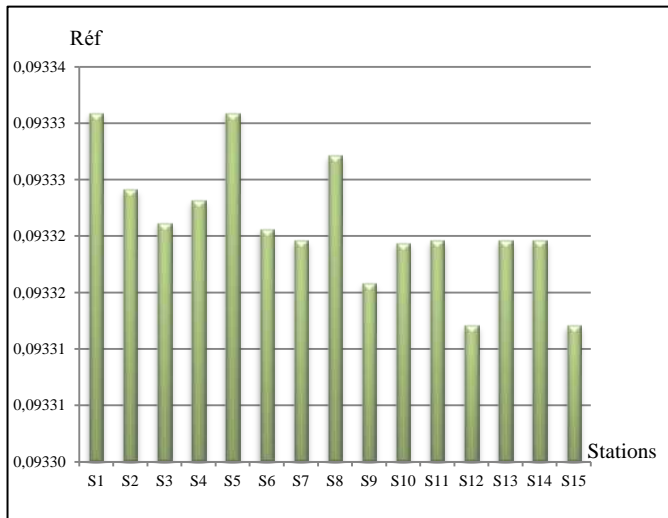


Figure 4.55: Résultats de la réflectance pour le canal XS1 du satellite Spot

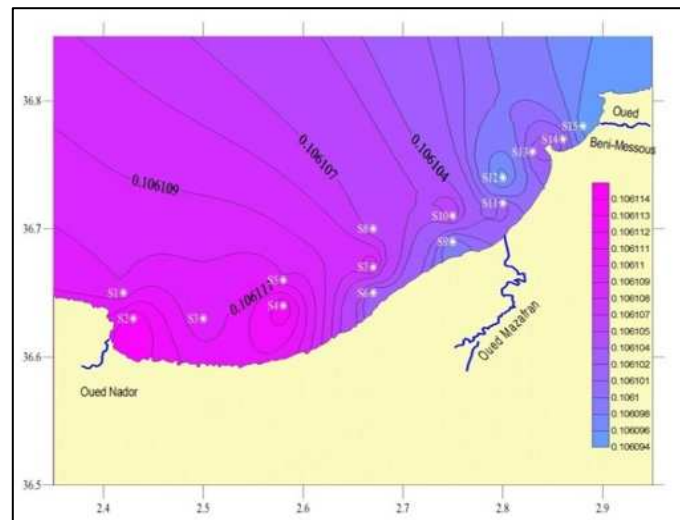
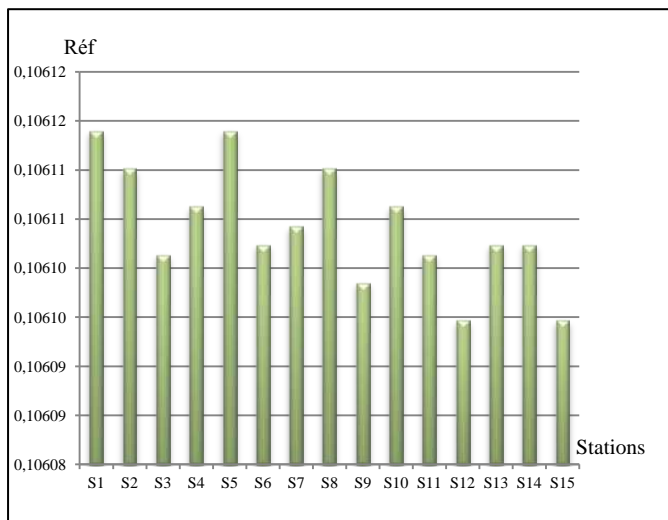


Figure 4.56: Résultats de la réflectance pour le canal TM1 du satellite Landsat.

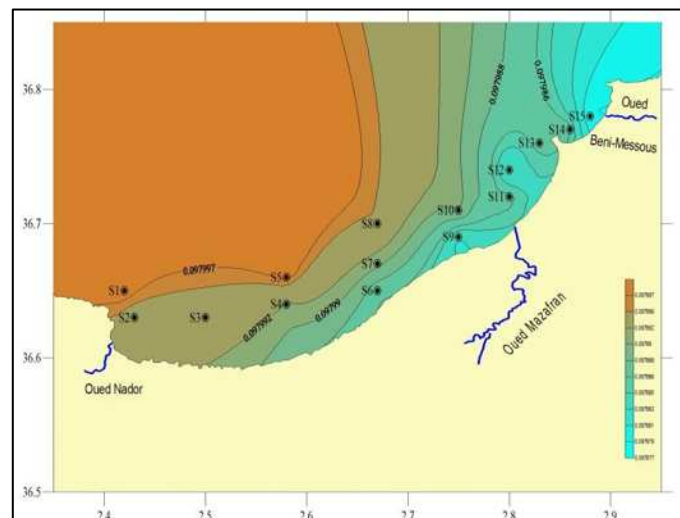
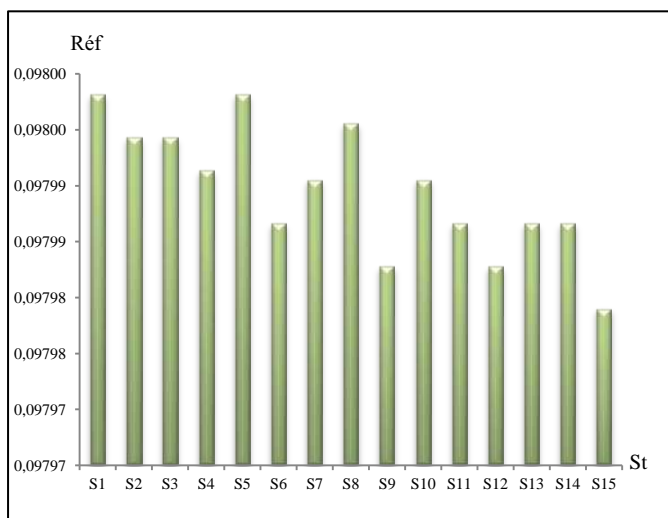


Figure 4.57: Résultats de la réflectance pour le canal MSS4 du satellite Landsat.

Dans le domaine spectral où la radiance réfléchiée par l'eau de mer est grande, la luminance pétrole dépend de l'épaisseur et du coefficient d'absorption du pétrole.

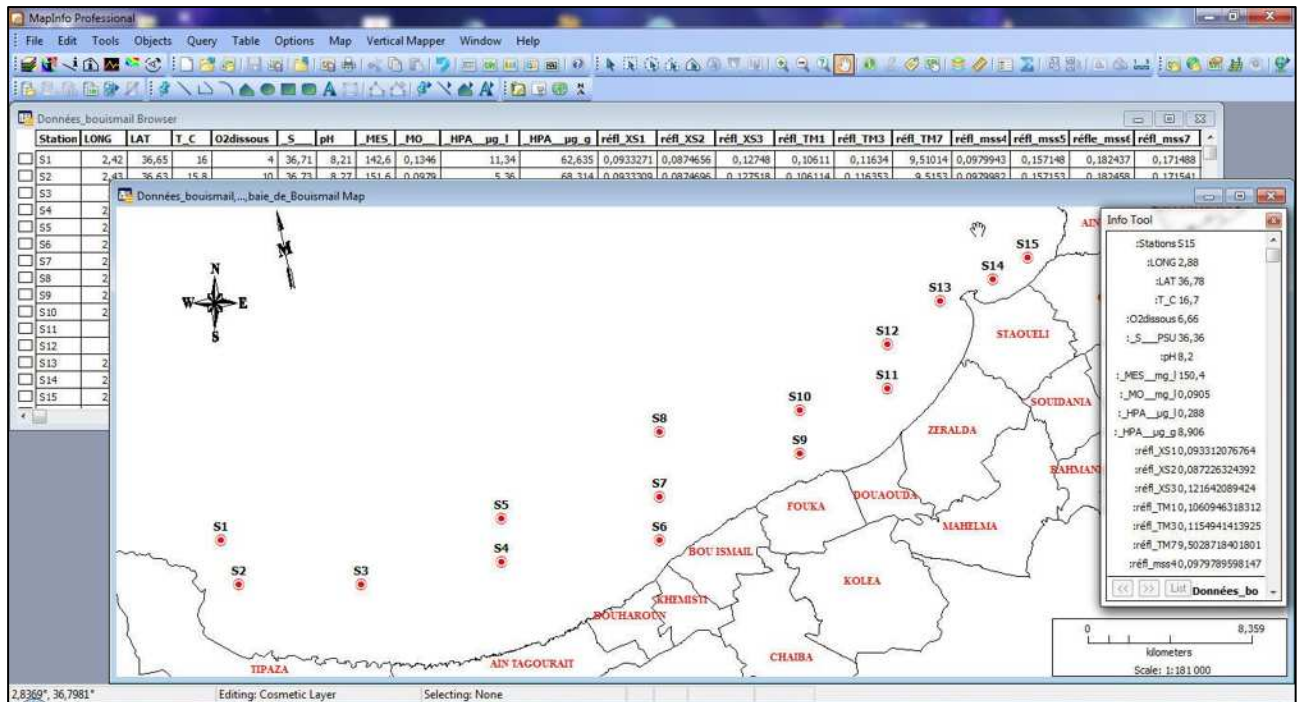
Lorsque la surface d'eau contient une certaine concentration en hydrocarbure, la lumière incidente passe à travers l'interface air- mer puis dans l'interface mer- hydrocarbure.

La lumière est aussi absorbée par les hydrocarbures à un taux dépendant du coefficient d'absorption et de l'épaisseur de la couche considérée. La plupart des pétroles bruts et lourds raffinés possèdent un coefficient d'absorption élevé, essentiellement aux courtes longueurs d'onde. Une petite fraction de la lumière est aussi perdue à travers la réflexion ascendante de l'interface pétrole- eau.

Certains composants du pétrole absorbent la lumière ultraviolette et deviennent excités électroniquement, cette excitation se transforme en une émission par fluorescence, principalement dans la région visible du spectre électromagnétique ce qui rend la fluorescence un indicateur des composés hydrocarbures dans l'eau de mer.

Comme expliqué par Geraci (1986), le rayonnement électromagnétique infrarouge et le visible en particulier, sont employés pour obtenir l'information à distance sur la qualité de l'eau. En étudiant comment l'intensité et la couleur du rayonnement lumineux sont changées tout en passant par l'eau, nous pouvons impliquer la nature et la concentration de quelques substances présentes dans cette dernière. Ces substances changent, donc, le rayonnement lumineux par l'absorption et la diffusion.

La comparaison entre le rendement de télédétection et les lignes isoplèthes obtenus par l'analyse de fluorescence d'UV a montré une concordance tout à fait bonne de distribution d'hydrocarbure.



**Figure 4.58:** Base de données des paramètres de pollution et des réflectances pour tous les canaux étudiés des satellites Spot et Landsat.

La spatialisation des valeurs mesurées sur le terrain facilite en effet le suivi environnemental de la qualité des eaux et les interventions sur le milieu. La capacité des bandes spectrales visibles est cependant très remarquable, elles peuvent servir à d'autres études plus approfondies pour établir de véritables cartes de pollution qui peuvent donner des informations sur la qualité des eaux côtières par le biais des satellites mis en orbite.

La détection et la détermination éventuelle des zones contaminées par les hydrocarbures par les techniques spatiales constituent un moyen efficace pour intervenir afin d'assurer la surveillance des côtes Algériennes.

# Conclusion

L'enjeu majeur auquel nous avons à faire face aujourd'hui est la protection et la préservation de l'environnement marin face à la pollution due essentiellement aux activités industrielles, agricoles et touristiques.

Le suivi spatiotemporel de la pollution côtière est une opération coûteuse en temps et en argent. Notre objectif tracé était d'assembler des données par l'utilisation du système d'information géographique pour le suivi spatiotemporel de la pollution marine dans la baie de Bousmail.

Notre travail avait pour but l'utilisation des images satellites pour caractériser la pollution et les polluants des eaux de mer. Pour atteindre cet objectif nous avons développé la méthodologie suivante :

- Comprendre le processus de la mesure satellitaire.
- Suivre la pollution et les polluants *in situ*.
- Modélisation statistique entre les mesures satellitaires et les mesures *in situ*.
- Spatialisation et cartographie des paramètres.

La zone d'étude est caractérisée par des déversements anarchiques des eaux usées et des rejets industriels. Nous avons présenté les paramètres environnementaux les plus importants pour surveiller la qualité de l'eau de mer. L'analyse spatiale des différents paramètres, nous a permis de conclure que :

- la zone d'étude représente un taux de pollution élevé.
- la concentration de la matière polluante dans cette zone est caractérisée par les fortes teneurs en hydrocarbures polyaromatiques et les paramètres indicateurs de la pollution les plus cités ; les matières en suspension et la matière organique.

En effet, l'analyse corrélative entre les réflectances calculées à partir des images, les mesures *in situ* et les résultats des analyses au laboratoire montre bien les fortes corrélations obtenues sur les canaux de SPOT et de LANDSAT. Les relations des différents ajustements sont hautement significatives, elles rendent possible l'interpolation des valeurs mesurées sur le terrain, donc une véritable cartographie des variables indices de la qualité des eaux.

L'interpolation spatiale nous a permis de déterminer les zones les plus polluées et les zones à faible pollution. Nos conclusions sur cette distribution sont:

—les concentrations en hydrocarbures aromatiques dans la baie d'El-Djamila présentent des valeurs qui varient entre 3.433 µg/g à 24.034 µg/g.

— pour les hydrocarbures polyaromatiques de la baie Bousmail, nous avons remarqué qu'il y a une nette aggravation de la concentration dans la partie Ouest de la baie de Bousmail surtout au niveau du sédiment, elle est de l'ordre de 76.311 µg/g.

Les cartes de distribution spatiale ont été obtenues, avec prise en compte de l'effet des autres paramètres, tels que les variables océanographiques et météorologiques qui peuvent jouer un rôle déterminant dans cette distribution.

Nous avons remarqué que la concentration de la matière en suspension est élevée à l'Est de la baie, cela s'explique par l'influence des rejets domestiques des eaux usées (forte urbanisation) et la mise en suspension des éléments fins par les courants surtout au niveau des faibles profondeurs.

La comparaison entre le rendement de télédétection et les isoplèthes obtenus par l'analyse de fluorescence SFUV a montré une concordance tout à fait bonne de distribution d'hydrocarbure. La résolution de l'image satellite fournit « un examen rapide » quantitatif de l'état de pollution. Donc l'utilisation des images satellitaires de hautes résolutions va faciliter la gestion et le monitoring de la pollution par les hydrocarbures de l'environnement marin et réduire au même temps le coût et le temps de détection et d'intervention dans le cas des catastrophes naturelles de grande envergure.

La technique de télédétection et la méthode de Spectrofluorimétrie à rayonnement ultraviolet employées dans le laboratoire peuvent fournir les outils valables pour l'évaluation de pollution pétrolière de l'eau de mer. Ces méthodes représentent, cependant, juste une approche préliminaire à résoudre ce genre de problème de pollution, qui exige encore des autres études intensives.

Nous essayons de contribuer à la réalisation d'un système d'information marin qui peut fonctionner en WEB et qui permet aux différents acteurs (océanographes et décideurs) l'acquisition des données. Ce système a fait l'objet de plusieurs travaux de recherche à l'échelle internationale est devenu indispensable en Algérie afin de compléter le vide qui touche le secteur marin et le développement des zones côtières.

Pour terminer, nous souhaitons préciser que cette approche ne constitue qu'une base d'un travail continu pour avoir une banque de données concernant l'état actuel de la pollution par les hydrocarbures tout au long du littoral Algérien.

# **Bibliographie**

**Abdellaoui A., Ozer A, Ileana G. Patru., et Ielenicz M., 2004.** Imagerie satellitale et suivi du risque naturel en Roumanie : glissement de terrain sur la vallée de Prahova ; Revista de Géomorphologie ; Vol. 6 / 2004 ; pp 53-59.

**Al-Mallah, M., 1988.** Biodégradation des hydrocarbures dans les milieux sursalés. Thèse de Doctorat de l'Université d'Aix Marseille II. 192 p.

**Al Sid Chikh S., Belkessa R., Houma F., et Amrouche L., 2009.** Diagnostic du littoral ouest algérois pour une gestion intégrée; The 5th International Symposium on Sandy beaches, which will be held in Rabat, Morocco 19-23 October 2009.

**Aminot A. et Chausse-Pied M., 1983.** Manuel des analyses chimiques en milieu marin. Edition : CNEXO, Brest, France, 395 P.

**Aminot A., et Kérouel R., 2004.** Hydrologie des écosystèmes marins : paramètres et analyses. Edition : Ifremer, France, 336 P.

**Arnaud M., et Emery X., 2000.** Estimation et interpolation spatiale: méthodes déterministes et géostatistiques. *Hermes Sciences Publications*. Paris. 221p.

**Atlas, R.M., 1981.** Microbial degradation of petroleum hydrocarbons: an environmental perspective. *Microbial Reviews* 45, 180-209.

**Baban Serwan M.J., 1993.** Detecting water quality parameters in Norfolk Broads, U.K., using Landsat imagery. *Int.J.Remote Sensing*, 14: 1247-1267 .

**Bachari N.E.I., Belbachir A.H ., et Benbadji N.,1997.** Numerical Methods for Satellite Imagery Analysis, *AMSE.,J Volume.38, N°1,2, pp 49-60.*

**Bachari N.E.I., Abdelghani F and Houma F., 1998.** Validity of satellite image to the monitoring of marine quality .Application to the Oran city, Algeria. *Proceedings of 27 th International Symposium on Remote Sensing of Environnement ,June 8-12 ,1998 Toms , Norway ,pp 172-176*

**Bachari N.E.I.,1999.** Méthodologie d'analyse des données satellitaires en utilisant des données multi-sources. Thèse de Doctorat d'état en Physique; *Rayonnement-Matière*, 11 avril 1999 , Oran USTO, Algérie.222p.

**Bachari N.E.I., et Houma F., 2006.** Détermination des cartes bathymétriques des zones côtières à partir des images satellites. *Rapport du premier congrès Méditerranéen d'Océanologie,du 20-22 Novembre 2006, Sidi Fredj- Alger Algérie. P:16.*

**Benzohra .M., 1993.** Les structures hydrodynamiques le long des côtes Algériennes. *Workshop sur la circulation des eaux et pollution des côtes méditerranéennes du Maghreb, 9-11 novembre 1992, INOC : 33-44.*

**Bertrand J.C., et Mille G., 1989.** Devenir de la matière organique exogène. Un modèle : les hydrocarbures. In : Bianchi, Marty, D., Bertrand J.C., caumette, P. et Gauthier, M.J. (Eds), *Micro-organismes dans les écosystèmes océaniques. Masson (Paris), chapitre 13, pp. 343-385.*

**Bertrand, J.C., Al Mallah, M., Acquaviva, M. and Mille., 1990.** Biodegradation of hydrocarbons by an extremely halophilic archaebacterium. *Letters in Applied Microbiology* 11, 260-263.

**Bhargava D.S., et Mariam D.W., 1991.** Effects of suspended particle size and concentration on reflectance measurements. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol.57, n°5, p.519-529.

**Bocard C., 2006.** Marées noires et sols pollués par des hydrocarbures. *Enjeux environnementaux et traitement des pollutions édition Technip 2006 Paris.*

**Blumer, M., Guillard, R.R.L. and Chase, T., 1971.** Hydrocarbons of Marine Phytoplankton. *Marine Biology* 8, 183-189.

**Bonn F., et Rochon G., 1992.** Précis de télédétection ; vol.1 : Principes et méthodes. Presse de l'Université du Québec et AUPELF, Saint-Foy, 485 p.

**Bouchez, M., Blanchet, D., Haeseler, F. et Vandecasteele, J.P., 1996.** Les hydrocarbures aromatiques polycycliques dans l'environnement – Propriétés, origines, devenir. *Revue de l'Institut Français du Pétrole. Vol. 51, N° 3.*

**Boughrira A., Belkessa R., Houma F. 2011.** Spatialisation des paramètres physico-chimiques et des polluants organiques polycycliques dans la côte Ouest-Algéroise (baie d'El-Djamila Bousmail). *Séminaire Euro Méditerranéen sur l'Environnement et la Sécurité Industrielle*, 24 et 25 Avril 2011, ENSET, Oran, <http://www.enset-oran.dz/spip.php?article548>

**Boulahdid M., 1987.** Analyse des sels nutritifs dans l'eau de mer. Etude du mélange des masses d'eaux et de l'oxydation de la matière organique dans l'océan. Thèse de Doctorat, Université de Paris VI, France, 266 P.

**Bricaud A., 1988.** Modèles de réflectance diffuse de l'océan; Applications à la détermination satellitaire des concentrations des substances présentes dans l'océan de la mer ; *Remote Sensing from space physical aspects and Modeling*, Toulouse 88, pp .605-623.

**Broman D., Colmsjo A., Ganning B., NÄF C., and Zebühr Y., 1988.** A multi-sediment –trap study on the temporal and spatial variability of polycyclic aromatic hydrocarbons and lead in a anthropogenic influenced archipelago. *Environ.Sci.Technol.*, Vol.22, N°10, pp.1219-1228.

**Burns K.A. and Saliot A, 1986.** Petroleum hydrocarbons in the Mediterranean sea: A mass Balance. *Marine Chemistry*, 20, Elsevier Science Publishers B.V, pp.141-157.

**Castel, J., 1990.** The meiofauna of coastal lagoon ecosystems and their importance in the food web. *Vie Milieu*. 42: 125 - 135.

**Caulet .J., 1972.** Les sédiments organogènes du précontinent Algérien. *Mém. Mus. Hist. Nat., Nlle série*, 25, 289p.

**Chorowicz, J., Rudant, J., Scanvic, Y., 1980.** Intérêt de la radiométrie à haute résolution spatiale pour la cartographie en région méditerranéenne, "Spectral Signatures of objects in remote sensing" *ESA SP 287*, pp. 311-314.

**Clark, R.C. Jr. and Blumer, M., 1967.** Distribution of n-paraffins in marine organisms and sediment. *Limnol. Oceanogr.* 12, 79-87

**C.O.I, 1982.** La détermination des hydrocarbures pétroliers dans les sédiments. Manuels et guides, 11, *Commission Océanographique intergouvernementale de l'Unesco*, 31p

**C.O.I, 1984.** Manuel sur la surveillance continue du pétrole et des hydrocarbures pétroliers dissous ou dispersés dans l'eau de mer et sur les plages. Procédures applicables à la composante pétrolière du système de surveillance de la pollution marine de la C.O.I. (MRRRPOLMON-P). *Manuels et guides*, 13, *Commission océanographique intergouvernementale de l'Unesco*, 35 P (1984).

**Dagorne A., 1970.** Remarques préliminaires sur la sédimentation pré-littorale en baie de Bou-Ismaïl (Ouest d'Alger). *Annales Algérienne de Géographie*, n°7, P.73-78

**Doerffer R., and Schiller H.,1997.** Pigment index, sediment and gelstoff retrieval from directional water leaving radiance reflectances using inverse modelling technique. Algorithms Theoretical Basis Document, ATBD 2.12, Rapport ESA, Meris ESL GKSS Research Center, Geesthacht, p. 245-327.

**Durand Dominique., 2000.** Suivi et simulation de la qualité de l'eau en milieu littoral par modélisation et télédétection. Thèse Doctorat Université de Nice Sophia Antipolis.197p.

**EGPP., 2006.** L'Entreprise de Gestion des Ports et des abris de Pêches et de Plaisance. Guide des ports de pêche algériens. Edition spéciale MINAPPECH. 67p.

**Faraco F. et Ros J. 1978.** Pollution par les hydrocarbures des eaux superficielles de la Méditerranée occidentale – deuxième partie : les hydrocarbures dissous-. IV<sup>es</sup> journées Etud. Pollutions, Antalya, C.I.E.S.M, pp 117-121

**Fattal P., 2008.** Pollution des côtes par les hydrocarbures. © *Presse universitaire de RENNES, France*, 395 p.

**Froidefond J.M., Castaing P., and Prud'homme R., 1999.** Monitoring suspended particulate matter fluxes and patterns with the AVHRR/NOAA-11 satellite. Application to the Bay of Biscay. Deep-Sea Research II, Special issue Ecofer, vol. 46, p. 2029-2055.

**Galgani F., Martínez-Gómez C., Giovanardi F., Romanelli G., Caixach J., Cento A., Scarpato A., BenBrahim S., Messaoudi S., Deudero S., Boulahdid M., Benedicto J., Andral B., 2010.** Assessment of polycyclic aromatic hydrocarbon concentrations in mussels (*Mytilus galloprovincialis*) from the Western basin of the Mediterranean Sea.

**Gelpi, E., Schneider, H.J., Mann, J., Oro, J., 1970.** Hydrocarbons of geochemical significance in microscopic algae. *Phytochemistry* 9, 603-612.

**Geraci, A. L., La Rosa, G. & Del Re, L. 1986.** Remote sensing investigation of the oil spill in the Strait of Messina, Italy. ESA/ EARSeL, *Symposium on Europe from Space*, Lyngby, DK, 25-28 June 1986, ESA SP-258, 109-114.

**Grimalt J.O., et Albaiges J., 1988.** Aerosol transport of polynuclear aromatic hydrocarbons over the Mediterranean sea. *Naturwissenschaften*, 75, pp.39-42.

- Guyot G., 1989.** Signatures spectrales des surfaces naturelles Paradigme, Caen (1989).
- Han, J. and Calvin, M., 1969.** Hydrocarbon distribution of algae and bacteria and microbiological activity in sediments. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 64, 436-443.
- Halmann M.M., 1996.** Photodegradation of waters pollutants. (CRC Press,Eds.) , 310p
- Houma F., Belkessa R., Khouider A., Bachari N.E.I, et Derriche Z., 2004.** Etude Corrélatrice des Paramètres Physico- Chimiques et des Données Satellites IRS1C pour Caractériser la Pollution Aquatique. Application à la baie d'Oran, Algérie. *Revue Sciences de l'eau*, volume 17/4, 429- 446.
- Houma F., 2007.** Caractérisation des polluants de la côte oranaise et algéroise par analyse physico-chimique et corrélation avec les données satellites. *Thèse de doctorat, USTHB Alger, Océanographie biologique et Environnement Marin*, 225 P.
- Houma F., et Bachari N.E.I., 2008.** Utilisation des techniques satellitaires pour l'identification des fronts thermiques. Application à la baie d'Alger et la baie d'El Djamil. International Conference on "Monitoring & Modeling of Marine pollution" (INCOMP 2008) ; KISH 1-3 /12 .
- INERIS., 2005.** Hydrocarbures aromatiques polycycliques. Guide méthodologique. Acquisition des données d'entrée des modèles analytiques ou numériques de transfert dans les sols et les eaux souterraines. Rapport d'étude N°66244 DESP-R01. 85p+annexe.
- Kankou M., 2004.** Vulnérabilités des eaux et des sols de la rive droite du fleuve Sénégal en Mauritanie- étude au laboratoire du comportement de deux pesticides. Thèse de docteur de l'université de Limoges, France, 159 p.
- Khatib N., 1999.** Contribution à l'étude de la pollution par les hydrocarbures de l'eau de mer de surface et de sédiment superficiel marin des golfes de Bejaïa et de Skikda.
- Krausz P, Benhaddou R, Granet R., 2008.** Mini manuel de chimie organique. © Dunod, Paris, 2008 ISBN 978-2-10-053952-9.
- L.De Domenico, E. Crisafi, G. Magazzu, A. Puglisi; and A. La rosa., 1994.** Monitoring of Petroleum Hydrocarbon Pollution in Surface Waters by a Direct Comparison of Fluorescence Spectroscopy and Remote Sensing Techniques. *Marine Pollution Bulletin*, Vol. 28. No. 10. pp. 587-591.
- Lacaze J C., 1980.** La pollution pétrolière en milieu marin. *Ed Masson, Paris*. 117p.
- Lacaze J-C., 1996.** La pollution des mers. *Ed Flammarion*. 118 p.
- Larson, R.A., Bott, T.L., Hunt, L.L. and Rogenmuser, K., 1979.** Photooxidation products of a fuel oil and their antimicrobial activity. *Environmental Science and Technology* 13, 965-969.
- Leclaire L., 1972.** La sédimentation holocène sur le versant méridional du bassin Algéro-Baléares (précontinent algérien). *Mémoire Museum Histoire Naturelle. Paris Sr C*, 24, 391p.
- Leahy, J.G. and Colwell, R.R., 1990.** Microbial degradation of hydrocarbons in the environment. *Microbiological Reviews* 54, 305-315.

- LEM, 1998.** Etude de délimitation d'une zone d'extraction de sable en baie d'Alger. 22p.
- Maki, H., Sasaki, T.S. and Harayama, S., 2001.** Photo-oxidation of biodegraded crude oil and toxicity of the photo-oxidized products. *Chemosphere* 44, 1145-1151.
- Marchand M, et Kantin R., 1997.** Contaminants chimiques en milieux aquatiques. *OCEANIS, n°4 Vol 23. P : 597-629.*
- Marchand M., 1983.** Estimation des hydrocarbures dans l'eau et les organismes marins par spectrofluorimétrie UV. In C.N.E.X.O. Manuel des analyses chimiques en milieu marin, pp329-336.
- Millot C., 1985.** Some Features of the Algerian current. *Journal of Geophysical Research, Vol. 90, NO. c4, pages 7169-7176.*
- Millot .C., 1987.** Circulation in the Western Méditerrananean Sea. *Océanologica. Acta,10.* 143-149 p
- Millot, C. 1993.** La circulation générale en Méditerranée occidentale. Workshop sur la circulation des eaux et pollution des côtes Méditerranéennes du Maghreb. 9-11 novembre 1992, INOC. 29-30.
- Oro, J., Tornabene, T.G., Noonan, D.W. et Gelpi, 1967.** Aliphatic hydrocarbons and fatty acids of some marine and freshwater microorganisms. *Journal of Bacteriology* 93, 1811-1818.
- Payne, J.R. and Philipps, C.R., 1985.** Photochemistry of petroleum in water: Photooxidation causes changes in oil and enhances dissolution of its oxidized products. *Environmental Science and Technology* 19, 569-579.
- Prieur L., Morel A., 1975.** Relations théoriques entre le facteur de réflexion diffuse de l'eau de mer, à diverses profondeurs, et les caractéristiques optiques. UGGI. XVIe Ass. Gle. Grenoble. Août 1975. Symposium Interdisciplinaire d'Optique Océanique.I.S.30, n°13 : 250-251.
- Prieur L., et Sathyendranath S.,1981.** « An optical classification of coastal and oceanic waters based on the spectral absorption curves of phytoplankton pigments, dissolved organic matter and other particulate materials », *Limnology and Oceanography*, vol.26, n°4, p 671-689.
- Ramade F., 2000.** Dictionnaire encyclopédique des pollutions. Edition: Ediscience International, France, 690.pp428.
- Rodier J., 2005.** L'analyse de l'eau : eaux naturelles, eaux résiduaires et eaux de mer. Edition : DUNOD, 8ème édition, Paris, 1384 P.
- Saliot, A., 1981.** Natural hydrocarbons in sea water. In : Duursma, E.K. and Dawson, R. (Eds.), *Marine organic chemistry*. Elsevier, Amsterdam, pp. 327-374.
- Sandvik, S., Lode, A. and Pederson, T.A., 1986.** Biodegradation of oily sludge in Norwegian soils. *Applied Microbiology Biotechnology* 23, 297-301.
- Sellali B., 1996.** La pollution par les hydrocarbures pétroliers en méditerranée Sud-Occidentale : contamination de l'eau et des sédiments superficiels des régions littorales centre et ouest de l'Algérie. Thèse de magister. ISMAL. Alger. 118p.

**Song, H.G., Wang, X. And Bartha, R., 1990.** Bioremediation potential of terrestrial fuel spills. *Applied and Environmental Microbiology* 56, 652-656.

**Tagger, S., Deveze, L. and LePetit, J., 1976.** The conditions for biodegradation of petroleum hydrocarbons at sea. *Marine Pollution Bulletin* 7, 172-174.

**Tassan S., 1988.** «The Effect of Dissolved “yellow substance” on the Quantitative Retrieval of Chlorophyll and Total Suspended Sediment Concentrations from Remote Measurements of water Color », *International Journal of Remote sensing*, n°9, p. 787-797.

**Teillet P.M., 1986.** Image correction for radiometric effects in remote sensing. *Int. J. Remote sensing*, Vol. 7. No.12, pp 1637-1651.

**U.S. Congress, Office of Technology Assesement, 1991.** Bioremediation of Oil Spills- Background Paper, OTA-BP-70 (Washington, DC: U.S. Government Printing Office).

**Walworth, J., Braddock, J. and Woolard., 2001.** Nutrient and temperature interactions in bioremediation of cryic soil. *Cold Region Science and Technology* 32, 85-91.

**Ward, D.M. and Brock, T.D., 1978.** Hydrocarbon biodegradation in hypersaline environments. *Applied and Environmental Microbiology* 35, 353-359.

**Youngblood, W.W., Blumer, M., Guillard, R.L. and Fiore, F., 1971.** Saturated and unsaturated hydrocarbons in marine benthic algae. *Marine Biology* 8, 190-201.

**ZoBell, C.E., 1969.** Microbial modification of crude oil in the sea. In: *Proceedings of joint conferences on prevention and control of oil spills*. American. Petroleum. Institute. Washington, D.C., pp. 317-326.

# **Annexes**

Tableau : variation de la réflectance pour les différents canaux des satellites Spot et Landsat pour un  $\theta_v = 10$  (Stations de D'El-Djamila)

Stations	LONG	LAT	T°	S%	pH	MES	HPA (eau)	HPA (Sédiment)	réfl XS1	Réfl XS2	réfl XS3	réfl TM1	réfl TM3	réfl TM6	réfl mss4	réfl mss5	réfl mss6	réfl mss7
D1	2,888	36,8	19,6	36,6	8,19	80,92	0,359	/	0,08475	0,08124	0,1255	0,09663	0,1118	9,50845	0,08725	0,15323	0,18104	0,17078
D3	2,891	36,797	19,6	36,5	8,17	79,44	0,372	6,867	0,08879	0,08705	0,12851	0,1018	0,11667	9,51016	0,09144	0,15699	0,18332	0,17248
D5	2,898	36,789	19,8	36,5	8,18	87,28	0,492	4,578	0,11878	0,08772	0,12906	0,12904	0,11741	9,5102	0,10846	0,15746	0,18382	0,1728
D8	2,878	36,782	19,7	36,7	8,15	84,64	0,284	7,439	0,08707	0,08284	0,12672	0,09951	0,11354	9,50839	0,08761	0,15433	0,18217	0,17138
D10	2,879	36,777	19,8	36,2	8,16	80	0,158	9,156	0,05926	0,07455	0,13251	0,06097	0,11144	9,51158	0,06331	0,14931	0,18603	0,17514
D11	2,873	36,773	19,6	36,4	8,16	77,88	0,533	4,578	0,09963	0,08762	0,12895	0,11685	0,1173	9,51015	0,0999	0,15738	0,18373	0,17271
D15	2,854	36,762	20,1	36,7	8,21	79,92	0,265	10,872	0,08706	0,08283	0,12675	0,0935	0,11354	9,50845	0,0916	0,15433	0,18218	0,17143

Tableau : variation de la réflectance pour les différents canaux des satellites Spot et Landsat pour un  $\theta_v = 10$  (Stations de Bousmail)

Stations	LONG	LAT	T°C	O <sub>2</sub>	S%	PH	MES	MO	HPA (eau)	HPA (Sédiment)	réfl XS1	réfl XS2	réfl XS3	réfl TM1	réfl TM3	réfl TM6	réfl mss4	réfl mss5	réfl mss6	réfl mss7
S1	2,420	36,650	16,0	4,00	36,71	8,21	142,60	0,135	11,34	62,64	0,09333	0,08747	0,12748	0,10611	0,116	9,510	0,09800	0,157	0,182	0,171
S2	2,430	36,630	15,8	10,00	36,73	8,27	151,60	0,098	5,36	68,31	0,09332	0,08747	0,12752	0,10611	0,116	9,515	0,09799	0,157	0,182	0,172
S3	2,500	36,630	15,7	9,91	36,70	8,25	150,80	0,093	4,37	31,82	0,09332	0,08747	0,12746	0,10610	0,116	9,510	0,09799	0,157	0,182	0,171
S4	2,580	36,640	15,6	9,61	36,71	8,24	151,60	0,095	4,95	65,18	0,09332	0,08747	0,12756	0,10611	0,116	9,510	0,09799	0,157	0,182	0,172
S5	2,580	36,660	15,5	9,51	36,70	8,24	150,00	0,295	22,32	76,31	0,09333	0,08748	0,12773	0,10611	0,116	9,510	0,09800	0,157	0,183	0,172
S6	2,670	36,650	15,9	8,61	36,74	8,27	136,40	0,072	0,95	14,36	0,09332	0,08748	0,12780	0,10610	0,116	9,511	0,09799	0,157	0,183	0,172
S7	2,670	36,670	15,8	5,77	36,72	8,27	138,00	0,071	0,19	6,38	0,09332	0,08748	0,12771	0,10610	0,116	9,510	0,09799	0,157	0,183	0,172
S8	2,670	36,700	16,0	8,45	36,68	8,22	151,60	0,106	7,36	25,05	0,09333	0,08747	0,12766	0,10611	0,116	9,510	0,09800	0,157	0,183	0,172
S9	2,750	36,690	16,2	7,46	36,82	8,22	153,40	0,083	0,31	1,79	0,09332	0,08747	0,12766	0,10610	0,116	9,510	0,09798	0,157	0,183	0,172
S10	2,750	36,710	16,0	7,76	36,70	8,25	159,60	0,066	0,07	7,00	0,09332	0,08746	0,12727	0,10611	0,116	9,510	0,09799	0,157	0,182	0,171
S11	2,800	36,720	16,6	7,56	36,48	8,22	61,60	0,085	0,46	2,55	0,09332	0,08745	0,12727	0,10610	0,116	9,510	0,09799	0,157	0,182	0,171
S12	2,800	36,740	16,3	8,26	36,64	8,21	154,00	0,065	0,07	1,58	0,09331	0,08745	0,12730	0,10609	0,116	9,510	0,09798	0,157	0,182	0,171
S13	2,830	36,760	17,1	8,46	36,53	8,22	154,00	0,083	0,26	4,64	0,09332	0,08745	0,12731	0,10610	0,116	9,510	0,09799	0,157	0,182	0,171
S14	2,860	36,770	16,8	6,36	36,71	8,25	216,80	0,075	0,12	4,76	0,09332	0,08745	0,12727	0,10610	0,116	9,510	0,09799	0,157	0,182	0,171
S15	2,880	36,780	16,7	6,66	36,36	8,20	150,40	0,091	0,29	8,91	0,09331	0,08723	0,12164	0,10609	0,115	9,503	0,09798	0,157	0,180	0,161

Tableau : variation de la luminance pour les différents canaux des satellites Spot et Landsat pour un  $\theta_v = 20$  (Stations de Bousmail)

$\theta_v = 20$		XS1	XS2	XS3	Noaa1	Noaa2	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM6	mss4	mss5	mss6	mss7
S1	65,476	45,023	14,007	55,424	13,459	71,508	61,407	33,749	14,332	2,2559	0,761	65,379	43,291	17,811	11,245	
S2	65,474	45,022	14,001	55,423	13,45	71,507	61,406	33,746	14,326	2,2534	0,7029	65,378	43,289	17,805	11,234	
S3	65,475	45,024	14,01	55,424	13,463	71,508	61,407	33,749	14,335	2,2572	0,7613	65,379	43,291	17,814	11,25	
S4	65,475	45,022	13,995	55,423	13,441	71,507	61,406	33,745	14,321	2,2508	0,7599	65,378	43,289	17,8	11,224	
S5	65,475	45,02	13,968	55,423	13,403	71,508	61,407	33,738	14,297	2,2394	0,7573	65,379	43,286	17,777	11,176	
S6	65,478	45,021	13,956	55,425	13,386	71,511	61,409	33,736	14,287	2,2344	0,7562	65,381	43,287	17,768	11,155	
S7	65,475	45,021	13,971	55,423	13,407	71,508	61,407	33,739	14,3	2,2407	0,7576	65,379	43,287	17,78	11,181	
S8	65,476	45,022	13,977	55,424	13,416	71,509	61,408	33,741	14,306	2,2432	0,7582	65,38	43,288	17,786	11,192	
S9	65,478	45,023	13,978	55,426	13,417	71,511	61,409	33,742	14,306	2,2432	0,7582	65,381	43,289	17,786	11,192	
S10	65,476	45,026	14,04	55,426	13,506	71,509	61,407	33,758	14,361	2,2699	0,764	65,379	43,295	17,839	11,304	
S11	65,477	45,027	14,04	55,427	13,506	71,51	61,409	33,759	14,361	2,2699	0,764	65,381	43,296	17,84	11,304	
S12	65,479	45,028	14,035	55,428	13,498	71,512	61,41	33,758	14,357	2,2673	0,7635	65,382	43,296	17,836	11,294	
S13	65,477	45,026	14,034	55,426	13,498	71,51	61,408	33,757	14,356	2,2673	0,7635	65,38	43,295	17,835	11,293	
S14	65,477	45,027	14,04	55,427	13,507	71,51	61,409	33,759	14,362	2,2699	0,764	65,381	43,296	17,84	11,304	
S15	65,479	45,084	14,935	55,446	15,24	71,512	61,41	33,949	15,143	3,1527	0,844	65,382	43,374	18,571	13,523	

Tableau : variation de la luminance pour les différents canaux des satellites Spot et Landsat pour un  $\theta_v = 30$  (Stations de Bousmail)

$\theta_v = 30$		XS1	XS2	XS3	Noaa1	Noaa2	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM6	mss4	mss5	mss6	mss7
S1	64,83	44,651	13,934	54,902	13,378	70,811	60,801	33,512	14,257	2,2429	0,7572	64,734	42,933	17,713	11,173	
S2	64,829	44,65	13,927	54,901	13,369	70,81	60,8	33,51	14,251	2,2404	0,6994	64,733	42,931	17,707	11,162	
S3	64,83	44,651	13,937	54,902	13,382	70,811	60,8	33,513	14,26	2,2442	0,7575	64,734	42,933	17,715	11,179	
S4	64,829	44,65	13,921	54,901	13,36	70,81	60,8	33,509	14,246	2,2379	0,7561	64,733	42,931	17,702	11,152	
S5	64,83	44,648	13,894	54,901	13,321	70,811	60,8	33,502	14,222	2,2265	0,7535	64,734	42,928	17,679	11,104	
S6	64,832	44,649	13,882	54,902	13,305	70,814	60,802	33,5	14,212	2,2214	0,7523	64,736	42,929	17,669	11,083	
S7	64,83	44,649	13,897	54,901	13,326	70,811	60,8	33,502	14,225	2,2277	0,7538	64,734	42,929	17,681	11,109	
S8	64,831	44,65	13,904	54,902	13,335	70,813	60,801	33,505	14,231	2,2302	0,7543	64,735	42,93	17,687	11,12	
S9	64,832	44,651	13,904	54,903	13,335	70,814	60,803	33,506	14,231	2,2302	0,7543	64,736	42,931	17,688	11,12	
S10	64,83	44,654	13,966	54,904	13,425	70,812	60,801	33,521	14,286	2,2569	0,7603	64,734	42,937	17,741	11,232	
S11	64,832	44,655	13,967	54,905	13,425	70,914	60,802	33,522	14,287	2,2569	0,7603	64,736	42,938	17,742	11,232	
S12	64,833	44,656	13,961	54,906	13,417	70,815	60,804	33,522	14,282	2,2544	0,7597	64,737	42,938	17,738	11,222	
S13	64,831	44,654	13,961	54,904	13,416	70,813	60,802	33,52	14,281	2,2544	0,7597	64,735	42,937	17,737	11,221	
S14	64,832	44,655	13,967	54,905	13,425	70,814	60,802	33,522	14,287	2,2569	0,7603	64,736	42,938	17,742	11,232	
S15	64,833	44,712	14,872	54,924	15,171	70,815	60,804	33,715	15,077	3,1459	0,8418	64,737	43,017	18,479	13,468	

Tableau : conversion de luminance en réflectance pour les 3 canaux du spot pour un  $\theta_v = 10$  (El-Djamila)

$\theta_v = 10$									
	XS1 (Lum)	Cpt numérique	réflectance	XS2 (Lum)	Cpt numérique	réflectance	XS3 (Lum)	Cpt numérique	réflectance
D1	68,107	83,99161	0,0847521	46,788	57,93712	0,0812395	14,359	18,36388	0,1255048
D3	65,972	81,36556	0,0887888	45,332	56,13168	0,0870468	13,885	17,7382	0,1285063
D5	65,708	81,04084	0,1187826	45,162	55,92088	0,0877249	13,797	17,62204	0,1290636
D8	65,706	81,03838	0,0870701	45,16	55,9184	0,0828429	13,799	17,62468	0,1267209
D10	65,705	81,03715	0,0592639	45,16	55,9184	0,0745529	13,796	17,62072	0,1325149
D11	61,476	75,83548	0,0996331	42,228	52,28272	0,0876244	13,024	16,60168	0,1289544
D15	67,493	83,23639	0,0870634	46,388	57,44112	0,0828349	14,162	18,10384	0,1267523

Tableau : conversion de luminance en réflectance pour les 3 canaux du spot pour un  $\theta_v = 20$  (El-Djamila)

$\theta_v = 20$									
	XS1 (Lum)	Cpt numérique	réflectance	XS2 (Lum)	Cpt numérique	réflectance	XS3 (Lum)	Cpt numérique	réflectance
D1	65,607	80,91661	0,094162806756	45,13	55,8812	0,08785253208	13,934	17,80288	0,1281960240
D3	65,608	80,91784	0,094159042464	45,124	55,87376	0,087876463584	13,843	17,68276	0,1287722637
D5	65,342	80,59066	0,095160344136	44,953	55,66172	0,088558511448	13,755	17,5666	0,129329506
D8	65,34	80,5882	0,09516787272	44,951	55,65924	0,088566488616	13,757	17,56924	0,1293168418
D10	65,339	80,58697	0,095171637012	44,951	55,65924	0,088566488616	13,754	17,56528	0,1293358387
D11	61,147	75,43081	0,110951549076	42,038	52,04712	0,100185233808	12,986	16,55152	0,1341990482
D15	67,117	82,77391	0,088478725836	46,173	57,17452	0,083692438968	14,119	18,04708	0,1270245478

Tableau : conversion de luminance en réflectance pour les 3 canaux du spot pour un  $\theta_v = 30$  (El-Djamila)

$\theta_v = 30$									
	XS1 (Lum)	Cpt numérique	réflectance	XS2 (Lum)	Cpt numérique	réflectance	XS3 (Lum)	Cpt numérique	réflectance
D1	64,942	80,09866	0,096666060936	44,749	55,40876	0,089372182584	13,859	17,70388	0,1286709468
D2	64,943	80,09989	0,096662296644	44,743	55,40132	0,089396114088	13,767	17,58244	0,1292535188
D7	64,674	79,76902	0,097674891192	44,57	55,1868	0,09008613912	13,678	17,46496	0,1298170938
D8	64,671	79,76533	0,097686184068	44,568	55,18432	0,090094116288	13,681	17,46892	0,1297980969
D10	64,671	79,76533	0,097686184068	44,568	55,18432	0,090094116288	13,678	17,46496	0,1298170938
D11	60,546	74,69158	0,113213888568	41,692	51,61808	0,101565283872	12,916	16,45912	0,1346423095
D15	66,431	81,93013	0,091061030148	45,78	56,6872	0,08525995248	14,04	17,9428	0,127524799

Tableau : conversion de luminance en réflectance pour les canaux MSS du Landsat pour un  $\theta_v = 10$

$\theta_v = 10$												
	MSS4 (Lum)	Cpt numérique	réflectance	MSS5 (Lum)	Cpt numérique	réflectance	MSS6 (Lum)	Cpt numérique	réflectance	MSS7 (Lum)	Cpt numérique	réflectance
D1	68,007	324,452544	0,08925	44,963	322,289008	0,153233	18,263	157,753203	0,1810351	11,431	117,799273	0,170782
D2	65,875	314,236	0,09744	43,548	312,078368	0,156986	17,613	151,980553	0,1833245	11,079	114,074057	0,172484
D7	65,612	312,975704	0,09846	43,371	310,801136	0,157456	17,471	150,719451	0,1838247	11,014	113,386162	0,172798
D8	65,61	312,96612	0,08761	43,37	310,79392	0,154334	17,472	150,728332	0,1821711	11,018	113,428494	0,171381
D10	65,609	312,961328	0,06332	43,369	310,786704	0,149311	17,47	150,71057	0,1860332	11,013	113,375579	0,175143
D11	61,385	292,71992	0,09990	40,603	290,827248	0,157382	16,616	143,126196	0,1837342	10,358	106,443714	0,17271
D15	67,394	321,515048	0,09160	44,548	319,294368	0,154334	17,937	154,857997	0,1821833	11,296	116,370568	0,171431

Tableau : conversion de luminance en réflectance pour les canaux MSS du Landsat pour un  $\theta_v = 20$

$\theta_v = 20$												
	MSS4 (Lum)	Cpt numérique	réflectance	MSS5 (Lum)	Cpt numérique	réflectance	MSS6 (Lum)	Cpt numérique	réflectance	MSS7 (Lum)	Cpt numérique	réflectance
D1	65,51	312,48692	0,098848	43,357	310,700112	0,157493	17,636	152,184816	0,183244	11,198	115,333434	0,171909
D2	65,511	312,491712	0,098844	43,347	310,627952	0,157519	17,557	151,483217	0,183522	11,038	113,640154	0,172682
D7	65,246	311,221832	0,099863	43,17	309,35072	0,157989	17,415	150,222115	0,184022	10,973	112,952259	0,172997
D8	65,244	311,212248	0,099871	43,168	309,336288	0,157994	17,417	150,239877	0,184015	10,977	112,994591	0,172977
D10	65,243	311,207456	0,099875	43,168	309,336288	0,157994	17,414	150,213234	0,184025	10,972	112,941676	0,173001
D11	61,056	291,143352	0,115975	40,421	289,513936	0,165280	16,566	142,682146	0,187012	10,321	106,052143	0,176149
D15	67,019	319,718048	0,093045	44,341	317,800656	0,154883	17,88	154,35178	0,182384	11,254	115,926082	0,171638

Tableau : conversion de luminance en réflectance pour les canaux MSS du Landsat pour un  $\theta_v = 30$

$\theta_v = 30$												
	MSS4 (Lum)	Cpt numérique	réflectance	MSS5 (Lum)	Cpt numérique	réflectance	MSS6 (Lum)	Cpt numérique	réflectance	MSS7 (Lum)	Cpt numérique	réflectance
D1	64,847	309,309824	0,101397	42,99	308,05184	0,158466	17,535	151,287835	0,183599	11,125	114,560875	0,172262
D2	64,848	309,314616	0,101394	42,98	307,97968	0,158493	17,456	150,586236	0,183877	10,964	112,857012	0,17304
D7	64,579	308,025568	0,102428	42,801	306,688016	0,158968	17,314	149,325134	0,184378	10,898	112,158534	0,173359
D8	64,576	308,011192	0,102439	42,8	306,6808	0,15897	17,315	149,334015	0,184374	10,903	112,211449	0,173335
D10	64,576	308,011192	0,102439	42,799	306,673584	0,158973	17,312	149,307372	0,184385	10,898	112,158534	0,173359
D11	60,456	288,268152	0,118282	40,087	287,103792	0,166166	16,474	141,865094	0,187336	10,254	105,343082	0,176473
D15	66,333	316,430736	0,095683	43,963	315,073008	0,155885	17,775	153,419275	0,182754	11,178	115,121774	0,172005

Tableau : conversion de luminance en réflectance pour les canaux TM de Landsat pour un  $\theta_v = 10$  (El-Djamila)

$\theta_v = 10$	TM1 (Lum)	Cpt numérique	réflectance	TM2 (Lum)	Cpt numérique	réflectance	TM3 (Lum)	Cpt numérique	réflectance	TM4 (Lum)	Cpt numérique	réflectance	TM5 (Lum)	Cpt numérique	réflectance	TM6 (Lum)	Cpt numérique	réflectance
D1	74,337	125,9728907	0,096631	63,895	57,0042565	0,080736	34,946	44,8463022	0,111801	14,704	19,882308	0,271920	2,3025	223,3697125	0,894893	0,7822	116,89871	9,508454
D3	71,969	122,0394059	0,101804	61,909	55,3068223	0,088180	33,801	43,4257007	0,116667	14,213	19,279851	0,272167	2,2468	218,04897	0,868134	0,7629	113,471995	9,510161
D5	71,65	121,509515	0,12904	61,677	55,1085319	0,089049	33,626	43,2085782	0,117411	14,121	19,166967	0,272214	2,2445	217,8292625	0,867029	0,7625	113,400975	9,510197
D8	71,647	121,5045317	0,099511	61,674	55,1059678	0,089060	33,625	43,2073375	0,113541	14,123	19,169421	0,272213	2,2457	217,9438925	0,867605	0,7628	113,45424	9,50839
D10	71,646	121,5028706	0,060972	61,674	55,1059678	0,089060	33,624	43,2060968	0,111441	14,12	19,16574	0,272214	2,2445	217,8292625	0,867029	0,7625	113,400975	9,511582
D11	67,144	114,0245984	0,116854	57,652	51,6683644	0,104134	31,625	40,7259375	0,117304	13,341	18,209907	0,272608	2,067	200,873575	0,781753	0,7017	102,605935	9,510151
D15	73,596	124,7420156	0,093502	63,352	56,5401544	0,082771	34,537	44,3388559	0,113539	14,496	19,627092	0,272025	2,3016	223,28374	0,894461	0,7823	116,916465	9,508445

Tableau : conversion de luminance en réflectance pour les canaux TM de Landsat pour un  $\theta_v = 20$  (El-Djamila)

$\theta_v = 20$	TM1 (Lum)	Cpt numérique	réflectance	TM2 (Lum)	Cpt numérique	réflectance	TM3 (Lum)	Cpt numérique	réflectance	TM4 (Lum)	Cpt numérique	réflectance	TM5 (Lum)	Cpt numérique	réflectance	TM6 (Lum)	Cpt numérique	réflectance
D1	71,574	121,383271	0,107334	61,566	55,0136602	0,089465	33,693	43,2917051	0,117126	14,252	19,327704	0,272148	2,2775	220,981588	0,882883	0,769300	114,608315	9,509595
D2	71,575	121,384933	0,107330	61,567	55,0145149	0,089461	33,669	43,2619283	0,117228	14,171	19,228317	0,272189	2,2394	217,342085	0,864579	0,760700	113,081385	9,510356
D7	71,254	120,851719	0,108574	61,333	54,8145151	0,090338	33,493	43,0435651	0,117976	14,079	19,115433	0,272235	2,237	217,112825	0,863426	0,760200	112,99261	9,510400
D8	71,251	120,846736	0,108585	61,331	54,8128057	0,090346	33,492	43,0423244	0,117980	14,081	19,117887	0,272234	2,2383	217,237008	0,864050	0,760500	113,045875	9,510374
D10	71,25	120,845075	0,108589	61,331	54,8128057	0,090346	33,491	43,0410837	0,117984	14,078	19,114206	0,272236	2,237	217,112825	0,863426	0,760200	112,99261	9,510400
D11	66,789	113,434908	0,125870	57,343	51,4042621	0,105292	31,505	40,5770535	0,126424	13,302	18,162054	0,272627	2,0602	200,224005	0,778487	0,699700	102,250835	9,515752
D15	73,189	124,065948	0,101078	62,999	56,2384453	0,084094	34,4	44,16888	0,114122	14,452	19,573104	0,272047	2,2939	222,548198	0,890762	0,779900	116,490345	9,508658

Tableau : conversion de luminance en réflectance pour les canaux TM de Landsat pour un  $\theta_v = 30$  (El-Djamila)

$\theta_v = 30$	TM1 (Lum)	Cpt numérique	réflectance	TM2 (Lum)	Cpt numérique	réflectance	TM3 (Lum)	Cpt numérique	réflectance	TM4 (Lum)	Cpt numérique	réflectance	TM5 (Lum)	Cpt numérique	réflectance	TM6 (Lum)	Cpt numérique	réflectance
D1	70,856	120,190602	0,110116	60,943	54,4811821	0,091800	33,451	42,9914557	0,118154	14,175	19,233225	0,272187	2,2641	219,701553	0,876445	0,7654	113,91587	9,509940
D2	70,857	120,192263	0,110112	60,944	54,4820368	0,091796	33,427	42,9616789	0,118256	14,094	19,133838	0,272228	2,226	216,06205	0,858141	0,7566	112,35343	9,510719
D7	70,532	119,652405	0,111371	60,706	54,2786182	0,092688	33,25	42,742075	0,119008	14,001	19,019727	0,272275	2,2236	215,83279	0,856988	0,7561	112,264655	9,510763
D8	70,528	119,645761	0,111386	60,704	54,2769088	0,092696	33,25	42,742075	0,119008	14,003	19,022181	0,272274	2,2249	215,956973	0,857612	0,7564	112,31792	9,510736
D10	70,528	119,645761	0,111386	60,704	54,2769088	0,092696	33,249	42,7408343	0,119013	14	19,0185	0,272275	2,2236	215,83279	0,856988	0,7561	112,264655	9,510763
D11	66,141	112,358515	0,128380	56,779	50,9222113	0,107406	31,284	40,3028588	0,127363	13,231	18,074937	0,272663	2,0481	199,068153	0,772673	0,696	101,5939	9,516080
D15	72,447	122,833412	0,103952	62,355	55,6880185	0,086508	34,151	43,8599457	0,115180	14,373	19,476171	0,272087	2,2802	221,239505	0,884180	0,7757	115,744635	9,509029

Tableau : conversion de luminance en réflectance pour les 3 canaux du spot pour un  $\theta_v = 10$  (Bousmail)

$\theta_v = 10$									
	XS1 (Lum)	Cpt numérique	réflectance	XS2 (Lum)	Cpt numérique	réflectance	XS3 (Lum)	Cpt numérique	réflectance
S1	65,829	81,18967	0,09333	45,227	56,00148	0,087465	14,047	17,95204	0,127480
S2	65,828	81,18844	0,09332	45,226	56,00024	0,087469	14,041	17,94412	0,127518
S3	65,829	81,18967	0,09332	45,227	56,00148	0,087465	14,05	17,956	0,127461
S4	65,828	81,18844	0,09332	45,225	55,999	0,087473	14,035	17,9362	0,127556
S5	65,829	81,18967	0,09333	45,224	55,99776	0,087477	14,008	17,90056	0,127727
S6	65,831	81,19213	0,09332	45,224	55,99776	0,087477	13,997	17,88604	0,127797
S7	65,829	81,18967	0,09332	45,224	55,99776	0,087477	14,011	17,90452	0,127708
S8	65,83	81,1909	0,09333	45,225	55,999	0,087473	14,018	17,91376	0,127664
S9	65,832	81,19336	0,09332	45,226	56,00024	0,087469	14,018	17,91376	0,127664
S10	65,83	81,1909	0,09332	45,229	56,00396	0,087457	14,08	17,9956	0,127271
S11	65,831	81,19213	0,09332	45,23	56,0052	0,087453	14,08	17,9956	0,127271
S12	65,833	81,19459	0,09331	45,231	56,00644	0,087449	14,075	17,989	0,127303
S13	65,831	81,19213	0,09332	45,23	56,0052	0,087453	14,074	17,98768	0,127309
S14	65,831	81,19213	0,09332	45,23	56,0052	0,087453	14,08	17,9956	0,127271
S15	65,833	81,19459	0,09331	45,287	56,07588	0,087226	14,969	19,16908	0,121642

Tableau : conversion de luminance en réflectance pour les 3 canaux du spot pour un  $\theta_v = 20$  (Bousmail)

$\theta_v = 20$									
	XS1 (Lum)	Cpt numérique	réflectance	XS2 (Lum)	Cpt numérique	réflectance	XS3 (Lum)	Cpt numérique	réflectance
S1	65,476	80,75548	0,0946559	45,023	55,74852	0,0882793	14,007	17,89924	0,1277337
S2	65,474	80,75302	0,0946634	45,022	55,74728	0,0882832	14,001	17,89132	0,1277717
S3	65,475	80,75425	0,0946596	45,024	55,74976	0,0882753	14,01	17,9032	0,1277147
S4	65,475	80,75425	0,0946596	45,022	55,74728	0,0882832	13,995	17,8834	0,1278097
S5	65,475	80,75425	0,0946596	45,02	55,7448	0,0882912	13,968	17,84776	0,1279807
S6	65,478	80,75794	0,0946484	45,021	55,74604	0,0882872	13,956	17,83192	0,1280567
S7	65,475	80,75425	0,0946596	45,021	55,74604	0,0882872	13,971	17,85172	0,1279617
S8	65,476	80,75548	0,0946559	45,022	55,74728	0,0882832	13,977	17,85964	0,1279237
S9	65,478	80,75794	0,0946484	45,023	55,74852	0,0882793	13,978	17,86096	0,1279174
S10	65,476	80,75548	0,0946559	45,026	55,75224	0,0882673	14,04	17,9428	0,1275248
S11	65,477	80,75671	0,0946521	45,027	55,75348	0,0882633	14,04	17,9428	0,1275248
S12	65,479	80,75917	0,0946446	45,028	55,75472	0,0882593	14,035	17,9362	0,1275564
S13	65,477	80,75671	0,0946521	45,026	55,75224	0,0882673	14,034	17,93488	0,1275627
S14	65,477	80,75671	0,0946521	45,027	55,75348	0,0882633	14,04	17,9428	0,1275248
S15	65,479	80,75917	0,0946446	45,084	55,82416	0,0880360	14,935	19,1242	0,1218573

Tableau : conversion de luminance en réflectance pour les 3 canaux du spot pour un  $\theta_v = 30$  (Bousmail)

$\theta_v = 30$									
	XS1 (Lum)	Cpt numérique	réflectance	XS2 (Lum)	Cpt numérique	réflectance	XS3 (Lum)	Cpt numérique	réflectance
S1	64,83	79,9609	0,097087662	44,651	55,28724	0,089763064	13,934	17,80288	0,128196024
S2	64,829	79,95967	0,097091426	44,65	55,286	0,089767052	13,927	17,79364	0,12824035
S3	64,83	79,9609	0,097087662	44,651	55,28724	0,089763064	13,937	17,80684	0,128177027
S4	64,829	79,95967	0,097091426	44,65	55,286	0,089767052	13,921	17,78572	0,128278344
S5	64,83	79,9609	0,097087662	44,648	55,28352	0,08977503	13,894	17,75008	0,128449316
S6	64,832	79,96336	0,097080133	44,649	55,28476	0,089771041	13,882	17,73424	0,128525304
S7	64,83	79,9609	0,097087662	44,649	55,28476	0,089771041	13,897	17,75404	0,128430319
S8	64,831	79,96213	0,097083897	44,65	55,286	0,089767052	13,904	17,76328	0,128385993
S9	64,832	79,96336	0,097080133	44,651	55,28724	0,089763064	13,904	17,76328	0,128385993
S10	64,83	79,9609	0,097087662	44,654	55,29096	0,089751098	13,966	17,84512	0,12799339
S11	64,832	79,96336	0,097080133	44,655	55,2922	0,089747109	13,967	17,84644	0,127987058
S12	64,833	79,96459	0,097076369	44,656	55,29344	0,089743121	13,961	17,83852	0,128025052
S13	64,831	79,96213	0,097083897	44,654	55,29096	0,089751098	13,961	17,83852	0,128025052
S14	64,832	79,96336	0,097080133	44,655	55,2922	0,089747109	13,967	17,84644	0,127987058
S15	64,833	79,96459	0,097076369	44,712	55,36288	0,08951976	14,872	19,04104	0,122256323

Tableau : conversion de luminance en réflectance pour les canaux MSS du Landsat pour un  $\theta_v = 10$

$\theta_v = 10$												
	MSS4 (Lum)	Cpt numérique	réflectance	MSS5 (Lum)	Cpt numérique	réflectance	MSS6 (Lum)	Cpt numérique	réflectance	MSS7 (Lum)	Cpt numérique	réflectance
S1	65,732	313,550744	0,0980043	43,487	311,638192	0,1571480	17,865	154,218565	0,1824369	11,285	116,254155	0,1714881
S2	65,731	313,545952	0,0979912	43,485	311,62376	0,1571533	17,859	154,165279	0,1824580	11,274	116,137742	0,1715413
S3	65,732	313,550744	0,0979943	43,487	311,638192	0,1571480	17,867	154,236327	0,1824298	11,29	116,30707	0,1714639
S4	65,731	313,545952	0,0979943	43,485	311,62376	0,1571533	17,854	154,120874	0,1824756	11,263	116,021329	0,1715944
S5	65,732	313,550744	0,0980043	43,482	311,602112	0,1571612	17,831	153,916611	0,1825566	11,215	115,513345	0,1718265
S6	65,734	313,560328	0,0979867	43,482	311,602112	0,1571612	17,822	153,836682	0,1825883	11,194	115,291102	0,1719281
S7	65,732	313,550744	0,0979943	43,483	311,609328	0,1571586	17,834	153,943254	0,1825461	11,221	115,576843	0,1717975
S8	65,733	313,555536	0,0980043	43,484	311,616544	0,1571559	17,84	153,99654	0,1825249	11,232	115,693256	0,1717443
S9	65,735	313,56512	0,0979828	43,485	311,62376	0,1571533	17,84	153,99654	0,1825249	11,232	115,693256	0,1717443
S10	65,733	313,555536	0,0979905	43,49	311,65984	0,1571400	17,893	154,467233	0,1823382	11,343	116,867969	0,1712077
S11	65,734	313,560328	0,0979867	43,491	311,667056	0,1571374	17,894	154,476114	0,1823347	11,343	116,867969	0,1712077
S12	65,735	313,56512	0,0979828	43,492	311,674272	0,1571347	17,89	154,44059	0,1823488	11,333	116,762139	0,1712560
S13	65,734	313,560328	0,0979867	43,49	311,65984	0,1571400	17,889	154,431709	0,1823523	11,333	116,762139	0,1712560
S14	65,734	313,560328	0,0979867	43,491	311,667056	0,1571374	17,894	154,476114	0,1823347	11,343	116,867969	0,1712077
S15	65,736	313,569912	0,0979790	43,57	312,23712	0,1569278	18,621	160,932601	0,1797741	13,553	140,256399	0,1605224

Tableau : conversion de luminance en réflectance pour les canaux MSS du Landsat pour un  $\theta_v = 20$

$\theta_v = 20$												
	MSS4 (Lum)	Cpt numérique	réflectance	MSS5 (Lum)	Cpt numérique	réflectance	MSS6 (Lum)	Cpt numérique	réflectance	MSS7 (Lum)	Cpt numérique	réflectance
S1	65,379	311,859168	0,099351729	43,291	310,223856	0,157667915	17,811	153,738991	0,182627116	11,245	115,830835	0,171681525
S2	65,378	311,854376	0,099355575	43,289	310,209424	0,15767322	17,805	153,685705	0,182648249	11,234	115,714422	0,171734709
S3	65,379	311,859168	0,099351729	43,291	310,223856	0,157667915	17,814	153,765634	0,18261655	11,25	115,88375	0,17165735
S4	65,378	311,854376	0,099355575	43,289	310,209424	0,15767322	17,8	153,6413	0,18266586	11,224	115,608592	0,171783059
S5	65,379	311,859168	0,099351729	43,286	310,187776	0,157681177	17,777	153,437037	0,182746871	11,176	115,100608	0,172015136
S6	65,381	311,868752	0,099344039	43,287	310,194992	0,157678525	17,768	153,357108	0,182778571	11,155	114,878365	0,17211667
S7	65,379	311,859168	0,099351729	43,287	310,194992	0,157678525	17,78	153,46368	0,182736305	11,181	115,153523	0,171990961
S8	65,38	311,86396	0,099347884	43,288	310,202208	0,157675872	17,786	153,516966	0,182715171	11,192	115,269936	0,171937777
S9	65,381	311,868752	0,099344039	43,289	310,209424	0,15767322	17,786	153,516966	0,182715171	11,192	115,269936	0,171937777
S10	65,379	311,859168	0,099351729	43,295	310,25272	0,157657305	17,839	153,987659	0,182528494	11,304	116,455232	0,171396263
S11	65,381	311,868752	0,099344039	43,296	310,259936	0,157654653	17,84	153,99654	0,182524972	11,304	116,455232	0,171396263
S12	65,382	311,873544	0,099340193	43,296	310,259936	0,157654653	17,836	153,961016	0,182539061	11,294	116,349402	0,171444612
S13	65,38	311,86396	0,099347884	43,295	310,25272	0,157657305	17,835	153,952135	0,182542583	11,293	116,338819	0,171449447
S14	65,381	311,868752	0,099344039	43,296	310,259936	0,157654653	17,84	153,99654	0,182524972	11,304	116,455232	0,171396263
S15	65,382	311,873544	0,099340193	43,374	310,822784	0,157447761	18,571	160,488551	0,179950241	13,523	139,938909	0,16066751

Tableau : conversion de luminance en réflectance pour les canaux MSS du Landsat pour un  $\theta_v = 30$

$\theta_v = 30$												
	MSS4 (Lum)	Cpt numérique	réflectance	MSS5 (Lum)	Cpt numérique	réflectance	MSS6 (Lum)	Cpt numérique	réflectance	MSS7 (Lum)	Cpt numérique	réflectance
S1	64,734	308,768328	0,101831943	42,933	307,640528	0,158617495	17,713	152,868653	0,182972292	11,173	115,068859	0,172029641
S2	64,733	308,763536	0,101835788	42,931	307,626096	0,1586228	17,707	152,815367	0,182993425	11,162	114,952446	0,172082826
S3	64,734	308,768328	0,101831943	42,933	307,640528	0,158617495	17,715	152,886415	0,182965248	11,179	115,132357	0,172000631
S4	64,733	308,763536	0,101835788	42,931	307,626096	0,1586228	17,702	152,770962	0,183011036	11,152	114,846616	0,172131175
S5	64,734	308,768328	0,101831943	42,928	307,604448	0,158630757	17,679	152,566699	0,183092047	11,104	114,338632	0,172363253
S6	64,736	308,777912	0,101824252	42,929	307,611664	0,158628105	17,669	152,477889	0,183127269	11,083	114,116389	0,172464787
S7	64,734	308,768328	0,101831943	42,929	307,611664	0,158628105	17,681	152,584461	0,183085003	11,109	114,391547	0,172339078
S8	64,735	308,77312	0,101828098	42,93	307,61888	0,158625452	17,687	152,637747	0,18306387	11,112	114,50796	0,172285893
S9	64,736	308,777912	0,101824252	42,931	307,626096	0,1586228	17,688	152,646628	0,183060347	11,112	114,50796	0,172285893
S10	64,734	308,768328	0,101831943	42,937	307,669392	0,158606885	17,741	153,117321	0,18287367	11,232	115,693256	0,171744379
S11	64,736	308,777912	0,101824252	42,938	307,676608	0,158604232	17,742	153,126202	0,182870148	11,232	115,693256	0,171744379
S12	64,737	308,782704	0,101820407	42,938	307,676608	0,158604232	17,738	153,090678	0,182884237	11,222	115,587426	0,171792729
S13	64,735	308,77312	0,101828098	42,937	307,669392	0,158606885	17,737	153,081797	0,182887759	11,221	115,576843	0,171797564
S14	64,736	308,777912	0,101824252	42,938	307,676608	0,158604232	17,742	153,126202	0,182870148	11,232	115,693256	0,171744379
S15	64,737	308,782704	0,101820407	43,017	308,246672	0,158394688	18,479	159,671499	0,180274283	13,468	139,356844	0,160933432

Tableau : conversion de luminance en réflectance pour les canaux TM de Landsat pour un  $\theta_v = 10$  (Bousmail)

$\theta_v = 10$																		
	TM1 (Lum)	Cpt numérique	réflectance	TM2 (Lum)	Cpt numérique	réflectance	TM3 (Lum)	Cpt numérique	réflectance	TM4 (Lum)	Cpt numérique	réflectance	TM5 (Lum)	Cpt numérique	réflectance	TM6 (Lum)	Cpt numérique	réflectance
S1	71,89	121,908179	0,1061101	61,739	55,1615233	0,0888167	33,878	43,5212346	0,1163397	14,373	19,476171	0,2720867	2,2631	219,6060275	0,8759645	0,7631	113,507505	9,5101437
S2	71,889	121,9065179	0,1061140	61,738	55,1606686	0,0888204	33,875	43,5175125	0,1163525	14,367	19,468809	0,2720897	2,2606	219,367215	0,8747635	0,7048	103,15634	9,5153013
S3	71,89	121,908179	0,1061001	61,739	55,1615233	0,0888167	33,878	43,5212346	0,1163397	14,376	19,479852	0,2720852	2,2644	219,73021	0,8765891	0,7634	113,56077	9,5101172
S4	71,889	121,9065179	0,1061140	61,739	55,1615233	0,0888167	33,874	43,5162718	0,1163567	14,362	19,462674	0,2720922	2,258	219,11885	0,8735144	0,762	113,3122	9,5102410
S5	71,89	121,908179	0,1061101	61,739	55,1615233	0,0888167	33,867	43,5075869	0,1163865	14,338	19,433226	0,2721043	2,2466	218,029865	0,8680376	0,7595	112,868325	9,5104622
S6	71,892	121,9115012	0,1061024	61,741	55,1632327	0,0888092	33,865	43,5051055	0,1163950	14,328	19,420956	0,2721094	2,2416	217,55224	0,8656354	0,7584	112,67302	9,5105595
S7	71,89	121,908179	0,1061001	61,739	55,1615233	0,0888167	33,868	43,5088276	0,1163822	14,341	19,436907	0,2721028	2,2479	218,1540475	0,8686621	0,7598	112,92159	9,5104356
S8	71,891	121,9098401	0,1061063	61,74	55,162378	0,0888129	33,87	43,511309	0,1163737	14,347	19,444269	0,2720998	2,2504	218,39286	0,8698632	0,7603	113,010365	9,5103914
S9	71,893	121,9131623	0,1060985	61,742	55,1640874	0,0888054	33,871	43,5125497	0,1163695	14,347	19,444269	0,2720998	2,2504	218,39286	0,8698632	0,7603	113,010365	9,5103914
S10	71,891	121,9098401	0,1061063	61,74	55,162378	0,0888129	33,887	43,5324009	0,1163015	14,402	19,511754	0,2720720	2,2771	220,9433775	0,8826905	0,7661	114,040155	9,5098783
S11	71,892	121,9115012	0,1061024	61,741	55,1632327	0,0888092	33,887	43,5324009	0,1163015	14,402	19,511754	0,2720720	2,2771	220,9433775	0,8826905	0,7661	114,040155	9,5098783
S12	71,894	121,9148234	0,1060946	61,742	55,1640874	0,0888054	33,887	43,5324009	0,1163015	14,398	19,506846	0,2720741	2,2746	220,704565	0,8814894	0,7656	113,95138	9,5099225
S13	71,892	121,9115012	0,1061024	61,741	55,1632327	0,0888092	33,886	43,5311602	0,1163057	14,397	19,505619	0,2720746	2,2746	220,704565	0,8814894	0,7656	113,95138	9,5099225
S14	71,892	121,9115012	0,1061024	61,714	55,1401558	0,0889104	33,888	43,5336416	0,1162972	14,402	19,511754	0,2720720	2,2771	220,9433775	0,8826905	0,7661	114,040155	9,5098783
S15	71,894	121,9148234	0,1060946	61,742	55,1640874	0,0888054	34,077	43,7681339	0,1154941	15,178	20,463906	0,2716803	3,1564	304,93851	1,3051272	0,8453	128,102115	9,5028718

Tableau : conversion de luminance en réflectance pour les canaux TM de Landsat pour un  $\theta_v = 20$  (Bousmail)

$\theta_v = 20$	TM1 (Lum)	Cpt numérique	réflectance	TM2 (Lum)	Cpt numérique	réflectance	TM3 (Lum)	Cpt numérique	réflectance	TM4 (Lum)	Cpt numérique	réflectance	TM5 (Lum)	Cpt numérique	réflectance	TM6 (Lum)	Cpt numérique	réflectance
S1	71,508	121,2736388	0,107589874	61,407	54,8777629	0,09006101	33,749	43,3611843	0,116887944	14,332	19,425864	0,272107423	2,2559	218,9182475	0,872505542	0,761	113,13465	9,5103295
S2	71,507	121,2719777	0,107593748	61,406	54,8769082	0,090064758	33,746	43,3574622	0,116900692	14,326	19,418502	0,272110452	2,2534	218,679435	0,871304482	0,7029	102,818995	9,5154694
S3	71,508	121,2736388	0,107589874	61,407	54,8777629	0,09006101	33,749	43,3611843	0,116887944	14,335	19,429545	0,272105908	2,2572	219,04243	0,873130093	0,7613	113,187915	9,5103029
S4	71,507	121,2719777	0,107593748	61,406	54,8769082	0,090064758	33,745	43,3562215	0,116904941	14,321	19,412367	0,272112976	2,2508	218,43107	0,87005538	0,7599	112,939345	9,5104268
S5	71,508	121,2736388	0,107589874	61,407	54,8777629	0,09006101	33,738	43,3475366	0,116934687	14,297	19,382919	0,272125092	2,2394	217,342085	0,864578548	0,7573	112,477715	9,5106568
S6	71,511	121,2786221	0,107578253	61,409	54,8794723	0,090053514	33,736	43,3450552	0,116943186	14,287	19,370649	0,27213014	2,2344	216,86446	0,862176429	0,7562	112,28241	9,5107541
S7	71,508	121,2736388	0,107589874	61,407	54,8777629	0,09006101	33,739	43,3487773	0,116930438	14,3	19,3866	0,272123577	2,2407	217,4662675	0,865203099	0,7576	112,53098	9,5106303
S8	71,509	121,2752999	0,107586001	61,408	54,8786176	0,090057262	33,741	43,3512587	0,116921939	14,306	19,393962	0,272120548	2,2432	217,70508	0,866404159	0,7582	112,63751	9,5105772
S9	71,511	121,2786221	0,107578253	61,409	54,8794723	0,090053514	33,742	43,3524994	0,11691769	14,306	19,393962	0,272120548	2,2432	217,70508	0,866404159	0,7582	112,63751	9,5105772
S10	71,509	121,2752999	0,107586001	61,407	54,8777629	0,09006101	33,758	43,3723506	0,116849699	14,361	19,461447	0,272092782	2,2699	220,2555975	0,879231477	0,764	113,6673	9,5100641
S11	71,51	121,276961	0,107582127	61,409	54,8794723	0,090053514	33,759	43,3735913	0,11684545	14,361	19,461447	0,272092782	2,2699	220,2555975	0,879231477	0,764	113,6673	9,5100641
S12	71,512	121,2802832	0,10757438	61,41	54,880327	0,090049766	33,758	43,3723506	0,116849699	14,357	19,456539	0,272094802	2,2673	220,0072325	0,877982374	0,7635	113,578525	9,5101083
S13	71,51	121,276961	0,107582127	61,408	54,8786176	0,090057262	33,757	43,3711099	0,116853949	14,356	19,455312	0,272095306	2,2673	220,0072325	0,877982374	0,7635	113,578525	9,5101083
S14	71,51	121,276961	0,107582127	61,409	54,8794723	0,090053514	33,759	43,3735913	0,11684545	14,362	19,462674	0,272092277	2,2699	220,2555975	0,879231477	0,764	113,6673	9,5100641
S15	71,512	121,2802832	0,10757438	61,41	54,880327	0,090049766	33,949	43,6093243	0,116038064	15,143	20,420961	0,271698	3,1527	304,5850675	1,30334968	0,844	127,8713	9,5029868

Tableau : conversion de luminance en réflectance pour les canaux TM de Landsat pour un  $\theta_v = 30$  (Bousmail)

$\theta_v=30$	TM1 (Lum)	Cpt numérique	réflectance	TM2 (Lum)	Cpt numérique	réflectance	TM3 (Lum)	Cpt numérique	réflectance	TM4 (Lum)	Cpt numérique	réflectance	TM5 (Lum)	Cpt numérique	réflectance	TM6 (Lum)	Cpt numérique	réflectance
S1	70,811	120,1158521	0,110289833	60,801	54,3598147	0,092332213	33,512	43,0671384	0,117895051	14,257	19,333839	0,272145285	2,2429	217,6764225	0,866260032	0,7572	112,45996	9,5106657
S2	70,81	120,114191	0,110293707	60,8	54,35896	0,09233596	33,51	43,064657	0,11790355	14,251	19,326477	0,272148314	2,2404	217,43761	0,865058972	0,6994	102,19757	9,515779039
S3	70,811	120,1158521	0,110289833	60,8	54,35896	0,09233596	33,513	43,0683791	0,117890802	14,26	19,33752	0,272143771	2,2442	217,800605	0,866884583	0,7575	112,513225	9,510639161
S4	70,81	120,114191	0,110293707	60,8	54,35896	0,09233596	33,509	43,0634163	0,117907799	14,246	19,320342	0,272150838	2,2379	217,1987975	0,863857912	0,7561	112,264655	9,510763013
S5	70,811	120,1158521	0,110289833	60,8	54,35896	0,09233596	33,502	43,0547314	0,117937545	14,222	19,290894	0,272162955	2,2265	216,1098125	0,85838108	0,7535	111,803025	9,510993025
S6	70,814	120,1208354	0,110278212	60,802	54,3606694	0,092328465	33,5	43,05225	0,117946044	14,212	19,278624	0,272168003	2,2214	215,622635	0,855930918	0,7523	111,589965	9,511099184
S7	70,811	120,1158521	0,110289833	60,8	54,35896	0,09233596	33,502	43,0547314	0,117937545	14,225	19,294575	0,27216144	2,2277	216,2244425	0,858957589	0,7538	111,85629	9,510966485
S8	70,813	120,1191743	0,110282086	60,801	54,3598147	0,092332213	33,505	43,0584535	0,117924797	14,231	19,301937	0,272158411	2,2302	216,463255	0,860158648	0,7543	111,945065	9,510922252
S9	70,814	120,1208354	0,110278212	60,803	54,3615241	0,092324717	33,506	43,0596942	0,117920547	14,231	19,301937	0,272158411	2,2302	216,463255	0,860158648	0,7543	111,945065	9,510922252
S10	70,812	120,1175132	0,110285959	60,801	54,3598147	0,092332213	33,521	43,0783047	0,117856806	14,286	19,369422	0,272130645	2,2569	219,0137725	0,872985966	0,7603	113,010365	9,510391456
S11	70,914	120,2869454	0,109890843	60,802	54,3606694	0,092328465	33,522	43,0795454	0,117852557	14,287	19,370649	0,27213014	2,2569	219,0137725	0,872985966	0,7603	113,010365	9,510391456
S12	70,815	120,1224965	0,110274338	60,804	54,3623788	0,092320969	33,522	43,0795454	0,117852557	14,282	19,364514	0,272132664	2,2544	218,77496	0,871784906	0,7597	112,903835	9,510444535
S13	70,813	120,1191743	0,110282086	60,802	54,3606694	0,092328465	33,52	43,077064	0,117861056	14,281	19,363287	0,272133169	2,2544	218,77496	0,871784906	0,7597	112,903835	9,510444535
S14	70,814	120,1208354	0,110278212	60,802	54,3606694	0,092328465	33,522	43,0795454	0,117852557	14,287	19,370649	0,27213014	2,2569	219,0137725	0,872985966	0,7603	113,010365	9,510391456
S15	70,815	120,1224965	0,110274338	60,804	54,3623788	0,092320969	33,715	43,3190005	0,117032423	15,077	20,339979	0,271731319	3,1459	303,9354975	1,300082798	0,8418	127,48069	9,503181471

## ملخص

تم تقدير مستويات التلوث النفطي في وقت واحد باستخدام إدخال بيانات الاستشعار عن بعد من صور الأقمار الصناعية وومضات الطيف المفلورة على عينات من المياه السطحية. وقد استخدم التحليل الكمي للمواد الهيدروكربونية في المختبر لمعايرة بيانات الاستشعار عن بعد. وقد تمت معالجة البيانات المدخلة من قبل التقنيات المذكورة باستخدام الكمبيوتر لإنتاج خريطة مرمزة وهو أمر مستحيل مع الأساليب التقليدية التي تمثل تلوث مياه البحر. كانت النتائج التي حصلنا عليها في الخليج الملوث بالمواد النفطية باستعمال منهجيات مختلفة ، في توافق جيد وأشارت إلى أن نتائج الاستشعار عن بعد وتلك التي تستعمل ومضات الطيف المفلورة قابلة للتطبيق لرصد التلوث النفطي. كلمات مفتاحية: الاستشعار, وومضات الطيف المفلورة, خريطة مرمزة, رصد

## Résumé :

Des niveaux de pollution pétrolière ont été estimés en utilisant la saisie simultanée des données de la télédétection par des images satellitaires et de la spectroscopie de fluorescence sur les échantillons d'eau de surface.

L'analyse quantitative des hydrocarbures au laboratoire a été employée pour calibrer des données détectée à distance. Les données saisies par les techniques mentionnées ont été traités en utilisant un ordinateur pour produire une carte de code à couleurs ce qui est impossible avec les méthodes conventionnelles représentant la pollution de l'eau de mer.

Les résultats obtenus dans la baie polluée par le pétrole avec les deux méthodologies différentes, étaient en bon accord et indiqués que les résultats de la télédétection et ceux réalisés par la spectroscopie de fluorescence sont applicables pour la surveillance de la pollution par les hydrocarbures.

Mots clés : télédétection, spectroscopie de fluorescence, carte de code à couleurs, surveillance

## Abstract

Oil pollution levels were estimated using simultaneous acquisition of data from remote sensing by satellite and fluorescence spectroscopy on water surface samples.

Laboratory quantitative analysis of hydrocarbons was used to calibrate remotely sensed data. The data acquired by the mentioned techniques were treated using a computer to generate a color-coded map not attainable with conventional methods representing seawater pollution.

Results obtained in oil polluted bay with the two different methodologies, were in good agreement and indicated that remotely sensed data together with those achieved by fluorescence spectroscopy are applicable for monitoring hydrocarbon pollution.

Key word: Remote sensing, fluorescence spectroscopy, color-coded map, monitoring.