

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



THESE DE DOCTORAT

Domaine : Science de la Nature et de la Vie

Filière : Hydrobiologie Marine et Continentale

Spécialité : Science de la Mer

**Modélisation de la cinématique du trait de côte, dynamique sédimentaire  
et évaluation des zones à risque de la côte Algéroise.**

Préparé par :

Mr BOUKHENNAF Abdelouahad

Soutenu le 08 février 2024 à 17h devant la commission de jury :

|                          |                         |         |            |
|--------------------------|-------------------------|---------|------------|
| Mm HOUMA BACHRI fouzia   | professeur              | ENSSMAL | Présidente |
| Mr Mr MEZOUAR Khoudir    | professeur              | ENSSMAL | Promoteur  |
| Mr Guerfi Mokhtar        | professeur              | USTHB   | Examineur  |
| Mr BACHARI Nour El Islam | professeur              | USTHB   | Examineur  |
| Mm FEZAA Nacima          | professeur              | ENSSMAL | Examineur  |
| Mr LAMINE Salim          | Maitre de conférences A | ESASA   | Examineur  |

Promotion : 2024

## **Remerciements**

Je remercie Dieu de m'avoir permis de m'engager sur le chemin de la connaissance, de m'avoir donné la santé, la patience et le courage de mener à bien cette thèse.

Je tiens à remercier tout particulièrement mon directeur de thèse, le Professeur Mezouar K pour sa disponibilité et son soutien constant, et pour m'avoir laissé le temps et la liberté de faire des recherches.

Je tiens également à remercier sincèrement les membres du jury qui ont accepté d'examiner ce travail :

Mme. HOUMA BACHRI F. Professeur à l'ENSSMAL, qui me fait l'honneur de présider le jury, pour sa disponibilité.

Merci à Mr GUERFI M, professeur et enseignant-chercheur à l'USTHB, BACHARI Nour El Islam professeur et enseignant-chercheur à l'USTHB, Mme FEZAA N. Professeur à l'ENSSMAL. Merci également à LAMINE Salim, Maitre de conférences A à ESASA.

Je tiens à remercier mon ami ketfi b de m'encouragé durant la préparation de cette thèse.

Je remercie également Sahouli Nadir, président de l'Association écologique de Boumerdès, et M. Kitfi Bader Idine.

Je remercie également l'ensemble du personnel du Commissariat National du Littoral.

J'adresse également mes plus vifs remerciements à ma chère mère, à mon épouse et à mes frères et sœurs pour leurs encouragements et leur soutien.

Enfin, je tiens à remercier toutes les personnes qui m'ont aidé de près ou de loin à réaliser cette thèse.

Je rends hommage à mon cher père et à mon professeur M. LARID Mohammed et BENDAOUH Riad.

*A mon fils Ishak et ma fille Serine*

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Sommaire</b>   |           |
| <b>Remerciement</b>   |           |
| <b>Liste des acronymes</b>  |           |
| <b>Liste des figures</b>  |           |
| <b>Liste des tableaux</b>   |           |
| <b>Introduction générale</b>  | <b>1</b>  |
| <b>Chapitre I Généralité</b>  | <b>5</b>  |
| <b>I. 1 Le système littoral</b>   | <b>6</b>  |
| <b>I.2 Système morphodynamique</b>  | <b>6</b>  |
| <b>I.3 Découpage spatio-temporel de l'évolution des composantes du système littoral</b> | <b>8</b>  |
| <b>I.4 Hydrodynamique des plages</b>  | <b>8</b>  |
| <b>I.5 Les agents de la dynamique littorale</b>   | <b>9</b>  |
| <b>I.5.1 La houle</b>   | <b>9</b>  |
| <b>I.5.2 Les courants côtiers</b>   | <b>10</b> |
| <b>I.5.3 Les marées</b>   | <b>10</b> |
| <b>I.6 Les classifications morphodynamiques des plages</b>                              | <b>11</b> |
| <b>I.7 Notions du trait de côte</b>   | <b>12</b> |
| <b>I.7.1 Les lignes de référence géomorphologiques</b>                                  | <b>12</b> |
| <b>I.7.2 Les lignes botaniques (végétation)</b>   | <b>13</b> |
| <b>I.7.3 Les niveaux d'eau</b>  | <b>13</b> |
| <b>I.8 Changements climatiques et élévation du niveau de la mer</b>                     | <b>13</b> |
| <b>I.8.1 Changements climatiques</b>  | <b>13</b> |
| <b>I.8.2 Élévation du niveau de la mer</b>  | <b>16</b> |
| <b>Chapitre II : Présentation du littoral Algérois</b>                                  | <b>17</b> |
| <b>II.1 Situation géographique du littoral Algérois</b>                                 | <b>18</b> |
| <b>II.1.2 Délimitation et typologie de la côte Algéroise</b>                            | <b>18</b> |
| <b>II.1.3 Les dunes côtières</b>  | <b>21</b> |
| <b>II.1.4 Les plages</b>  | <b>22</b> |
| <b>II.2 Contexte géologique</b>   | <b>27</b> |
| <b>II.3 Cadre sismique</b>  | <b>28</b> |
| <b>II.4 Cadre climatique et hydrographique</b>  | <b>29</b> |
| <b>II.4.1 La température</b>  | <b>29</b> |
| <b>II.4.2 Les précipitations</b>  | <b>29</b> |
| <b>II.5 Cadre hydrographique</b>  | <b>31</b> |
| <b>II.5.1 Les Oueds</b>   | <b>31</b> |

|  |           |
|--|-----------|
| <b>II.5.2 Les barrages :</b> .....   | <b>32</b> |
| <b>II.6 Contexte hydrodynamique :</b> .....  | <b>33</b> |
| <b>II.6.1 Le Vent</b> .....  | <b>33</b> |
| <b>II.6.2. La Houle</b> .....  | <b>36</b> |
| <b>II.6.3. La Marée</b> .....  | <b>39</b> |
| <b>Chapitre III Evolution de l'occupation des sols de la côte Algéroise</b> .....            | <b>41</b> |
| <b>Introduction :</b> .....  | <b>42</b> |
| <b>III.1 Matériel et données :</b> .....   | <b>42</b> |
| <b>III.2 Prétraitement des images satellitaires et classification :</b> .....                | <b>42</b> |
| <b>III.3 : Validation des classifications :</b> .....  | <b>43</b> |
| <b>III.4 : Résultat et interprétation :</b> .....  | <b>45</b> |
| <b>III.4.1 : La bande des 30km :</b> .....   | <b>45</b> |
| <b>III.4.1 La bande des 3km :</b> .....  | <b>47</b> |
| <b>III.5 Conclusion :</b> .....  | <b>48</b> |
| <b>Chapitre IV : Hydrodynamique sédimentaire du littoral Algérois.</b> .....                 | <b>49</b> |
| <b>IV.1 Introduction</b> .....   | <b>50</b> |
| <b>IV.2. Présentation de la modélisation :</b> .....   | <b>50</b> |
| <b>IV.2.1. Principe de la modélisation :</b> .....   | <b>50</b> |
| <b>IV.2.2. Présentation du modèle :</b> .....  | <b>51</b> |
| <b>IV.2.3. Construction du modèle</b> .....  | <b>59</b> |
| IV.2.3 .1. Emprise du modèle, bathymétrie et pas de maille .....                             | 59        |
| <b>IV.3 Résultats et discussions :</b> .....   | <b>61</b> |
| <b>IV.3.1 Interprétation des résultats bathymétriques des trois Baies :</b> .....            | <b>61</b> |
| IV.3.1.1 Bathymétrie de la Baie de Bou-Ismaïl : .....  | 61        |
| IV.3.1.2 Bathymétrie de la Baie d'Alger .....  | 62        |
| IV.3.1.3 Bathymétrie de la Baie de Zemmouri : .....  | 64        |
| <b>IV.4 Modélisation de la houle au large à l'aide du code de calcul (SW-Mike21) :</b> ..... | <b>65</b> |
| <b>Données d'entrée et calibration :</b> .....   | <b>66</b> |
| <b>IV.4.2 Résultats</b> .....  | <b>67</b> |
| <b>IV.5 Modélisation des champs de courants générés par la houle :</b> .....                 | <b>75</b> |
| <b>IV.5.1 Conditions aux limites et autres paramètres :</b> .....                            | <b>75</b> |
| <b>IV.5.2 Résultats des simulations HD et interprétations :</b> .....                        | <b>75</b> |
| <b>IV.6.1 Résultats du modèle Mike 21 ST :</b> .....   | <b>82</b> |
| <b>IV.7 Conclusion :</b> .....   | <b>90</b> |
| <b>Chapitre V : Cinématique du trait de côte</b> .....                                       | <b>91</b> |

|   |            |
|---|------------|
| <b>V.1. Introduction :</b> .....  | <b>92</b>  |
| <b>V.2. Définitions du trait de côte :</b> .....  | <b>92</b>  |
| <b>V.3.1. Collecte et traitement des données :</b> .....  | <b>92</b>  |
| <b>V.3.2. Outil de traitement :</b> .....   | <b>93</b>  |
| <b>ArcGIS :</b> .....   | <b>93</b>  |
| <b>V.3.4. L'extraction du trait de côte :</b> .....   | <b>96</b>  |
| <b>V.3.5 Evaluation de la précision :</b> .....   | <b>100</b> |
| <b>V.3.6 Estimation des erreurs :</b> .....   | <b>105</b> |
| <b>V.4. Les résultats :</b> .....   | <b>106</b> |
| <b>V.4.1 Evolution du littoral à long terme :</b> .....   | <b>106</b> |
| <b>V.4.2 Changement à court terme du littoral :</b> .....   | <b>110</b> |
| <b>V.5. Discussions :</b> .....   | <b>116</b> |
| <b>1. Modifications du littoral dues à des causes naturelles :</b> .....  | <b>116</b> |
| <b>2. Changements dus à l'intervention humaine :</b> .....  | <b>118</b> |
| <b>V.6. Conclusion</b> .....  | <b>122</b> |
| <b>Chapitre VI : Détermination et cartographie des aléas d'érosion et de submersion marine sur le littoral Algérois</b> ..... | <b>123</b> |
| <b>VI.1. Définition de la zone de risque côtier</b> .....   | <b>124</b> |
| <b>VI.2. Méthodologie :</b> .....   | <b>124</b> |
| <b>VI.2.1 Détermination du Niveau d'inondations marines :</b> .....   | <b>125</b> |
| VI.2.1.1 Scénarios d'élévation du Niveau de la mer :.....   | 125        |
| VI.2.1.2 Niveau moyen des hautes eaux :.....  | 125        |
| VI.2.1.3 Variation du niveau de la mer liée à la pression atmosphérique :.....  | 126        |
| VI.2.1.4 Analyse des valeurs extrêmes : .....   | 126        |
| VI.2.1.5 Les houles extrêmes à la côte :.....   | 131        |
| <b>VI.3 Scénarios de submersion marine sur les zones d'étude :</b> .....  | <b>131</b> |
| <b>VI.2.2 La cartographie des zones inondables :</b> .....  | <b>132</b> |
| <b>VI.3 Résultats :</b> .....   | <b>133</b> |
| <b>VI.3.1 Evaluation de l'impact de la submersion marine sur les sites d'étude :</b> .....                                    | <b>135</b> |
| <b>VI.4 Conclusion :</b> .....  | <b>143</b> |
| <b>Conclusion générale</b> .....  | <b>144</b> |
| <b>Références bibliographiques</b> .....  | <b>148</b> |

## **Annexe**

### **Table des acronymes**

**AMIS** : Algerian coast Management through Integration and Sustainability

**ANRH** : Agence Nationale des Ressources Hydrauliques

**BRGM**: Bureau de Recherche Géologique et Minière (France)

**DGPS** : Differential Global Positioning System

**DHI** : Institut Hydraulique Danois

**DSAS**: Digital Shoreline Analysis System

**E** : Est

**EPR** : End Point Rate

**FAO**: Food and Agriculture Organization

**GIEC** : Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'Evolution du Climat

**GIZC**: Gestion Intégrée des Zones Côtières

**GPS**: Global Positioning System

**HD**: (Hydrodynamic model) module d'hydrodynamisme

**Hs**: Hauteur significatives

**IPCC** : The Intergovernmental Panel on Climate Change

**IUCN**: International Union for Conservation of Nature

**Km** : Kilomètre

**LiDAR** : Light Detection and Ranging

**LRR** : Linear Regression Rate-of-change

**m** : Mètre

**m/an**: Mètre par an

**m/s** : Mètre par seconde

**MNT**: Model Numérique du Terrain

**MWD** : Mean Wave Direction

**N**: Nord

**NDVI** : Normalized Difference Vegetation Index

**NDWI** : Normalized Difference Water Index

**NE**: Nord-Est

**NIR** : Near-Infrared Radiation

**NO**: Nord-Ouest

**NRMSE** : Normalized Root Mean Square Error

**ONM:** office national de la météorologie

**ONS:** Office National des Statistiques

**PAC:** Programme d'Aménagement Côtière.

**PDAU:** Plan Directeur d'Aménagement et d'Urbanisme.

**s:** Seconde

**SIG:** système d'information géographique

**ST:** (Sand Transport model) module du transport sédimentaire

**SW:** (Spectral Waves model) module des ondes spectrales

**Tp:** Période pique

**USGS:** (United States Geological Survey) Institut d'études géologiques des États-Unis

**WGS 84:** World Geodesic System

## Listes des figures

|  |    |
|--|----|
| Figure I. 1: Détermination de la bande littorale conformément à la loi 02-02 du 05-02-2002(Kacemi, 2013).....  | 7  |
| Figure I.2 : Principaux objets intégrés dans l'approche du système morphodynamique (Cowell and Thom, 1994). ....   | 7  |
| Figure I. 3 : Relation spatio-temporelles des systèmes morphodynamiques littoraux (Dubarbier, 2014 modifié).....   | 8  |
| Figure I. 4: Processus hydrodynamiques induits par les vagues incidentes sur un profil de plage microtidal (Davidson-Arnott, 2010). ....   | 9  |
| Figure I. 5 : Les différents courants générés par les vagues auprès de la côte (Short, 1999, modifié par Amrouni, 2020).....   | 11 |
| Figure I. 6 : Modèle de classification des plages sableuses selon Masselink and Short (1993)..   | 12 |
| Figure I. 7: Schéma de quelques exemples de lignes de référence géomorphologiques (Faye, 2010).....  | 14 |
| Figure I. 8: Représentation graphique de la limite de la végétation pérenne. ....  | 15 |
| Figure I. 9 : Evolution de la température de la surface de la planète entre 1850 et 2020 (IPCC, 2023). ....  | 15 |
| Figure I. 10 : Projection de l'élévation du niveau moyen de la mer à l'échelle mondiale selon différents scénarios de la trajectoire socio-économique commune (ssp) (par rapport à 1995-2014) (IPCC, 2021). .... | 16 |
| Figure II. 1: Localisation de la zone d'étude. 18  |    |
| Figure II. 2: Typologie de la côte baie de Bou Ismail.....   | 19 |
| Figure II. 3 : Typologie de la côte de la baie d'Alger.....  | 20 |
| Figure II. 4 : Typologie de la côte de la baie de Zemmouri. ....   | 21 |
| Figure II. 5 : La carte géologique de la région Algéroise (Domzig, 2006).....  | 28 |
| Figure II. 6 : La carte de la région Algéroise, montrant la sismicité historique avec $M > 4$ estimé de 1365 à 2013 (Mokrane, A., 1994) in (Yelles-Chaouche et al., 2017b). ....                                 | 29 |
| Figure II. 7 : Distribution des températures dans la région Algéroise (wofrance, 2023). ....   | 30 |
| Figure II. 8 : Les précipitations mensuelles moyennes dans la région Algéroise (wofrance, 2023).....   | 30 |
| Figure II. 9 : Réseau hydrographique de la grande baie de la côte Algéroise.....   | 32 |
| Figure II. 10 : Roses des vents au large de la baie de Bou Ismail (1992-2021).....   | 34 |
| Figure II. 11 : Roses des vents au large de la baie d'Alger (1992-2021). ....  | 35 |
| Figure II. 12 : Roses des vents au large de la baie de Zemmouri (1992-2021).....   | 36 |
| Figure II. 13 : Roses des houles saisonnières et annuelles au large de la baie de Bou Ismail (1992-2021).....  | 37 |
| Figure II. 14 : Roses des houles saisonnières et annuelles au large de la baie d'Alger (1992-2021).....  | 38 |
| Figure II. 15 : Roses des houles saisonnières et annuelles au large de la baie de Zemmouri (1992-2021).....  | 39 |
| Figure III. 1 : Délimitation de la bande 3 km et 30 km de la région Algéroise. ....  | 43 |
| Figure III. 2 : Cartes d'occupation du sol de 1984, 2001 et 2021 de la région Algéroise. ....  | 46 |
| Figure III. 3 : Evolution des classes d'occupation du sol de la bande 30 km de 1984 à 2021. ....   | 47 |
| Figure III. 4 : Cartes d'occupation du sol de 1984, 2001 et 2021 de la côte Algéroise.....   | 48 |
| Figure IV. 1 : Emprise et maillage du modèle côtier de la baie de Bou Ismail.....  | 62 |

|   |    |
|---|----|
| Figure IV. 2 : Carte bathymétrique de la baie de Bou Ismail.....                                      | 62 |
| Figure IV. 3 : Emprise et maillage du modèle côtier de la baie d'Alger.....                           | 63 |
| Figure IV. 4 : Carte bathymétrique de la baie d'Alger.....  | 64 |
| Figure IV. 5 : Emprise et maillage du modèle côtier de ma baie de Zemmouri.....                       | 65 |
| Figure IV. 6 : Carte bathymétrique de la baie de Zemmouri.....  | 65 |
| Figure IV. 7 : Champs de houles (MWD=45°) dans la baie de Bou Ismail.....                             | 68 |
| Figure IV. 8 : Propagation des houles de direction Nord-Ouest (360°).....                             | 69 |
| Figure IV. 9 : Champs de houles (MWD=315°) de la baie de Bou Ismail.....                              | 69 |
| Figure IV. 10 : Champs de houles (MWD=45°) dans la d'Alger.....                                       | 70 |
| Figure IV. 11 : Champs de houles (MWD=360°) dans la baie d'Alger.....                                 | 71 |
| Figure IV. 12 : Champs de houles (MWD=315°) sur la baie d'Alger.....                                  | 72 |
| Figure IV. 13 : Champs de houles (MWD=45°) dans la baie de Zemmouri.....                              | 72 |
| Figure IV. 14 : Champs de houles (MWD=360°) dans la baie de Zemmouri.....                             | 74 |
| Figure IV. 15 : Champs de houles (MWD=315°) dans la baie de Zemmouri.....                             | 75 |
| Figure IV. 16 : Champs de courants dans la baie de Bou Ismail pour : MWD=45°.....                     | 76 |
| Figure IV. 17 : Champs des courants dans la baie de Bou Ismail pour : MWD=360°.....                   | 76 |
| Figure IV. 18 : Champs des courants dans la baie de Bou Ismail pou : MWD=315°.....                    | 77 |
| Figure IV. 19 : Champs des courants dans la baie d'Alger pour : MWD=45°.....                          | 78 |
| Figure IV. 20 : Champs des courants dans la baie d'Alger pour : MWD=360°.....                         | 78 |
| Figure IV. 21 : Champs des courants sur la baie d'Alger pour : MWD=315°.....                          | 79 |
| Figure IV. 22 : Champs des courants dans la baie de Zemmouri pou : MWD=45°.....                       | 80 |
| Figure IV. 23 : Champs des courant dans la baie de Zemmouri pour : MWD=315°.....                      | 81 |
| Figure IV. 24 : Champs des courants dans la baie de Zemmouri pou : MWD=360°.....                      | 81 |
| Figure IV. 25 : Dynamique sédimentaire sur la baie de Bou Ismail pour : MWD=45°.....                  | 83 |
| Figure IV. 26 : Dynamique sédimentaire dans la baie de Bou Ismail pour : MWD=360°.....                | 83 |
| Figure IV. 27 : Dynamique sédimentaire dans la baie de Bou Ismail pour : MWD=315°.....                | 84 |
| Figure IV. 28 : Dynamique sédimentaire sur la baie d'Alger pour : MWD=45°.....                        | 85 |
| Figure IV. 29 : Dynamique sédimentaire sur la partie Est de la baie d'Alger pour : MWD=45°.....       | 85 |
| Figure IV. 30 : Dynamique sédimentaire sur la partie Ouest de la baie d'Alger pour :<br>MWD=45°.....  | 86 |
| Figure IV. 31 : Dynamique sédimentaire sur la baie d'Alger pou ; MWD=360°.....                        | 86 |
| Figure IV. 32 : Dynamique sédimentaire sur la partie Est de la baie d'Alger pour :<br>MWD=360°.....   | 86 |
| Figure IV. 33 : Dynamique sédimentaire sur la partie Ouest de la baie d'Alger pour :<br>MWD=360°..... | 87 |
| Figure IV. 34 : Dynamique sédimentaire sur la baie d'Alger pour : MWD=315°.....                       | 87 |
| Figure IV. 35 : Dynamique sédimentaire sur la partie Est de la baie d'Alger pour :<br>MWD=315°.....   | 87 |
| Figure IV. 36 : Dynamique sédimentaire sur la partie Ouest de la baie d'Alger pour :<br>MWD=315°..... | 88 |
| Figure IV. 37 : Dynamique sédimentaire dans la baie de Zemmouri pou : MWD=45°.....                    | 89 |
| Figure IV. 38 : Dynamique sédimentaire dans la baie de Zemmouri pou : MWD=360°.....                   | 89 |
| Figure IV. 39 : Dynamique sédimentaire dans la baie de Zemmouri : MWD=315°.....                       | 90 |

|  |     |
|--|-----|
| Figure V. 1 : Un exemple de calcul du taux de régression linéaire (LRR) en utilisant les rivages de 1984 et 2021 dans la zone d'étude.....   | 95  |
| Figure V. 2 : Organigramme de l'algorithme du Digital Shoreline Analysis System (DSAS v.5.0).....  | 95  |
| Figure V. 3 : Les étapes d'extraction du trait de côte pour l'année 2017. a) bande 5 de l'image Landsat. b) l'image binaire résultant de la condition. c) l'image polygonale résultant de la conversion d'une image binaire. ....  | 97  |
| Figure V. 4 : Le trait de côte de 2017 extrait par la technique de la bande proche infrarouge.   | 97  |
| Figure V. 5 : a) représente les étapes d'extraction du trait de côte à l'aide du NDWI pour l'image satellite originale de 2017. b) montre l'image satellite après application de l'équation du module NDWI. c) l'image binaire utilisée pour extraire le trait de côte. d) l'image raster produite. e) le polygone extrait du raster. f) le trait de côte vectorisé final. ....  | 98  |
| Figure V. 6 : Les étapes d'extraction du trait de côte 2017 par la technique NDVI-TCT.....   | 99  |
| Figure V. 7 : Procédure de validation entre le littoral numérisé à partir de l'image satellite Pléiades à haute résolution (0.5 m) de 2017 et le littoral détecté par imagerie en 2017 ; (a, a <sub>1</sub> ) NRMSE et R <sup>2</sup> de NDVI-Tasseled Cap ; (b, b <sub>1</sub> ) NRMSE et R <sup>2</sup> de NDWI ; (c, c <sub>1</sub> ) NRMSE et R <sup>2</sup> de bande 5 pour la baie de Bou Ismail. ....   | 102 |
| Figure V. 8 : Procédure de validation entre le trait de côte numérisé à partir de l'image satellite Pléiades à haute résolution (0.5 m) de 2017 et le trait de côte détecté par imagerie en 2017 ; (a <sub>1</sub> , a <sub>1</sub> ) NRMSE et R <sup>2</sup> de NDVI-Tasseled Cap ; (b, b <sub>1</sub> ) NRMSE et R <sup>2</sup> de NDWI ; (c, c <sub>1</sub> ) NRMSE et R <sup>2</sup> de bande 5 pour la baie d'Alger.....  | 103 |
| Figure V. 9 : Procédure de validation entre le littoral numérisé à partir de l'image satellite Pléiades à haute résolution (0.5 m) de 2017 et le littoral détecté par imagerie en 2017 ; (a, a <sub>1</sub> ) NRMSE et R <sup>2</sup> de NDVI-Tasseled Cap ; (b, b <sub>1</sub> ) NRMSE et R <sup>2</sup> de NDWI ; (c, c <sub>1</sub> ) NRMSE et R <sup>2</sup> de bande 5 pour la baie de Zemmouri. ....   | 104 |
| Figure V. 10 : Taux de changement du trait de côte des plages de la baie de Bou Ismail de 1984 à 2021 calculé par la méthode du Taux de Régression Linéaire (LRR).....   | 107 |
| Figure V. 11 : Taux de changement du trait de côte des plages de la baie d'Alger de 1984..   | 108 |
| Figure V. 12 : Taux de changement du trait de côte des plages de la baie de Zemmouri de 1984 à 2021, calculé par la méthode du Taux de Régression Linéaire (LRR).....  | 109 |
| Figure V. 13 : Représentation graphique de la modification à court terme du trait de côte le long de la côte Algéroise par la méthode EPR.....   | 114 |
| Figure V. 14 : Phase cycliques d'accrétion- érosion et modifications périodiques du littoral Algérois. ....  | 119 |
| Figure V. 15 : (a-c) Extraction de sable sur la plage de la baie de Zemmouri Est. (d-e) Erosion de la plage de la baie de Zemmouri Est. (f) Dégradation des dunes de sable de la baie de Zemmouri Est. (g) Rechargement de la plage dans la baie d'Alger (photo de Djerrai N.E). (h) Construction d'un épi sur la plage de sable doré de la baie de Bou Ismail.....  | 120 |
| Figure V. 16 : (a) Installation de géotubes dans la baie d'El Djamilia. (b) Epis et brise-lames le long des plages de la baie de Bou Ismail. (c) Epis et brise-lames le long de la baie d'Alger. (d) Baie de Bou Ismail (section Sidi Fredj Ouest) avant la tempête de 2007. (e) Construction de brise-lames et d'un épi dans la baie de Bou Ismail (section Sidi Fredj Ouest) après la tempête de 2007. (f) Baie d'Alger Est avant la tempête de 2007. (g) Construction de brise-lames et d'un épi dans la baie d'Alger Est après la tempête de 2007..... | 121 |

|  |     |
|--|-----|
| Figure VI. 1 : Shéma du risque (aléa+vulnérabilité= risque) en lien avec l'érosion côtière (à gauche) et l'inondation côtière (à droite) (Conseil du Saint-Laurent. 2017). | 124 |
| Figure VI. 2 : Représentaion de méthode POT sur les hauteurs de la houle de 1992-2021 pour la baie de Bou Ismail.  | 128 |
| Figure VI. 3 : Représentation de la méthode POT sur les hauteurs de houles entre 1992-2021 pour la baie de baie d'Alger.   | 129 |
| Figure VI. 4 : Représentation de POT sur les hauteurs de 1992-2021 pour la baie de Zemmouri.   | 129 |
| Figure VI. 5 : MNT à 2 m de résolution de la zone d'étude.   | 133 |
| Figure VI. 6 : Les zones d'inondation selon le scénario de base et scénario extrême dans la baie de Bou Ismail.  | 134 |
| Figure VI. 7 : Les zones d'inondation selon le scénario de base et scénario extrême dans la baie d'Alger.  | 134 |
| Figure VI. 8 : Les zones d'inondation selon le scénario de base et scénario extrême dans la baie de Zemmouri.  | 135 |
| Figure VI. 9 : L'impact de la submersion marine sur les zones de la baie de Bou Ismail selon le scénario 01.   | 136 |
| Figure VI. 10 : L'impact de la submersion marine sur les zones de la baie d'Alger selon scénario 01.   | 137 |
| Figure VI. 11 : L'impact de la submersion marine sur les zones de la baie de Zemmouri selon scénario 01.   | 137 |
| Figure VI. 12 : L'impact de la submersion marine sur les zones de la baie de Bou Ismail selon scénario 01.   | 140 |
| Figure VI. 13 : L'impact de lasubmersion marine sur les de la baie d'Alger selon scénario 02.  | 141 |
| Figure VI. 14 : L'impact de la submersion marine sur les zones de la baie de Zemmouri selon scénario 02.   | 142 |

## Liste des tableaux

|   |     |
|---|-----|
| Tableau II. 1 : Liste des plages de la baie de Bou Ismail.....  | 23  |
| Tableau II. 2 : Liste des plages de la baie d'Alger.....  | 25  |
| Tableau II. 3 : Liste des plages de la baie de Zemmouri.....  | 26  |
| Tableau II. 4 : Les principaux barages dans la région Algéroise (Wikipédia, 2022).....  | 32  |
| Tableau III. 1: Dates d'acquisition et caractéristiques des données images utilisées.....   | 42  |
| Tableau III. 2 : Matrice de confusion relative à la carte d'occupation du sol de la région Algéroise de 1984.....   | 44  |
| Tableau III. 3 : Matrice de confusion relative à la carte d'occupation du sol de la région Algéroise de 2001.....   | 44  |
| Tableau III. 4 : Matrice de confusion relative à la carte d'occupation du sol de la région Algéroise de 2021.....   | 44  |
| Tableau III. 5 : Evolution des occupations du sol dans la bande de 30 km entre 1984 et 2021 dans la région Algéroise.....   | 47  |
| Tableau III. 6 : Evolution des occupations du sol dans la bande de 3 km entre 1984 et 2021 dans la région Algéroise.....  | 48  |
| Tableau IV. 1 : Les caractéristiques des houles incidentes (hauteur, période, direction) (Source www.waveclimate.com). 66   | 66  |
| Tableau IV. 2 : Sortants du modèle SW.....  | 67  |
| Tableau V. 1 : L'ensemble des satellitaires utilisées dans cette étude. 93  | 93  |
| Il est important de souligner que l'erreur saisonnière a été prise en compte dans les calculs de l'incertitude totale pour les périodes (2007-2013, 2007-2013 et 2013-2021) car les images (2007, 2013 et 2021) sont sélectionnées à des saisons différentes. En revanche, pour les périodes (1984-1989, 1989-1994, 1994-1999), l'erreur saisonnière est négligée car ce sont les images qui ont été sélectionnées pendant la période estivale. |     |
| Tableau V. 2 :.....   | 105 |
| Tableau V. 3 : Résumé des taux d'évolution du trait de côte à long terme calculés pour différentes zones.....   | 110 |
| Tableau V. 4 : Résumé des taux d'évolution du trait de côte à court terme calculés pour différentes zones.....  | 115 |
| Tableau VI.1 : Projection globales (m) de l'élévation du niveau de la mer de la période 2030-2100. 125  | 125 |
| Tableau VI. 2 : Tableau montrant les résultats obtenus par la méthode POT pour la baie de Bou Ismail. ....  | 130 |
| Tableau VI.3 : Tableau montrant les résultats obtenus par la méthode POT pour la baie d'Alger. ....   | 130 |
| Tableau VI.4 : Tableau montrant les résultats obtenus par la méthode POT pour la baie de Zemmouri. ....   | 130 |
| Tableau VI.5 : Hauteurs significatives des houles associées à des périodes de retour à la zone de déferlement pour les trois sites d'étude.....   | 131 |
| Tableau VI.6 : Niveaux d'inondation à l'horizon 2030 et 2100.....   | 132 |
| Tableau VI.7 : Scénarios de submersion marine à l'horizon 2030, 2050 et 2100. ....  | 132 |

# **Introduction générale**

Le littoral est défini comme étant l'interface entre la terre, la mer et l'atmosphère ; il est soumis aux différents processus physiques qui animent ces trois milieux. Ces processus font du littoral l'un des systèmes physiques les plus dynamiques de la planète (Crapoulet, 2015). En raison de la nature non cohésive de leurs matériaux et de l'action des forçages hydrodynamiques, les côtes sableuses peuvent présenter des structures s'étendant sur une large gamme d'échelles spatiales, allant de simples rides décimétriques (Gallagher et al., 1998) à des flèches sableuses qui peuvent atteindre plusieurs centaines de kilomètres de long (M. J. Stive et al., 2002).

Les zones côtières ont toujours attiré les hommes en raison de la grande variété de leurs paysages et de leur biologie, ainsi que des nombreuses activités humaines (tourisme, industrie, commerce, transport et agriculture) (Mezouar et al., 2009).

Bien que les côtes basses ne représentent que 2,3 % de la superficie des pays côtiers, l'urbanisation ne cesse de croître (plus de 60 % de la population mondiale vit à moins de 60 km des côtes). Selon différents scénarios de croissance de la population mondiale à l'horizon 2060, le nombre de personnes vivant dans ces zones côtières basses densément peuplées pourrait atteindre entre 1 milliard et 1,4 milliard, avec des densités respectives de 405 habitants/km<sup>2</sup> et 534 habitants/km<sup>2</sup>. Cette forte croissance démographique des zones côtières ne sera pas la même sur tous les continents. En effet, et bien qu'ayant déjà les densités les plus élevées, les côtes asiatiques et africaines seront les plus touchées par cette expansion démographique (Crapoulet, 2015). D'ici la fin du siècle, les deux tiers de la population des pays en développement vivront dans les zones côtières (KourosNiya et al., 2013). Dans les pays en développement comme l'Algérie, le littoral algérois, le plus peuplé du pays, a connu une intense croissance urbaine, des infrastructures et des activités humaines (tourisme, agriculture, pêche) ("EgisEau/ Iau-Idf/ BRGM .;2013), rendant l'environnement côtier de plus en plus vulnérable aux risques tels que l'érosion, les inondations, les submersions marines, réduction de la surface des plages et des dommages à divers équipements urbains.

L'évolution du trait de côte est un phénomène naturel généré par la conjonction d'un certain nombre de processus dynamiques (marins, continentaux et biologiques) et dépendant des caractéristiques géomorphologiques des systèmes côtiers (les plages sont plus sensibles à l'érosion, la vitesse de recul des plages dépend de la nature du substrat littoral) et des facteurs hydrodynamiques (vent, vague et houle, courant, marée...) (Reeve et al., 2019; Zhang and Hou, 2020). Mais ces phénomènes naturels sont exacerbés par les actions humaines qui perturbent l'équilibre dynamique des environnements côtiers (Hellequin et al., 2013). Néanmoins, la pression anthropique causée par la construction d'infrastructures le long des côtes est un facteur important à prendre en compte dans les processus d'érosion. Paradoxalement, certaines de ces infrastructures sont construites pour protéger les plages, mais leur application tend parfois à intensifier le problème ou à le déplacer à un autre endroit, en général lorsque les processus côtiers n'ont pas été bien étudiés ou lorsque les infrastructures ne sont pas bien gérées (Gallien et al., 2015; Rangel-Buitrago et al., 2015).

Des études antérieures ont montré que les changements climatiques des vagues liés aux changements climatiques à grande échelle sont associés à des changements à l'échelle de temps

interannuelle dans la position du littoral sableux et plus précisément des baies de la mer généralement avec la variation du niveau de la mer. A des échelles de temps intermédiaires (années-décennies), ce forçage hydrodynamique interagit directement avec la morphologie du trait de côte (orientation de la côte, variation de la bathymétrie), l'apport de sédiments et la géologie pour contrôler le comportement du trait de côte (Houser et al., 2008; M. J. F. Stive et al., 2002).

Le développement urbain et l'évolution de la dynamique sédimentaire sont des facteurs clés de l'évolution du littoral nord-africain (Amrouni, 2019). Les côtes du monde entier sont touchées par l'érosion. Luijendijk et al. (2018) estime qu'entre 1984 et 2016, 24% des plages du monde ont été érodées globalement avec un taux d'érosion estimé à plus de  $-0,5\text{m/an}$ . Le même auteur (Luijendijk et al., 2018) précise qu'en Afrique, le taux d'érosion net est de  $-0,07\text{m/an}$ . L'Algérie ne fait pas exception à cette tendance. L'érosion des côtes sableuses algériennes varie de  $-0,3\text{m/an}$  à  $-10,4\text{m/an}$  (Larid, 2002). Cette érosion entraîne des impacts écologiques, économiques et sociaux (Colas S, 2007; Rigoni m, 2003).

Dans les régions côtières urbanisées de l'Algérie, les plages de sable présentent une variété de taux observés de recul du trait de côte, provenant du déséquilibre de sédimentation qui fluctue avec les variations des régimes de précipitations et de l'obstruction du flux et du transport des sédiments vers le rivage par des obstacles artificiels.

Par conséquent, la compréhension des origines et de l'ampleur du recul du littoral le long de la côte nord-africaine est d'une grande importance pour quantifier l'évolution environnementale des zones urbaines très denses, en particulier dans les régions semi-arides où de tels phénomènes sont peu observés, et encore moins compris (Amrouni, 2019). Les vastes côtes sableuses de l'Algérie offrent une occasion unique de remédier à cette lacune car elles présentent plusieurs impacts mesurables qui se manifestent tous par la régression anormale du littoral avec un degré de vulnérabilité qui augmente considérablement.

Le littoral algérien, soit 1764 km de côtes, n'est pas à l'abri du phénomène d'érosion. Ce phénomène a été étudié par plusieurs auteurs (Ayadi et al., 2015; Bouakline, 2009; Boutiba and Bouakline, 2011; BOUTIBA et al., 2006; Kermani et al., 2016; Sallaye M, 2021). La côte Algéroise est un site particulièrement intéressant et remarquable, plus par son contexte géographique que par la pression anthropique qui s'y exerce, exprimée à travers un ensemble de constructions diverses d'infrastructures touristiques et industrielles. Cette côte, qui s'étend sur environ 200 km, est constituée en grande partie de plages de sable qui n'échappent pas à cette évolution régressive.

Dans la zone côtière algéroise, les plages de sable et les dunes littorales occupent une place importante, malgré une extension considérable des espaces urbains, des villages touristiques et des stations balnéaires tels que Sidi Fredj, Moretti, Club des Pins, des ports et des pêcheries, un tourisme de santé et de soins (Thalassothérapie) ont été installés le long de la bande côtière. Le développement de ces infrastructures portuaires et touristiques a perturbé la dynamique sédimentaire naturelle, provoquant ou accentuant l'érosion du trait de côte.

La télédétection et les systèmes d'information géographique (SIG) ont été largement utilisés pour détecter les changements de position du littoral. Par exemple, Nazeer et al. (2020), ont utilisé des images satellites pour la détection des modifications du littoral et de l'occupation des sols. Quadrado et al. (2021), ont utilisé des images satellite et le DSAS pour l'évaluation historique et géologique des modifications du littoral. En algérie, les images satellitaires et les photographies aériennes sont utilisées comme une source de données importante pour l'extraction manuelle du trait de côte et les changements dans la position du trait de côte dus à l'accrétion et à l'érosion (Kermani et al., 2016 ; Otmani et al., 2020 ; Sallaye, 2021). Cependant, ces études sont limitées à une petite échelle, la présence de photos aériennes est limitée à quelques années et ne couvre pas une grande surface, de plus, elles sont coûteuses. En revanche, l'image satellite Landsat de l'USGS est une source de données précieuse, disponible et gratuite. Elle permet de déterminer et d'analyser la position du trait de côte à différentes échelles de temps et couvre une large zone (Boukhennaf and Mezouar, 2023).

L'objectif principal de cette recherche est d'analyser les variations à long et à court terme du trait de côte le long du littoral algérois. Un autre objectif majeur de ce travail doctoral sera d'évaluer les principaux facteurs naturels et anthropiques contrôlant les variations du littoral algérois. Enfin, évaluer les zones les plus exposées aux risques côtiers, ce qui peut aider les décideurs et les gestionnaires du littoral à élaborer des stratégies d'adaptation et des plans de gestion dans un avenir proche.

### **Organisation du travail**

Cette thèse de doctorat est divisée en six chapitres :

**Le Chapitre I :** vise à étudier les différentes composantes du système côtier afin de mieux comprendre les processus et les facteurs d'influence qui régissent le système côtier.

**Le Chapitre II :** présentera brièvement les différentes caractéristiques géomorphologiques, hydrodynamiques et climatiques qui définissent le littoral de la Côte algéroise.

**Le Chapitre III :** ce chapitre est consacré à l'étude de la dynamique de l'occupation des sols à l'aide de données satellitaires multitudes.

**Le Chapitre IV :** consiste à étudier l'hydrodynamisme côtier et le transport sédimentaire à l'aide du logiciel MIKE 21 afin de comprendre le fonctionnement hydrosédimentaire du littoral Algérois.

**Le Chapitre V :** détaillera la mobilité du trait de côte le long du littoral algérois de 1984 à 2021 à l'aide d'images satellites Landsat et discutera des principaux facteurs qui contrôlent les changements du trait de côte.

**Le chapitre VI :** proposera une cartographie des risques de submersion marine et identifiera les zones les plus vulnérables aux risques côtiers, en tenant compte de l'élévation du niveau de la mer liée au changement climatique.

# **Chapitre I : Généralités**

### I. 1 Le système littoral :

Le terme "littoral" englobe de nombreuses définitions, concepts et délimitations différents. La définition du littoral change en fonction de la discipline pratiquée, de la prise en compte des usages du territoire côtier, voire de l'expérience personnelle du scientifique (Daeden, 2015).

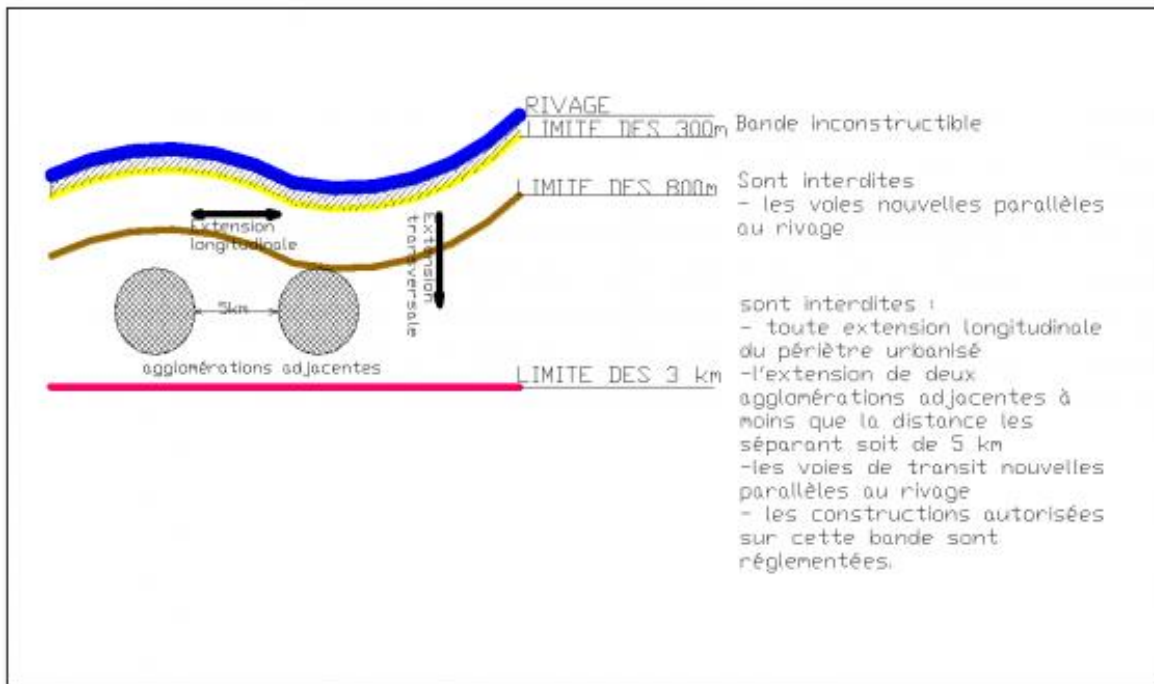
Le littoral est défini comme la zone de contact entre la terre et la mer. Les zones côtières étant plus complexes et ayant des limites distinctes (eau douce, eau salée) sont donc définies comme étant *"l'espace dans lequel les environnements terrestres influencent les environnements marins et vice-versa"* (Carter, 1988).

Il existe de nombreuses définitions de la côte, Néanmoins, deux éléments majeurs sont indispensables : les sédiments et les vagues. Short A.D (1999) définit la zone littorale comme étant *"Toute accumulation de sédiments par la houle entre la base de l'action des vagues sur le fond -modal wave base- et la limite supérieure de la zone de swash, où la base de la vague est la profondeur maximale à partir de laquelle les vagues peuvent transporter les matériaux de la plage vers le littoral et la limite supérieure de la zone de swash est marquée par la limite supérieure du haut de plage aérienne atteinte lors des hautes marées et par le transport sédimentaire"*. Selon Martínez et al. (2007) *" Le littoral couvre l'ensemble des interactions terre-mer sur de larges échelles au-delà du seul point limite où l'eau et la terre se rencontrent physiquement"*.

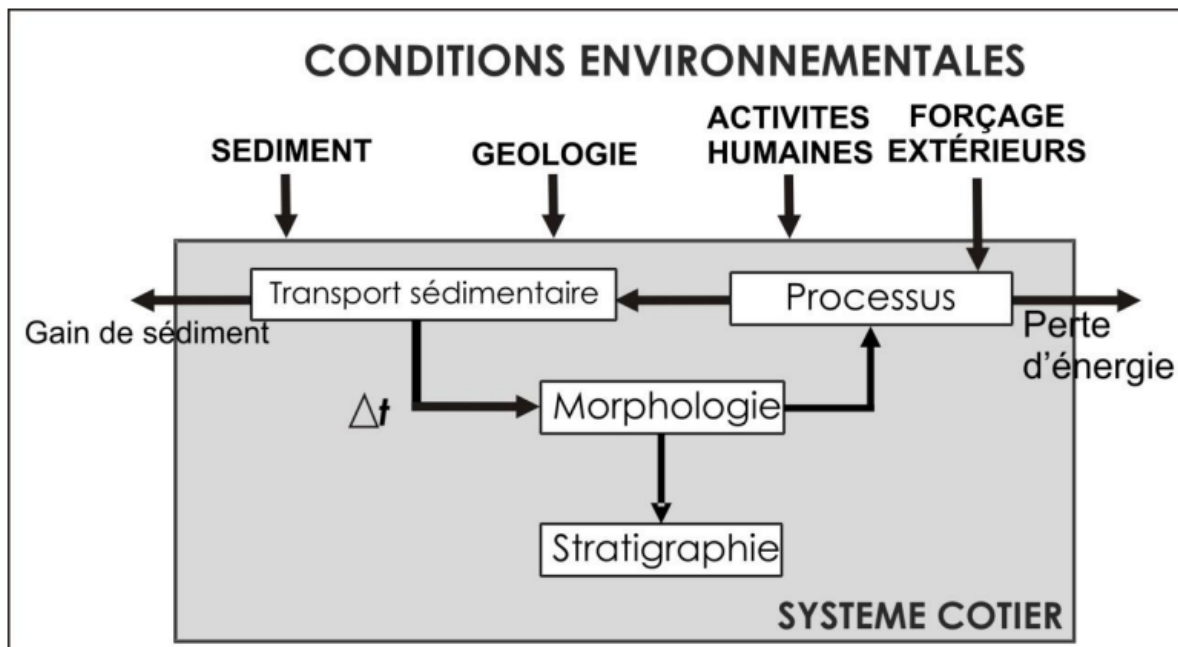
D'un point de vue juridique en Algérie, le littoral est défini par l'article 7 de la loi 02/02 du 5 février 2002 comme suit *" le littoral englobe l'ensemble des îles et des îlots, le plateau continental ainsi qu'une bande de terre d'une largeur minimale de huit cents mètre (800 m) longeant la mer et incluant : - les versants de collines et montagnes, visibles de la mer et n'étant pas séparés du rivage par une plaine littorale ; - les plaines littorales de moins de trois kilomètres (3 km) de profondeur à partir des plus hautes eaux maritimes ; -l'intégralité des massifs forestiers ; - les terres à vocation agricole ; -l'intégralités des zones humides et leurs rivages dont une partie se situe dans le littoral à partir des plus hautes eaux maritimes tel que défini ci-dessus ; - les sites présentant un caractère paysager, culturel ou historique"*.

### I.2 Système morphodynamique :

Un système morphodynamique est formé d'un objet géomorphologique qui réagit aux variations d'une composante dynamique par un ajustement morphologique. L'évolution morphodynamique des systèmes côtiers est appelée évolution progressive, définie par une série d'états morphologiques (Wright and Thom, 1977). L'évolution morphodynamique est directement liée aux échelles spatio-temporelles impliquées dans la morphologie de la zone côtière (figure I.3).



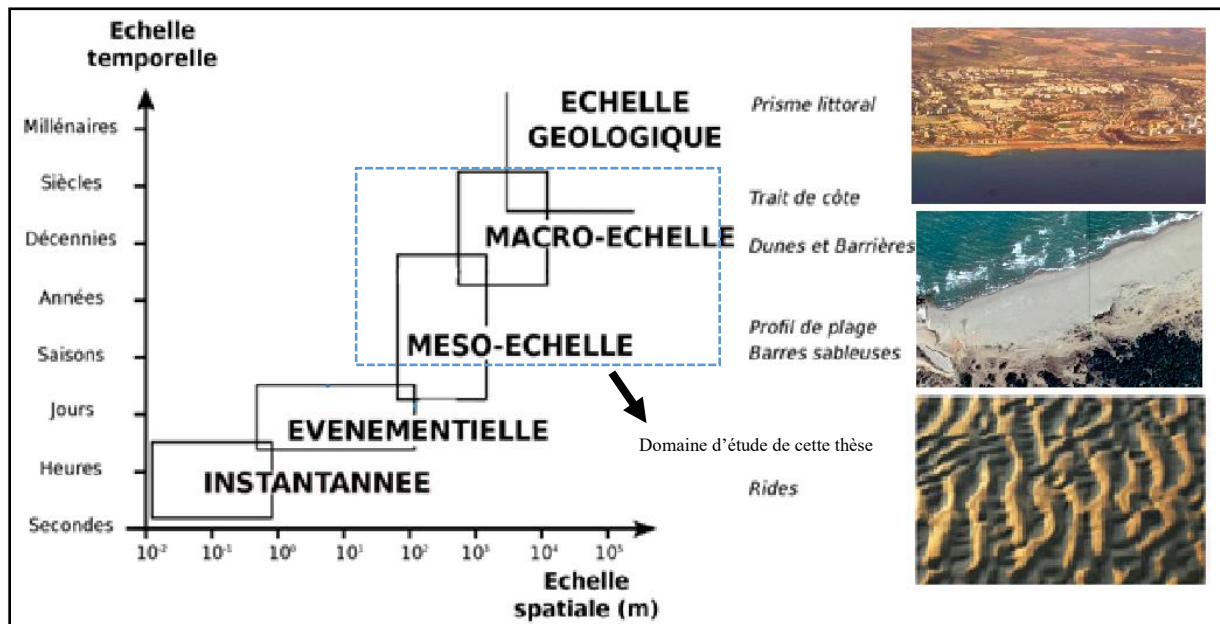
**Figure I. 1:** Détermination de la bande littorale conformément à la loi 02-02 du 05-02-2002(Kacemi, 2013).



**Figure I.2 :** Principaux objets intégrés dans l'approche du système morphodynamique (Cowell and Thom, 1994).

### I.3 Découpage spatio-temporel de l'évolution des composantes du système littoral :

L'analyse morphodynamique sédimentaire d'un système côtier impose une approche primordiale basée sur la délimitation des échelles spatiales et temporelles considérées. De nombreux auteurs ont présenté des découpages qui établissent une relation entre le temps nécessaire au système étudié pour aboutir à l'équilibre et leurs tailles. Nous adoptons le modèle de découpage proposé par (Dubarbier, 2014) (figure I.3).



**Figure I. 3 :** Relation spatio-temporelles des systèmes morphodynamiques littoraux (Dubarbier, 2014 modifié).

Notre zone d'étude comprend à la fois des côtes sableuses et des côtes rocheuses. Notre objectif, dans cette thèse, est de suivre l'évolution du trait de côte dans les côtes sableuses et les principaux facteurs qui contrôlent l'évolution du trait de côte.

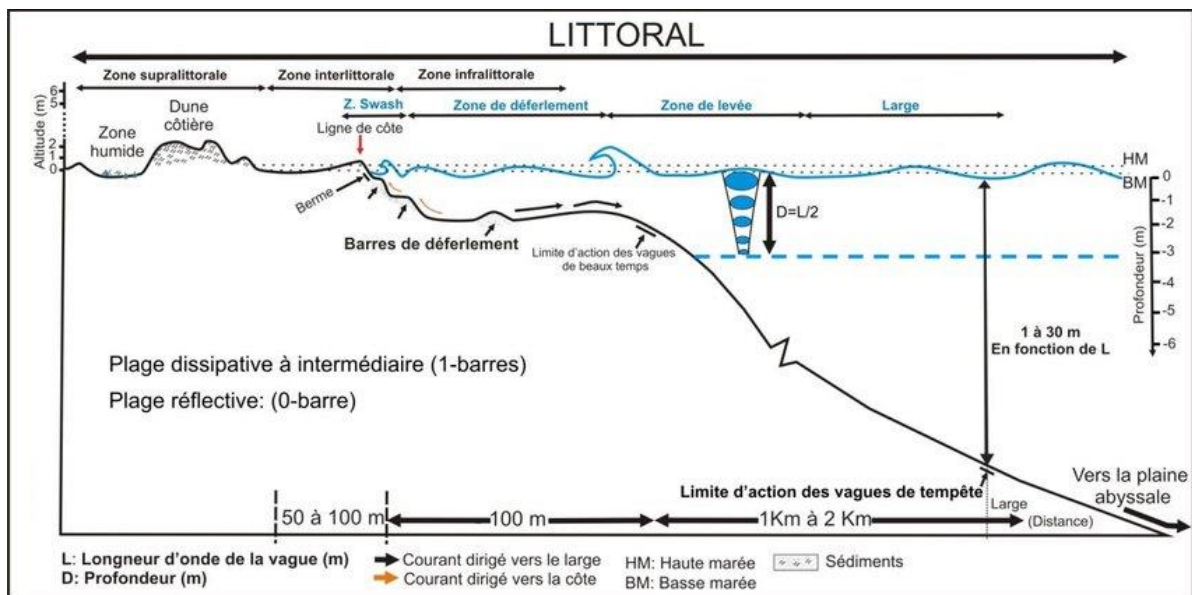
### I.4 Hydrodynamique des plages :

Le milieu littoral est un environnement complexe où de nombreuses interactions se produisent entre les agents dynamiques responsables des circulations hydrodynamiques. La figure I.5 montre les principales zones qui peuvent être définies en fonction des paramètres de forçage. On distingue :

- La zone du large (offshore zone) : au large, les vagues ne subissent aucune transformation liée à la topographie du fond car la profondeur de l'eau est très importante.
- La zone de levée (shoalingwave zone) : cette zone se caractérise par une augmentation de l'amplitude des vagues et une diminution de la longueur d'onde.
- La zone de déferlement (zone de surf) : la zone de déferlement est la partie la plus dynamique de la plage et s'étend de la zone de déferlement au rivage. Les vagues

déferlent une fois que la profondeur de l'eau est égale à environ 1,5 fois la hauteur de la vague. Elles peuvent se briser sous la forme d'un déferlement sur les pentes douces, d'une vague plongeante sur les pentes modérées ou d'une vague déferlante sur les pentes raides. Lorsque les vagues déferlent, elles transforment leur énergie potentielle en énergie cinétique qui se manifeste d'abord sous la forme d'une vague déferlante de translation ou d'une vague de forée qui se déplace vers le rivage sous forme d'eau vive déferlante. Sur le rivage, les courants peuvent être déviés vers la côte et l'eau peut retourner vers la mer sous forme d'un courant d'arrachement (Andrew D. Short, 2012)

- La zone de swash (zone de jet de rive) : cette zone est marquée par l'oscillation périodique d'une mince couche d'eau sur la plage sous la forme d'un jet de rive (uprush ou swash) et de la nappe de retrait (backwash). La périodicité des oscillations est modulée à la fois par la période des vagues déferlantes mais aussi par des ondes infragravitaires qui ont une influence importante sur l'hydrodynamique de cette zone (Butt et Russell and Russell, 2000; Ruessink, 1998).



**Figure I. 4:** Processus hydrodynamiques induits par les vagues incidentes sur un profil de plage microtidal (Davidson-Arnott, 2010).

### I.5 Les agents de la dynamique littorale :

#### I.5.1 La houle :

Les vagues sont générées par le vent soufflant à la surface de la mer. Ils se propagent vers la côte. Ils sont classifiés en quatre domaines (Than, 2015a). Le premier, zone de génération des vagues où l'influence du fond sur les vagues peut être ignorée. La deuxième, zone de propagation libre, où le vent est négligeable ou les vagues se propagent hors de la zone de génération, les vagues continuent à se propager librement et elles deviennent la houle. La troisième, zone de transformation par l'effet du fond où ces vagues sont changées par l'influence du fond. La quatrième, zone de déferlement à la côte où les effets de profondeur jouent un rôle

important. L'interaction entre les houles et les constructions, telles que les brise-lames, les digues, les îles, et les récifs, etc. ... devrait être prise en compte. Les vagues déferlent sur la zone proche de la côte, dès que la profondeur est inférieure à environ 2 fois la hauteur des vagues. Les vagues perdent leur énergie. Elles produisent les courants de dérive littorale ou les courants littoraux. Ces courants et les vagues sont responsables du transport sédimentaire sur les plages.

Les houles sont définies par leur hauteur (H) (creux à crête), leur longueur (L) (crête à crête) et leur période (T) (temps entre crêtes successives). Plus la période est longue, plus les ondes sont longues et rapides car la longueur d'onde  $L = 1,56T^2$  et la vitesse des ondes  $C = 1,56T$ . Lorsque les vagues pénètrent dans les eaux peu profondes, leur vitesse est contrôlée par la profondeur de l'eau (d) de sorte que  $C = \sqrt{gd}$  où g est la constante gravitationnelle. Pour cette raison, les vagues ralentissent lorsqu'elles se dirigent vers le rivage (Andrew D. Short, 2012).

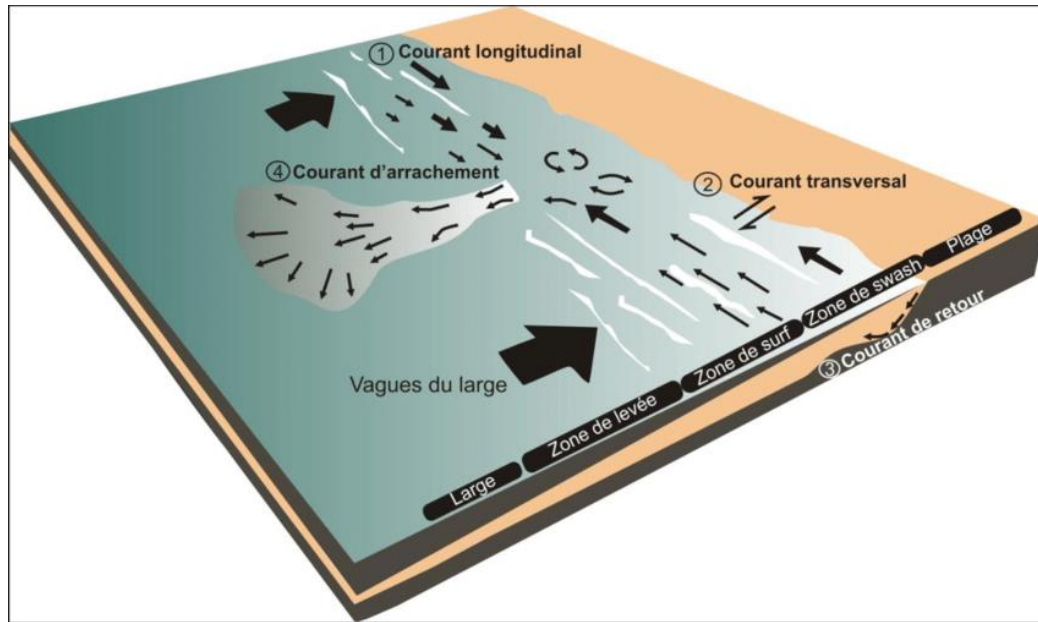
### I.5.2 Les courants côtiers :

Ces courants sont générés près de la côte par les vagues. On distingue le courant de retour (undertow), les courants d'arrachement (rip-currents) et le courant d'obliquité parallèle à la côte, qui sont à l'origine de la dynamique sédimentaire.

- Le courant de retour est un courant de fond dirigé vers le large dans la zone de déferlement. Ce courant génère un transport sédimentaire orienté de la côte vers le large (Dette et al., 2002).
- Les rip-currents (courants sagittaux, ou d'arrachement) sont des courants de retour de faibles largeurs qui s'écoulent vers le large (figure I.5). Ils transportent, particulièrement, de grandes quantités de sédiments vers le large (Inman and Nordstrom, 1971).
- Les courants de dérive (longshore) sont des courants parallèles à la côte induits par le déferlement de vagues obliques par rapport à la côte. Ils sont responsables du transit littoral ou de la dérive littorale. Le courant est maximal dans la zone de déferlement et il décroît en amplitude vers la côte (Komar and Inman, 1970).

### I.5.3 Les marées :

Les marées sont des oscillations périodiques de l'hydrosphère sous l'action conjointe de la lune et du soleil. En tout point de la Terre, elles sont définies par leur amplitude (marnage) et leur état (diurne, semi-diurne). Davies (1964) a répertorié les environnements côtiers en fonction de l'amplitude des marées vives. Elle définit les petits marnages (microtidal < 2 m), les méso marées (mésotidal) entre 2 et 4 m et les grandes marées (macrotidal) supérieurs à 4 m. A la côte microtidale, l'effet des courants de marée est faible.



**Figure I. 5 :** Les différents courants générés par les vagues auprès de la côte (Short, 1999, modifié par Amrouni, 2020).

### I.6 Les classifications morphodynamiques des plages :

La classification présentée par un modèle de Wright and Short. (1984) est basée sur le concept d'équilibre entre les conditions hydrodynamiques (principalement les vagues) et la morphologie des plages. Cette classification indique les conditions qui prévalent dans la zone de surf : dissipative, intermédiaire ou réfléchissante, en fonction du paramètre de vitesse de chute sans dimension ( $\Omega$ ) (eq I.1).

$$\Omega = \frac{H_b}{W_s T} \dots \dots \text{(eq I.1)}$$

Où  $H_b$  est la hauteur de la vague déferlante,  $T$  est la période de pointe de la vague correspondant aux conditions de déferlement et  $W_s$  est la vitesse de chute des sédiments.

Plage dissipative si  $\Omega > 6$ , réfléchissante si  $\Omega < 1$  et intermédiaire dans le cas où  $1 < \Omega < 6$ .

Masselink and Short. (1993) ont proposé de lier deux paramètres affectant la dynamique de la morphologie des plages (Figure I.6) : la vitesse de chute des particules lors du déferlement des vagues ( $\Omega$ ) et la relation entre le marnage et la hauteur des vagues. Les plages ne sont plus classées uniquement selon leur morphologie mais elles le sont aussi selon les processus dominants, toujours associés à des conditions hydrodynamiques. Ainsi, ils ont déterminé que les plages de réflexion sont des plages dominées par les vagues avec une vitesse de chute des particules pratiquement nulle ; par conséquent, les dépôts sédimentaires sont limités. À l'inverse, les plages à dominance de marée et à taux de sédimentation élevé (taux d'enfoncement rapide) sont considérées comme hyperdissipatives.

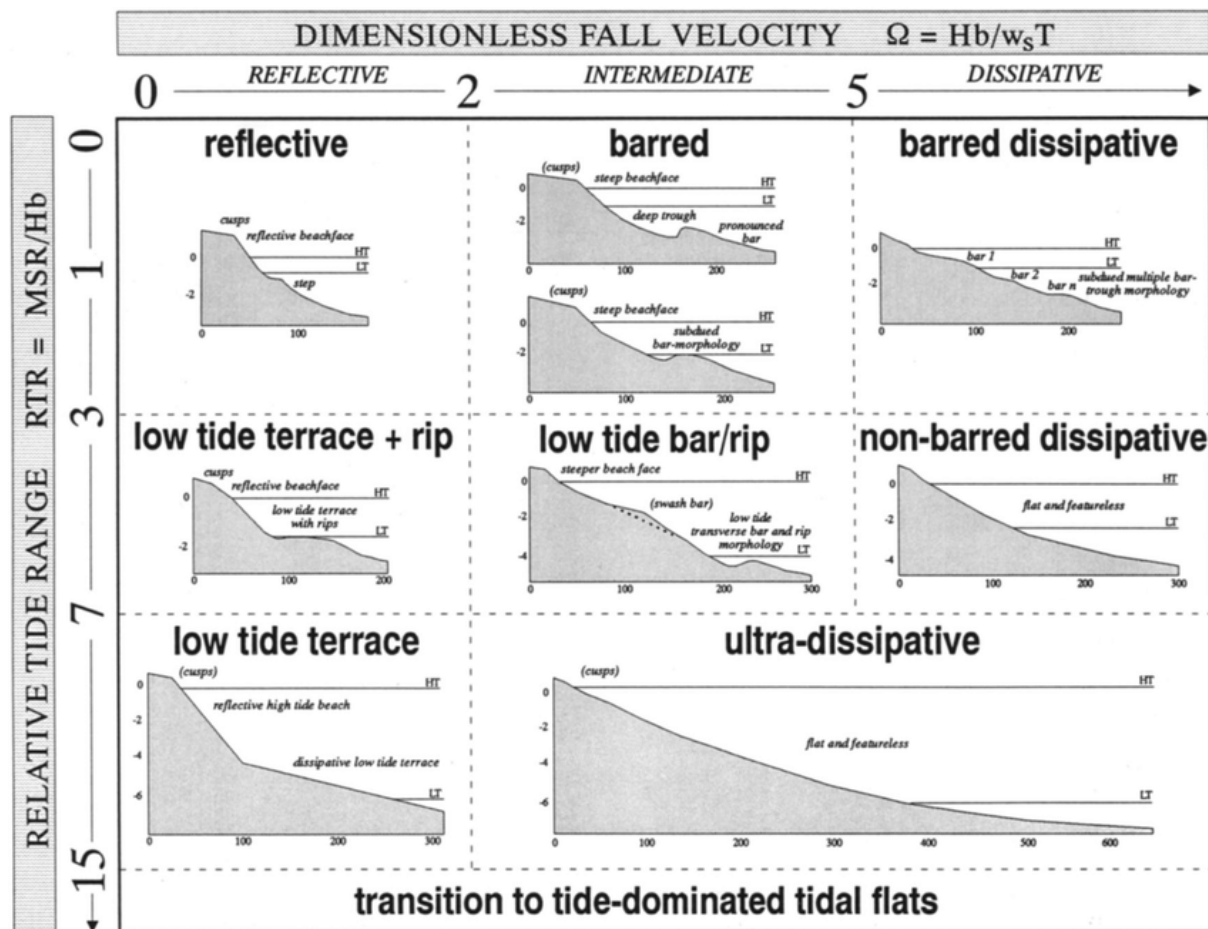


Figure I. 6 : Modèle de classification des plages sableuses selon Masselink and Short (1993).

### I.7 Notions du trait de côte :

Le trait de côte est défini comme étant l'interface physique entre la terre et l'eau. Malgré son apparente simplicité, cette définition est en pratique un véritable défi. En réalité, la position du trait de côte change continuellement au fil du temps, en raison des mouvements de la zone littorale et surtout de la nature dynamique des niveaux d'eau à la limite du littoral (par exemple, les vagues, les marées, les eaux souterraines, les tempêtes). Boak et Turner (2005) présentent une synthèse de 45 indicateurs du trait de côte. La ligne de référence peut être identifiée principalement selon trois types : les lignes géomorphologiques, les lignes botaniques (végétation), les niveaux d'eau.

#### I.7.1 Les lignes de référence géomorphologiques :

Dans le cas des plages bordées de cordons dunaires, trois lignes de référence géomorphologiques sont utilisables : le pied de dune, le haut de la dune et la crête de dune (Figure I.7a). Sur les côtes à falaises ou les plages adossées à des falaises, le haut de falaise et le pied de falaise sont les deux lignes de référence géomorphologiques les plus fréquemment utilisées (Figure I.7b).

Sur la plage aérienne, la crête de la berme est utilisée comme ligne de référence (figure I.7d). Dans la zone subtidale, le pied de la plage est souvent utilisé pour surveiller l'évolution du littoral (figure I.7d).

Sur les rivages artificiels (figure I.7c), avec des structures de défense, on utilise soit la base de la structure, soit le sommet de la pente, soit le sommet du talus.

### **I.7.2 Les lignes botaniques (végétation) :**

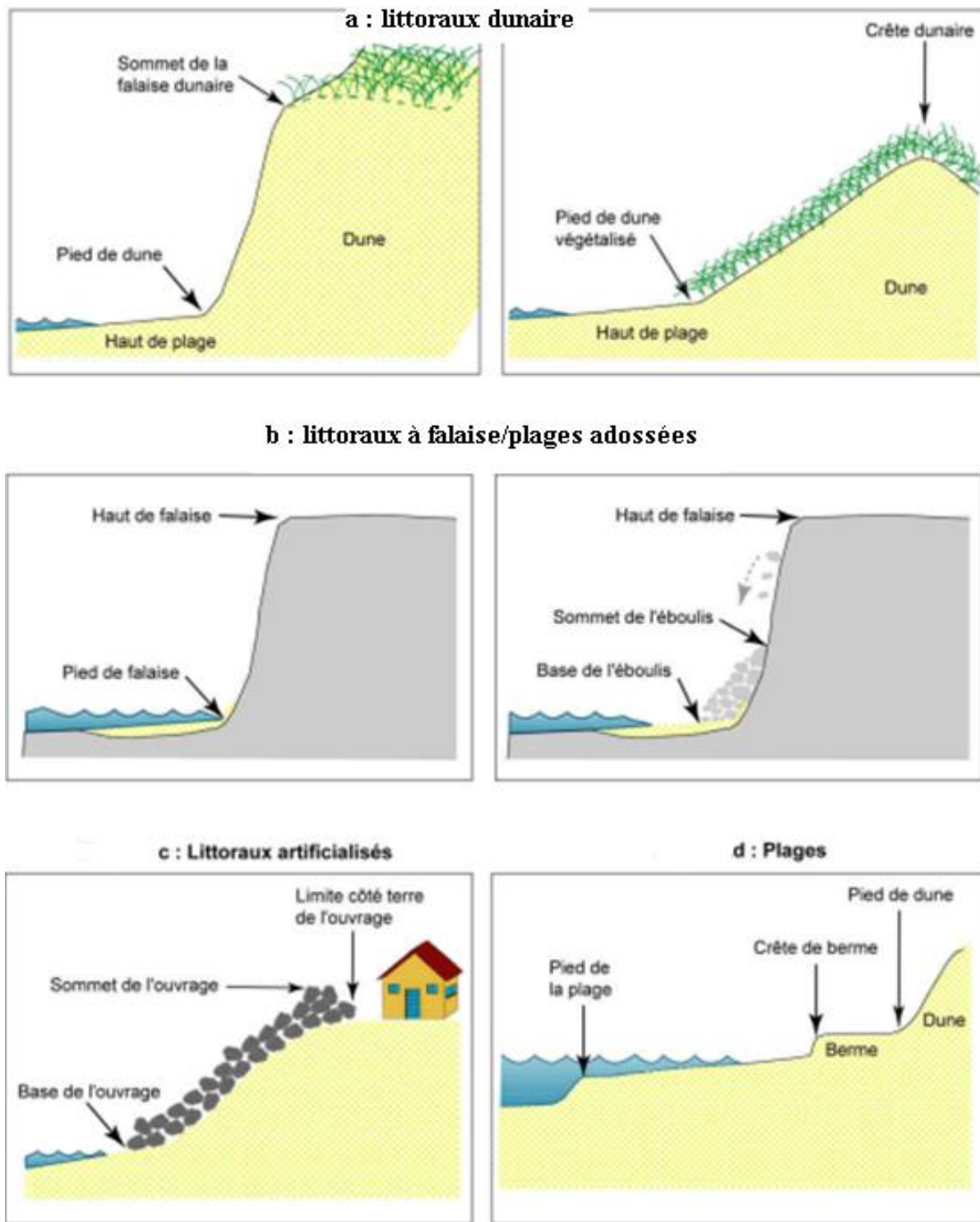
La ligne de côte est référencée soit par la limite de la végétation dunaire (Bird, 1985; Boak and Turner, 2005b), soit par une couverture végétale pérenne (figure I.8).

Dans le cas des côtes à falaise, la ligne de référence correspond à la végétation au sommet de la falaise (Bonnot-Courtois and Levasseur, 2003; Thieler et al., 2001).

### **I.7.3 Les niveaux d'eau :**

On distingue principalement :

- **Les lignes instantanées de rivage et les limites d'humectation :** la position de ces lignes est liée au niveau atteint par la marée sur l'estran. Elles déterminent la limite du jet de rive à un moment donné en rapport avec les conditions météorologiques et l'état de la mer (Dolan et al., 1991; Robertson et al., 2004).
- **Lignes de référence virtuelle :** elle est basée sur le traitement numérique des images orbitales (Boak and Turner, 2005a). Le trait de côte est extrait à l'aide de logiciel SIG (système de l'information géographique) et se traduit par le maximum d'intensité de la ligne de rivage. Ces limites reflètent la position moyenne du trait de côte instantané sur une courte période de temps.
- **I.8 Changements climatiques et élévation du niveau de la mer :**
- **I.8.1 Changements climatiques :**
- Selon le dernier rapport de synthèse du Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) (IPCC, 2023), les activités humaines, principalement à travers les émissions de gaz à effet de serre, ont, sans équivoque, causé le réchauffement de la planète avec une température, à la surface du globe, supérieure de 1,1°C à celle de 1850-1900 en 2011-2020 (Figure I.9).
- Les émissions anthropiques nettes totales de GES ont continué à augmenter au cours de la période 2010-2019, tout comme les émissions nettes cumulées de CO<sub>2</sub> depuis 1850, en conséquence d'une utilisation non durable de l'énergie, de l'utilisation des terres, du changement d'affectation des terres, des modes de vie, des modes de consommation et de production dans les régions, entre les pays et au sein des pays, entre les individus.



**Figure I. 7:** Schéma de quelques exemples de lignes de référence géomorphologiques (Faye, 2010).



Figure I. 8: Représentation graphique de la limite de la végétation pérenne.

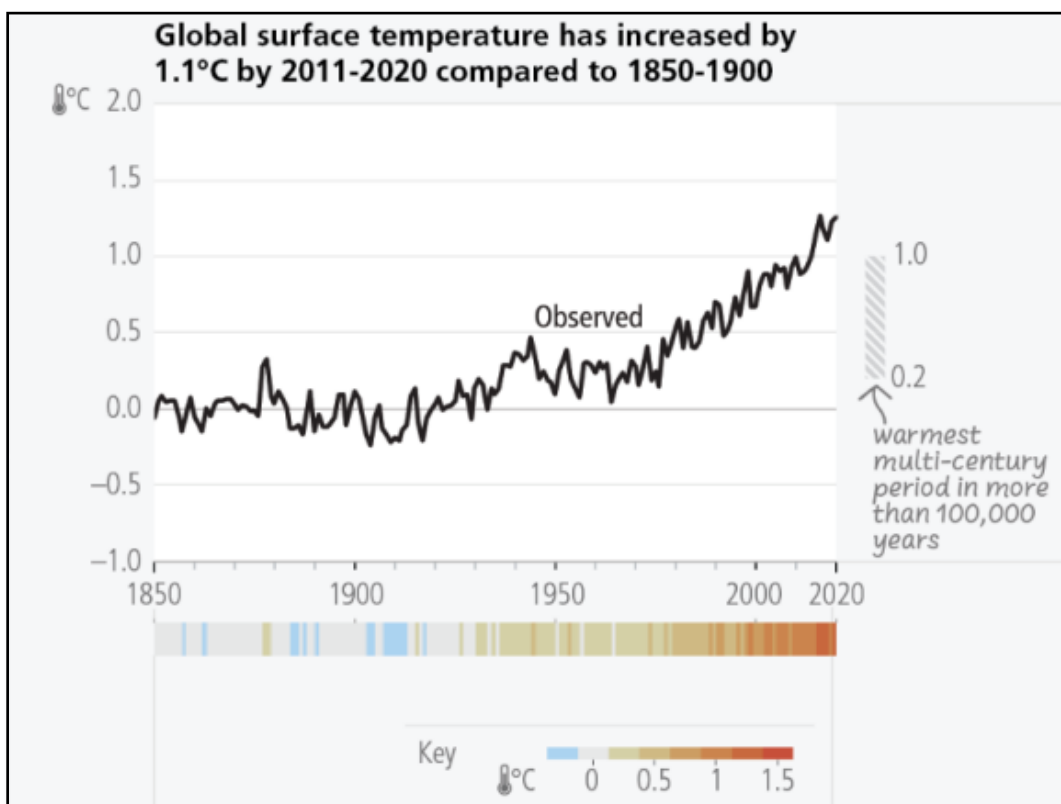
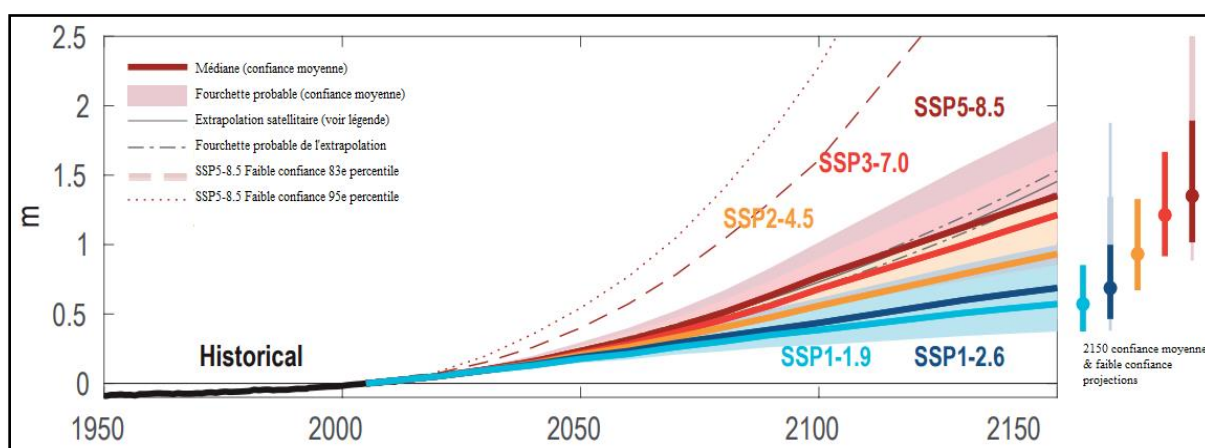


Figure I. 9 : Evolution de la température de la surface de la planète entre 1850 et 2020 (IPCC, 2023).

### I.8.2 Élévation du niveau de la mer :

L'élévation du niveau de la mer est l'une des principales conséquences du changement climatique sur les communautés côtières du monde entier. Ce phénomène est dû à la dilatation thermique des océans et à la fonte des réservoirs de glace terrestres (glaciers, calottes polaires). Selon le sixième rapport d'évaluation du GIEC (IPCC, 2021), l'élévation du niveau de la mer s'est accélérée depuis la fin des années 1960, avec un taux moyen de 2,3 [1,6 à 3,1] mm/an sur la période 1971-2018, passant à 3,7 [3,2 à 4,2] mm/an sur la période 2006-2018, et continuera d'augmenter à l'avenir, montrant une tendance irréversible. Selon le scénario à faibles émissions (SSP1-1.9) et le scénario à fortes émissions (SSP5-8.5), le niveau moyen de la mer à l'échelle mondiale devrait augmenter de 0.18m (0,15 à 0,23 m) et de 0.23 m (0,20 à 0,30 m) respectivement d'ici à 2050. D'ici 2100, le niveau moyen de la mer devrait augmenter de 0.38 m (0,28-0,55 m) et 0.77m (0,63-1,01 m), respectivement.



**Figure I. 10 :** Projection de l'élévation du niveau moyen de la mer à l'échelle mondiale selon différents scénarios de la trajectoire socio-économique commune (ssp) (par rapport à 1995-2014) (IPCC, 2021).

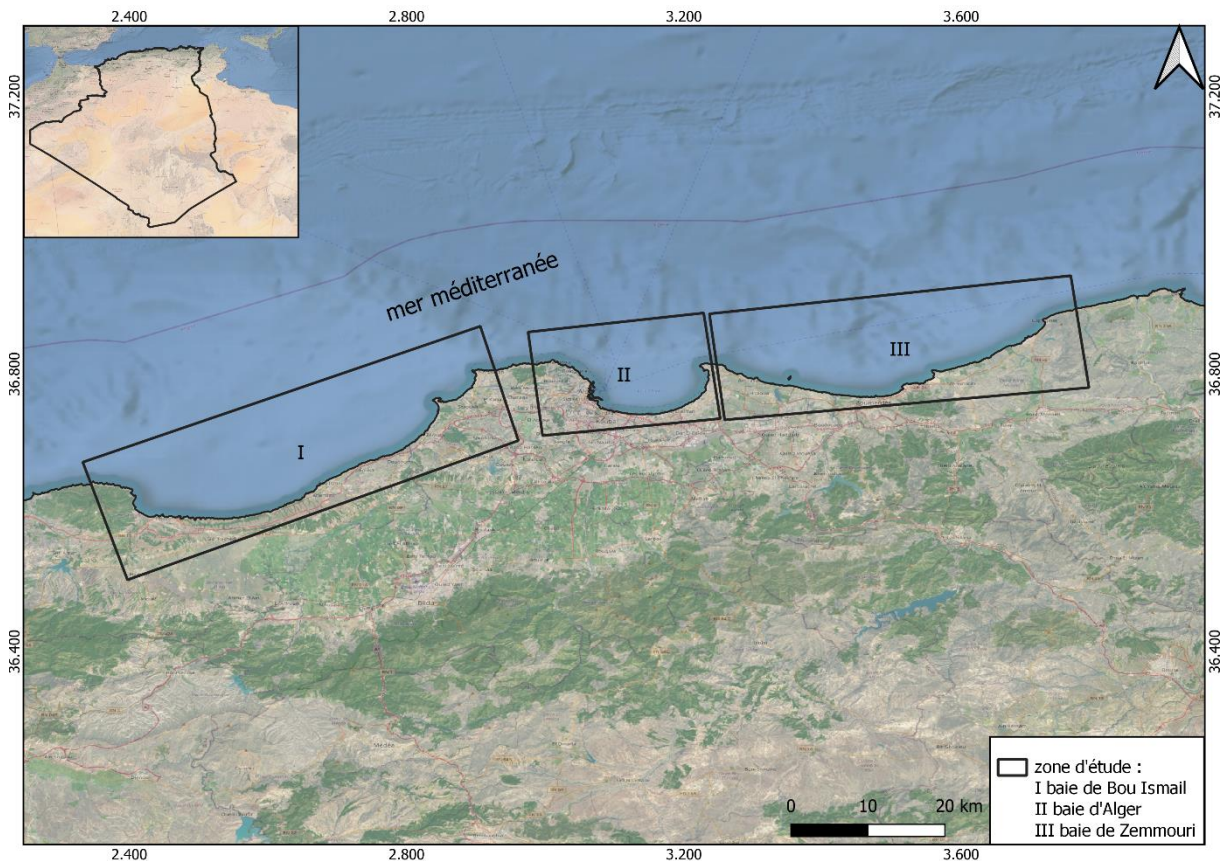
Dans le bassin méditerranéen, le niveau de la mer s'élève de 1,8 mm/an, comme le montre l'analyse des données marégraphiques du siècle dernier. En 2100, le niveau de la mer pourrait être de 500 à 1400 mm plus élevé qu'aujourd'hui en raison de la fonte des glaces continentales et de la dilatation thermique/effets stériques résultant du réchauffement climatique (Antonioli et al., 2020).

Un autre phénomène du réchauffement climatique est la fréquence et la violence des tempêtes, qui sont susceptibles de provoquer des inondations dans les zones vulnérables.

# **Chapitre II : Présentation du littoral Algérois**

## II.1 Situation géographique du littoral Algérois :

La côte Algéroise est située au centre du littoral algérien, entre Cap Djnet ( $36.878288^\circ$  N,  $3.721740^\circ$  E) à l'Est et le Mont Chenoua ( $36.624902^\circ$  N,  $2.365258^\circ$  E) à l'Ouest. Elle s'étend sur environ 185 km de linéaire côtier. La côte algéroise est subdivisée en trois unités géomorphologiques : (I) la baie de Bou Ismail, (II) la baie d'Alger et (III) la baie de Zemmouri. Chaque unité géomorphologique est subdivisée en sections basées sur la géomorphologie côtière, les repères naturels (promontoires et oueds) (Fig. II.1).



**Figure II. 1:** Localisation de la zone d'étude.

### II.1.2 Délimitation et typologie de la côte Algéroise :

Comme mentionné ci-dessus, la zone d'étude subdivisée en trois unités géomorphologiques :

#### (1) La baie de Bou Ismail :

Se situe à 40 km à l'ouest d'Alger. Elle est limitée à l'Ouest par le massif du Chenoua ( $36.6355^\circ$  N et  $2.3637^\circ$  E) et à l'Est par le massif de Bouzaréah ( $36.8045^\circ$  N  $2.9706^\circ$  E).

Le linéaire côtier de la baie de Bou Ismail est d'environ 83 km, la côte rocheuse occupe une longueur de 57 km soit 68.67% de linéaire côtier, tandis que la côte sableuse est d'une longueur de 24 km, soit 28.91% de linéaire côtier. Les infrastructures portuaires occupent 2.42% de linéaire côtier de la baie de Bou Ismail (figure II.2).

Le littoral de la baie de Bou Ismail est fortement urbanisé, notamment au niveau du chef-lieu de la wilaya de Tipaza et de la côte de Zéralda et Ain Benian. De même, il a connu le développement d'infrastructures portuaires et d'ouvrages de protection du littoral depuis les années 80 à ce jour. La baie de Bou Ismail est une zone touristique où des villages touristiques et des unités balnéaires tels que Sidi Fredj, Moretti, Club des Pins, port de plaisance et de pêche, tourisme de santé (Thalassothérapie) ont été installés le long de la bande côtière. L'orientation générale de la côte de Bou-Ismaïl est NNW-NNE, mais au niveau local elle est très irrégulière ce qui a provoqué l'action de vagues très différentes sur la côte.

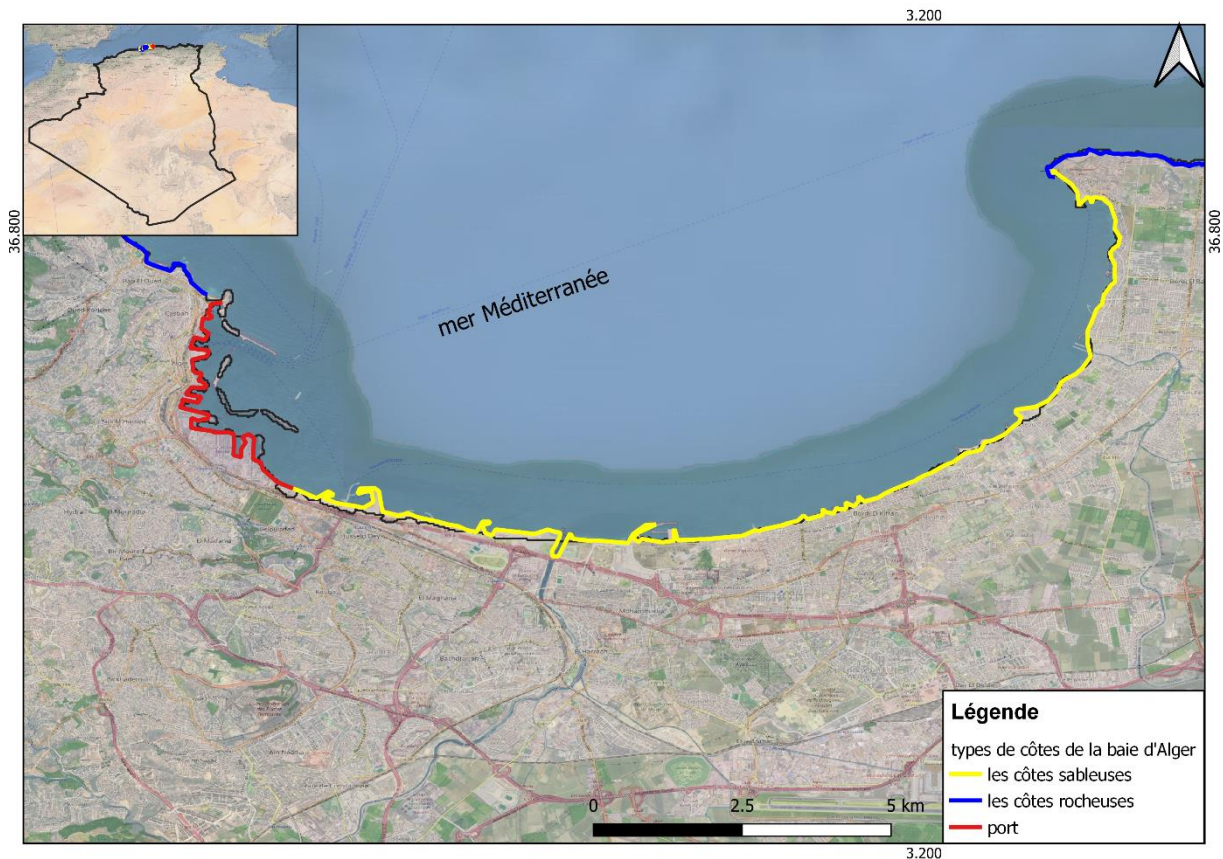


### (2) La baie d'Alger :

La baie d'Alger se situe au cœur du littoral algérois. Elle est délimitée à l'Est par le Cap Matifou ( $36.8075^{\circ}$  N et  $3.2299^{\circ}$  E) et à l'Ouest par le Cap Rais Hamidou ( $36.0816^{\circ}$  N et  $3.0376^{\circ}$  E). Elle est caractérisée par une forme semi-circulaire.

La côte de la baie d'Alger s'étend sur 46 km, dont 27 km de côtes sableuses (58.69%), 10 km de côtes rocheuses (21.75%), et environ 9 km constitue le port d'Alger (FigII.3).

La zone côtière ayant connu une forte urbanisation ainsi que le développement d'infrastructures portuaires de tailles considérables, notamment à Port d'Alger, la présence des ouvrages de protection, plus de 40 ouvrages de protection sur la ligne côtière d'Alger.

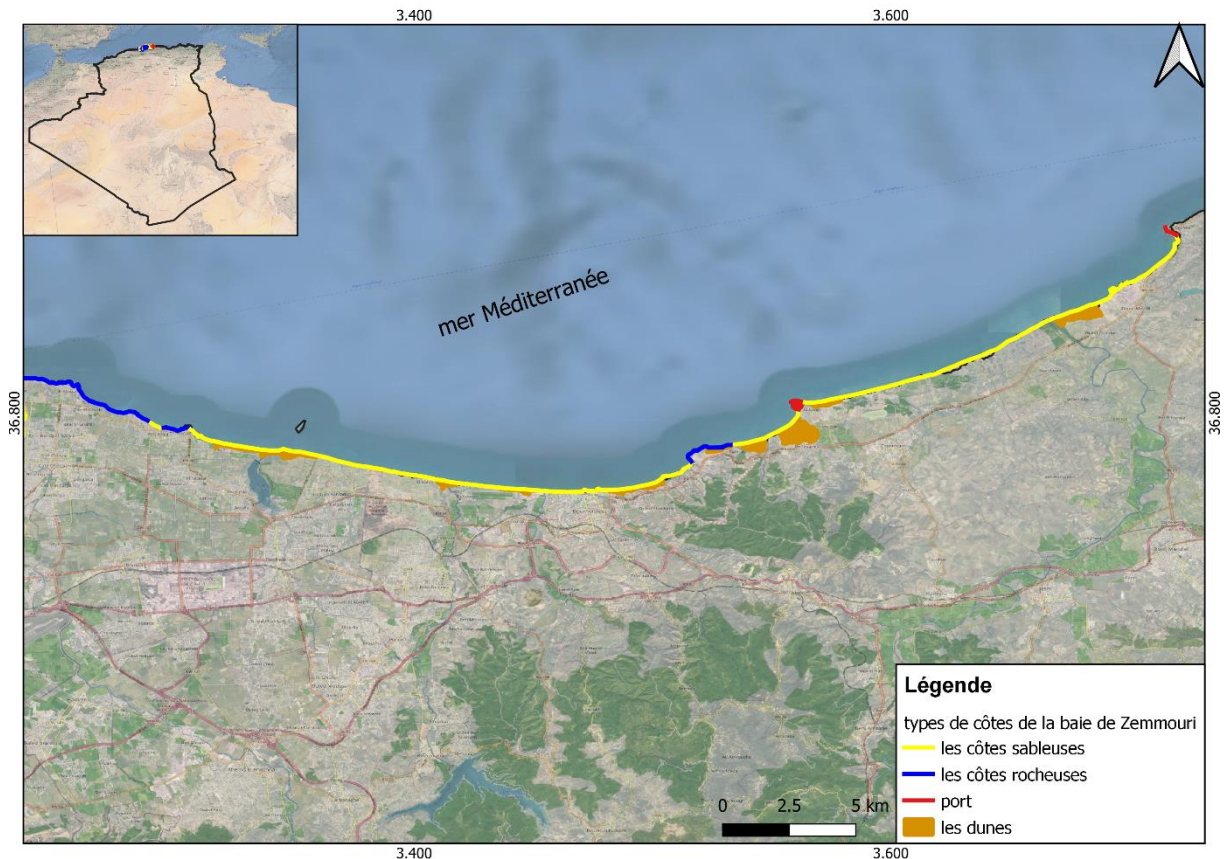


**Figure II. 3 :** Typologie de la côte de la baie d'Alger.

### (3) La baie de Zemmouri :

La baie de Zemmouri est située à l'est de la baie d'Alger. Elle est délimitée à l'Est par le Cap Djenet ( $36.8762^{\circ}$  N et  $3.7178^{\circ}$  E) et à l'Ouest par le Cap Matifou ( $36.8075^{\circ}$  N et  $3.2299^{\circ}$  E). C'est une baie ouverte, l'orientation du littoral est de WNW-NE. La partie occidentale est fortement urbanisée, tandis que la partie orientale est faiblement peuplée.

Le linéaire côtier de baie de Zemmouri représente 55 km dont 41 km de côtes sableuses soit 74.55%, 11 km de côtes rocheuses, soit 20% et environ 3 km de port, soit 5.54% de linéaire côtier total de la baie de Zemmouri (figure II.4).



**Figure II. 4 :** Typologie de la côte de la baie de Zemmouri.

### II.1.3 Les dunes côtières :

Les dunes côtières sont des écosystèmes terrestres situés dans la transition entre l'environnement continental et marin, qui remplissent un certain nombre de fonctions uniques telles que la protection du littoral par leurs capacités à absorber les tempêtes et son rôle dans la prévention des risques d'inondation (UICN, 2012).

La baie de Bou Ismail compte quatre cordons dunaires : (1) Le cordon dunaire à l'Est du complexe touristique de Matares, d'une superficie de 2,37 ha, qui est dans un état de dégradation très avancée en raison des pressions anthropiques telles que l'urbanisation et le pâturage. (2) Le cordon dunaire Douaouda Marine bordant l'arrière de la plage du Colonel Abbas, d'une superficie de 49.2 ha, caractérisé par biodiversité floristique et faunistique. (3) Le cordon dunaire de Zéralda situé à l'arrière des plages de Kheloufi, Familiale et Champ de tir. Il s'étend sur une superficie de 75.87 ha. (4) Le cordon dunaire d'Ain Benian couvre une superficie d'environ 4 ha et se trouve dans un état de dégradation très avancé en raison du pillage du sable, de la construction sur le cordon dunaire, du piétinement et du pâturage.

Pour la baie d'Alger, la comparaison de la carte géologique détaillée (Document consulté : feuille d'Alger, carte géologique au 1 :50000, réalisée entre 1948 et 1962) et de l'image Google Earth Pro montre que toutes les dunes côtières ont disparu du fait de l'urbanisation.

La baie de Zemmouri est caractérisée par la présence de neuf dunes côtières réparties d'Ouest en Est comme suit :

(1) La dune de Kadousse couvre une superficie de 41,71 ha et se trouve dans un état de dégradation avancé en raison du pillage du sable, des constructions illégales, du pâturage et du piétinement de la végétation. (2) Les dunes Mouilha situées à l'arrière plage de Boudouaou Elbahri, d'une superficie de 9.2 ha. Elle est colonisée par le pistachier lentisque (*Pistacia lentiscus*) et quelques touffes d'oyat (*Ammophila arenaria*). (2) La dune Mouilha : située à l'arrière plage de Boudouaou El bahri, elle occupe une superficie de 9.19 ha. Elle est colonisée par le pistachier lentisque (*Pistacia lentiscus*) et quelque touffe de l'oyat (*Ammophila arenaria*). (3) Le cordon dunaire du Corso, d'une superficie de 7.13 ha et d'une hauteur d'une vingtaine de mètres. Il est densément colonisé par des pistachiers (*Pistacia lentiscus*), mais il est actuellement menacé de disparition du fait de la construction d'une station de dessalement. (4) Le cordon dunaire Sahel, qui couvre une superficie d'environ 20 hectares, est en état de dégradation très avancée. (5) Le cordon dunaire des Grottes couvre une superficie de 11,89 ha. (6) Le cordon dunaire de Sghirate d'une superficie de 25,18 ha, il présente une grande diversité floristique (*Pistacia lentiscus*, *Ammophila arenaria*, *Polygonum maritimum*, *Euphorbia paralias*) qui a favorisé la fixation de la dune. (7) la dune de Zémouri : c'est la dune la plus importante avec une superficie de 105 ha. Elle est classée comme réserve naturelle par le décret wilaya de Boumerdes. Cette dune est recouverte par des phyto-stabilisatrice telle que l'*Otanthus maritimus*, *Ammophila arenaria*, *Polygonum maritimum*, *Euphorbia paralias*. (8) Le cordon dunaire de Safsaf Nabi : d'une superficie au tour de 12 ha. Il est en état de dégradation avancé. (9) Le cordon dunaire de Djenet : la dune est situées à l'aval de la RN24 entre Ouled Bounoua et Souanine ave une superficie d'environ 60 ha et une hauteur moyenne de 7m.

### II.1.4 Les plages :

Les plages correspondent à des rivages où la mer dépose des matériaux qui se déplacent librement les uns par rapport aux autres sous l'influence de l'agitation de l'eau. Il s'agit notamment de sable (entre 0,02 et 2 mm), de granulés et de gravier (entre 2 mm et 2 cm), de gravier (entre 2 cm et 20 m) et même de rochers (plus de 20 cm) (Paskoff, 1970). La plupart des plages Algéroises sont sableuses.

La partie occidentale de la baie de Bou Ismail est caractérisée par des plages en poche d'une longueur de 100 m et d'une largeur moyenne de 20 m, tandis que la partie orientale est caractérisée par des plages rectilignes d'une longueur pouvant dépasser 1 000 m et d'une largeur moyenne de 50 m (Tableau II.1).

Les plages de la baie d'Alger sont sablonneuses et sont actuellement artificialisées par des ouvrages de protection (épis, brise-lames, digues, etc.) (Tableau II.2).

Les plages de la baie de Zémouri sont sablonneuses, à l'exception de quelques plages en poche et de plages au pied des falaises dans la partie occidentale de la baie (Tableau II.3).

**Tableau II. 1 : Liste des plages de la baie de Bou Ismail.**

| Nom de la plage            | Caractéristiques  | Commune      | X             | Y             |
|----------------------------|---|--------------|---------------|---------------|
| Les Galets                 | Petite plage couverte de galets, de 80 m de longueur et de quelques mètres de largeur.  | Tipasa       | 2.407719135°  | 36.608046108° |
| Chenoua                    | Plage de sable de 1000 m de long et de largeur varie entre 20m à 40m.   | Tipasa       | 2.411647934°  | 36.602612461° |
| CRF Tipasa                 | Plage de sable moyen de 900m de long sur 90m de large   | Tipasa       | 2.425908256°  | 36.595937102° |
| Matarès                    | Plage sableuse d'une 500 m de long et de 20 à 70 mètres de large  | Tipasa       | 2.425908256°  | 36.595937102° |
| Corne d'Or                 | Une plage en forme de poche de 90 m de long et de quelques mètres de large.   | Tipasa       | 2.47252017°   | 36.593647514° |
| CET Tipasa                 | Une plage en forme de poche de 100 m de long et de quelques mètres de large.  | Tipasa       | 2.478676182°  | 36.59229639°  |
| Anse de Kouali             | Plage de sable protégée, de 500 m de long et de quelques mètres de large, caractérisée par la présence d'herbiers de posidonies.  | Tipasa       | 2.4937837085° | 36.589934904° |
| Mahieddine                 | Une plage de sable en forme de poche d'environ 300 m de long et quelques mètres de large.   | Ain Tagourit | 2.62602437°   | 36.61107967°  |
| Saidia                     | Plage de sable doré avec quelques roches, 90m de long et 10m de large.  | Bouharoun    | 2.641354553°  | 36.61733379°  |
| Crachate Ouest             | Longueur de 100m et large de 10m en moyenne.  | Bouharoun    | 2.647138285   | 36.618741995  |
| Crachate Est               | Une plage de sable moyenne de 100 m de long et de 10 à 15 m de large.   | Bouharoun    | 2.649200044°  | 36.620462357° |
| La fermette                | De très petites plages de sable se développent à l'abri des rochers.  | Bouharoun    | 2.663414323°  | 36.629823058° |
| Sidi Boumaaza              | Longueur de 150m et large de 15m en moyenne   | Bou Ismail   | 2.681059586°  | 36.642581131° |
| Front de mer de Bou Ismail | Plage de sable de 400 m de long et 15 m de large en moyenne.  | Bou Ismail   | 2.6994368895° | 36.65232980°  |
| Douaouda                   | Sa longueur est de 900 mètres et sa largeur moyenne de 20 mètres. Elle est découpée en deux plages : La plage du CRF Douaouda et la plage du Colonel Haoues.                        | Douaouda     | 2.7767564889° | 36.683254504° |
| Colonel Abbes              | longue de 2255m large de 50m. Elle est limitée à l'Ouest par des enrochements naturels et à l'Est par Oued Mazafran. Elle est découpée en deux plages : Colonel Abbes Ouest et Est. | Douaouda     | 2.7888202616° | 36.68894496°  |
| Kheloufi I                 | Longue de 650 m et large de 70 m en moyenne, cette plage de sable s'adosse à un massif dunaire dégradé, peut-être à la suite des constructions.                                     | Zéralda      | 2.805611°     | 36.699989°    |
| Kheloufi II                | Longue de 1200 m et large de 100 m en moyenne, cette plage de sable est   | Zéralda      | 2.816774°     | 36.708444°    |

## Chapitre II : Présentation du littoral Algérois

|                          |   |            |             |             |
|--------------------------|---|------------|-------------|-------------|
|                          | adossée à un massif dunaire en général en bon état.   |            |             |             |
| Plage Familiale          | Plage long de 1500m et large de 90m en moyenne. Cette plage est constituée de sable fin.  | Zéralda    | 2.824134°   | 36.714754°  |
| Champ de Tir             | 520m de longueur et largeur de 40 à 50m. elle est constituée de sable fin. Cette plage est bordée au sud par la station de dessalement et des constructions.          | Zéralda    | 2.831249°   | 36.722649°  |
| Complexe touristique     | Plage de sable fin de 650 m de long et 60 m de large en moyenne, protégée par trois brise-lames et un épi.  | Zéralda    | 2.834172°   | 36.727025°  |
| CRF                      | Longue de 360m par 60m de large, cette plage est constituée de sable fin.   | Zéralda    | 2.837831°   | 36.73057°   |
| Sable d'Or               | Longue de 200m par 90m de large, cette plage est constituée de sable fin.   | Zéralda    | 2.839527°   | 36.732766°  |
| Azur Plage et Palm Beach | s'étendent sur 1140 m de long et forment une série de brise-lames. Elles sont constituées de sable fin à moyen.   | Staoueli   | 2.841139°   | 36.736356°  |
| Centre Familiale         | 1170 m de long avec une largeur variable. Elle est constituée d'une série d'épis, d'un brise-lames et d'un port d'échouage.   | Staoueli   | 2.845688°   | 36.747044°  |
| Sidi Fredj Ouest         | La plage de sable, d'une longueur d'environ 450 mètres, est adossée à des zones urbaines et est très étroite. La partie orientale de la plage a pratiquement disparu. | Staoueli   | 2.845507°   | 36.754577°  |
| Thalassothérapie         | Située entre les promontoires rocheux à l'Est et un épi à l'Ouest, Sa longueur est de 200 m.  | Staoueli   | 2.841399°   | 36.760444°  |
| Sidi Fredj Est           | Située entre le port Sidi Fredj à l'ouest et l'épi à l'Est. Sa longueur est de 420m et sa largeur de 70m. elle est constituée de sable fin.                           | Staoueli   | 2.84867629° | 36.7609201° |
| El Rhiad                 | Plage coincée entre un épi en forme de L et un brise-lames. Largeur très étroite. Elle est constituée de sable fin à moyen.   | Staoueli   | 2.854019°   | 36.759777°  |
| El Menzeh                | Cette plage forme un demi-cercle, coincée entre deux brise-lames. Elle est constituée de sable fin.   | Staoueli   | 2.852684°   | 36.75919°   |
| Moretti                  | 780 m de long et 10 à 40 m de large, constitué de sable fin.  | Staoueli   | 2.86404     | 36.76140    |
| Sahel                    | 320m de long et 20m de large, constitué de sable fin.   | Staoueli   | 2.86848°    | 36.76266°   |
| Sheraton                 | 440m de long et 60m de large en moyenne.  | Staoueli   | 2.871798°   | 36.764061°  |
| Club des Pins            | La plage, d'une longueur de 1800 m et d'une largeur variable, est constituée de sable fin.  | Chéraga    | 2.87878°    | 36.768336°  |
| Dauphin                  | Plage de sable de 600m de long, elle est limitée à l'est par oued Beni Messous.   | Chéraga    | 2.892191°   | 36.77985°   |
| El Bahdja                | Plage de sable de 1140 m de long, limitée à l'ouest par l'oued Beni   | Ain Benian | 2.898183°   | 36.788724°  |

## Chapitre II : Présentation du littoral Algérois

|              |   |            |           |            |
|--------------|---|------------|-----------|------------|
|              | Messous. Cette plage est bordée au sud par la station d'épuration et des constructions.   |            |           |            |
| La Fontaine  | La plage de gravier mesure 270 m de long et moins de 15 m de large.   | Ain banian | 2.899475° | 36.79094°  |
| Jeunesse     | 200m de longueur et moins de 20m de largeur. Elle est limitée à l'ouest par un enrochement naturel et à l'est par un épi.                                     | Ain Banian | 2.900336° | 36.797053° |
| Méditerranée | Plage de sable coincée entre un épi à l'ouest et le port d'El Djamila à l'est. Elle est large près du port et étroite près de l'épi. Sa longueur est de 200m. | Ain Banian | 2.900405° | 36.799404° |
| El Djamila   | Plage artificielle, fait une longueur de 110m et une largeur de 75m. elle est protégée par une digue.   | Ain Banian | 2.894913° | 36.803188° |

**Tableau II. 2 :** Liste des plages de la baie d'Alger.

| Nom de la plage          | caractéristiques   | Commune         | x             | y             |
|--------------------------|--|-----------------|---------------|---------------|
| Sablette et Piquet Blanc | Ce littoral long de 5060m, situé entre le port d'Alger à l'ouest et l'oued El Harrach à l'est, il est totalement artificialisé.    | Bel Ouizdad     | 3.0854713°    | 36.7498254°   |
| Mazela                   | Longue de 1170m, cette plage est en cours d'aménagement (rechargement en sable, des constructions d'épis, de digue, Alger médina). | Mohammadia      | 3.14243015°   | 36.7415511°   |
| Pins Maritime            | Longueur de 800 m et largeur réduite, il est protégé par un épi à l'ouest et un épi en forme de L à l'est.                         | Mohammadia      | 3.1737866°    | 36.744805°    |
| Sirène I et II           | Découpé en deux plage Sirène I et Sirène II. Recouvre 1420 m de long et protégée par quatre brise-lames et un épi en forme de L    | Bordj El Kifane | 3.186109°     | 36.748243°    |
| Verte Rive               | 1700m de long. Ce littoral est protégé par une digue sur 1400 m de long.   | Bordj El Kifane | 3.206238°     | 36.756697°    |
| Bateau Cassé             | 900m de long, largeur variable d'ouest en est. Elle est constituée de sable moyen  | Bordj El Kifane | 3.220922°     | 36.766631°    |
| Stamboul                 | 610m de long et 35m de large, sable moyen  | Bordj El Kifane | 3.230605°     | 36.774916°    |
| Coco Plage               | 400m de long, limitée au sud par l'Oued El Hamiz et au nord par le Petit Port.   | Bordj El Kifane | 3.231042      | 36.779209     |
| La Frégate               | 700m de long, protégé par une digue  | Bordj El Kifane | 3.23361639514 | 36.7864261411 |
| Alger Plage              | 100m de long, limitée au nord par Marina Palm  | Bordj el bahri  | 3.236145      | 36.791362     |
| Les Ondines Sud          | 410m de long et de largeur variable, limitée au sud par Marina Palm. Elle constituée de sable moyen.                               | Bordj el bahri  | 3.235774      | 36.79439      |
| Les Ondines Nord         | 100m de long et 10m de large.  | Bordj el bahri  | 3.23683       | 36.797603     |

## Chapitre II : Présentation du littoral Algérois

|                  |   |          |               |               |
|------------------|---|----------|---------------|---------------|
| Tamenfoust Est   | 300m de long et largeur varie de 10m à 20m. Elle constituée de sable grossier | El Marsa | 3.23359       | 36.806399     |
| Tamenfoust Ouest | 680m de long et de largeur variable. Elle est protégée par quatre épis.       | El Marsa | 3.22903797243 | 36.8069378128 |

**Tableau II. 3 :** Liste des plages de la baie de Zemmouri.

| Nom de la plage     | caractéristiques   | Commune             | x         | y          |
|---------------------|--|---------------------|-----------|------------|
| El Marsa Centre     | 300m de long, 10m de large, elle constituée de sables grossiers  | El Marsa            | 3.256413  | 36.811519  |
| Plage Zerzouria     | 2000m de long et 10m de largeur, elle constituée de galets   | El Marsa            | 3.273844  | 36.800914  |
| Tamaris             | 440m de long et 20m de large, constituée de sable moyen  | Ain Taya            | 3.293160  | 36.793811  |
| Kef El Arar         | 80m de long et 10m, constituée de sable fin  | Ain Taya            | 3.300471  | 36.792656  |
| Flot bleu           | 600m de long, sable moyen, protégée par quatre brise-lames   | Ain Taya            | 3.308505  | 36.790574  |
| Surcouf             | 600m de long, largeur variable, sable moyen  | Ain Taya            | 3.313602  | 36.788453  |
| Deca Plage          | 620m de long, 40m de large, sable grossier   | Ain Taya            | 3.31999   | 36.7870270 |
| Tarfaya             | 600m de long, 40m de large, sable grossier   | Heuraoua            | 3.324908  | 36.78616   |
| El Kadous           | 2000m de long, largeur variable, sable fin   | Heuraoua            | 3.337106  | 36.784146  |
| Réghaïa Plage       | 1200m de long, 50m de large, sable fin   | Réghaïa             | 3.356812  | 36.782556  |
| Sidi El Khither     | 1000m de long, 20m de large,   | Boudaouaou EL Bahri | 3.3640089 | 36.781051  |
| Ben Abde Allah      | 1000m de long, la longueur de 15m à 20m  | Boudaouaou EL Bahri | 3.376752  | 36.777817  |
| Plage El Kouidia    | 900m de long, 25m de long  | Boudaouaou EL Bahri | 3.395880  | 36.7742    |
| Gourarai            | 900m de long, 15m de long  | Boudaouaou EL Bahri | 3.39588   | 36.7742    |
| Bouzegza            | 400m de long, 30m de large, limitée à l'est par une digue  | Boudaouaou EL Bahri | 3.401531  | 36.773497  |
| El Mamarine         | 400m de long, 80m de large   | Boudaouaou EL Bahri | 3.411423  | 36.771406  |
| Mouilha             | 600m de long, 90m de large, limitée à l'est par Oued Boudaouaou  | Boudaouaou EL Bahri | 3.416089  | 36.770486  |
| El Raboua El Khadra | Long de 2460m, elle est limitée à l'ouest par Oued Boudaouaou et à l'est par la station de dessalement de Corso. Sur les 500 premiers mètres du côté de Oued Boudouaou, la largeur de la plage est de 100 mètres, puis elle se rétrécit à 30 mètres. | Corso               | 3.424164  | 36.769995  |
| Plage Corso         | 730m de long, 90m de large, elle est limitée à l'est par Oued Corso et à l'ouest par station de dessalement.   | Corso               | 3.452392  | 36.766843  |
| Jardin El Nacer     | 500m de long, limitée à l'ouest par Oued Corso.  | Boumerdes           | 3.457091  | 36.766866  |
| Plage El Assil      | 500m de long, limitée à l'est par Oued Tatareg   | Boumerdes           | 3.462114  | 36.766841  |
| El Naoures          | 400m de long, 70m de large. Elle est protégée par deux épis.   | Boumerdes           | 3.467418  | 36.7666638 |

## Chapitre II : Présentation du littoral Algérois

|                        |   |           |          |            |
|------------------------|---|-----------|----------|------------|
| Plage Dauphin          | 600m de long, limitée à l'est par Oued Boumerdes. Elle est protégée par un brise-lame de 120m.  | Boumerdes | 3.474179 | 36.766946  |
| Plage rocher Noir      | 840m de long, 65m de large  | Boumerdes | 3.748645 | 36.7673660 |
| El Djawhara            | 600m de long, 70m de large  | Boumerdes | 3.493614 | 36.768609  |
| Rocher Pourri          | 800m de long, 100m de large   |           |          |            |
| Plage El Azrek         | 870m de long, 70m de large  | Boumerdes | 3.51225  | 36.775296  |
| El Yassamine           | 460m de long, 60m de large  | Boumerdes | 3.514449 | 36.776898  |
| Seghirat               | 450m de long, 120 de large  | Thenia    | 3.539308 | 36.786959  |
| Oued Elime             | 400m de long, 130m de large   | Thenia    | 3.545842 | 36.788491  |
| Ben younes             | 1200m de long, 80m de large   | Zemmouri  | 3.549032 | 36.790194  |
| El Dzera               | 700m de long, 35m de large  | Zemmouri  | 3.561466 | 36.800555  |
| El kebkab              | 700m de long, 60m de large  | Zemmouri  | 3.566167 | 36.803988  |
| El Takhayum            | 1000m de long, 90m de large   | Zemmouri  | 3.571826 | 36.804345  |
| El Kuthban<br>Elramlia | 1000m de long, 90m de large   | Zemmouri  | 3.577822 | 36.805862  |
| Sable D'or             | 800m de long, 100m de large   | Zemmouri  | 3.584326 | 36.807091  |
| Foret sahel            | 700m de long, 130m de large   | Zemmouri  | 3.593584 | 36.809413  |
| El Shweisha            | 2000m de long, 60m de large   | Zemmouri  | 3.60735  | 36.81294   |
| Hadj Ahmed             | 2200m de long, 60m de large   | Zemmouri  | 3.62923  | 36.82013   |
| Mandoura               | Elle présente une longueur de 6565m et une largeur de 50m, limitée à l'est par Oued Isser. Elle est découpée en trois plages : Elbahria (600m), El yad Eldhabia (600m), Mandoura ouest. | Laghata   | 3.658253 | 36.834298  |
| Dar Mendil             | 2360m de long, 100m de large. Elle est limitée à l'est par la centrale électrique et à l'ouest par Oued Isser.  | Djenet    | 3.686105 | 36.845132  |
| El Hamdanya            | 1000m de long, 35m de large   | Djenet    | 3.706954 | 36.857906  |
| El azraq Elkabir       | 900m de long, 30m de large  | Djenet    | 3.708582 | 36.859015  |
| Oued Elgharaf          | 900m de long, 60m de large  | Djenet    | 3.719284 | 36.869277  |
| Stara                  | s'étend sur une longueur de 430m et une largeur moyenne de 70m. Elle est limitée à l'est par port de Djenet et à l'ouest par l'épi.   | Djenet    | 3.720422 | 36.873388  |

### II.2 Contexte géologique :

La géologie de la région d'Alger a été traitée par de nombreux auteurs (Bouhmadouche, 2012; Domzig et al., 2006a; Maouche et al., 2009; Wildi, 1983).

Le Nord de l'Algérie est constitué de différentes unités géologiques et structurales, qui font partie de la chaîne alpine maghrébide, qui s'étend de Gibraltar à la Calabre (Delga MD, 1969; Wildi, 1983). (Domzig et al., 2006b).

La région Algéroise est composée essentiellement par un socle métamorphique, des terrains éruptifs et de complexe sédimentaire d'âge mio-plio-quaternaire (figure II.5).

Le socle : il s'agit de terrains métamorphiques primaires (formés principalement de schistes, micaschistes et gneiss) qui affleurent dans le massif du Chenoua, de Sidi Fredj, du massif d'Alger et du Cap Matifou.

Les terrains volcaniques : Il s'agit de roches volcaniques qui se composent principalement de roches basaltiques et plutoniques (granite et diorite), on les trouve au Cap Djenet, Roché Noir et au Cap Matifou.

Le Miocène : représenté par des faciès argileux, au niveau de Cap Matifou, Thénia et Cap Djenet.

Le Pliocène : cette formation est composée principalement de conglomérats, marnes bleues et grès. On les trouve essentiellement au niveau de Cap Djenet, Ain Taya et sahel d'Alger (entre le massif Chenoua à l'Ouest et massif d'Alger à l'Est).

Le quaternaire : il recouvre la majeure partie de la zone d'étude (baie de Bou Ismail, la baie d'Alger et la baie de Zemmouri). Les masses d'alluvion sableuses et caillouteuses, les limons, les graviers et les argiles du bassin de Matidja forment le quaternaire. Les terrasses alluviales de l'Oued Mazafran et les plaines d'Oued Isser et les terrasses marines présentes le long de la côte forment également le quaternaire.

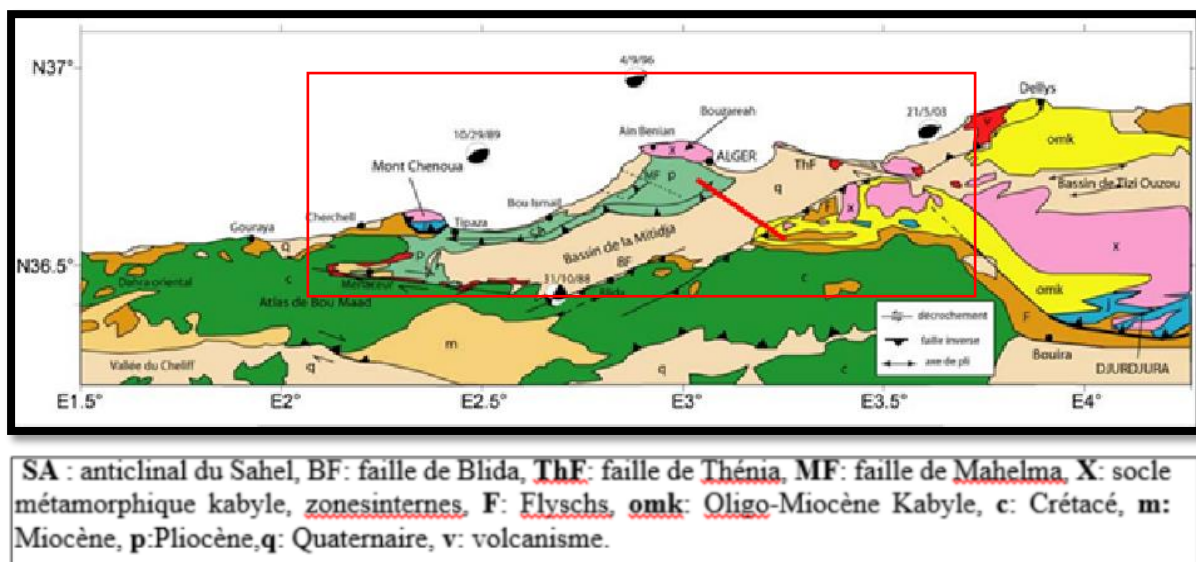
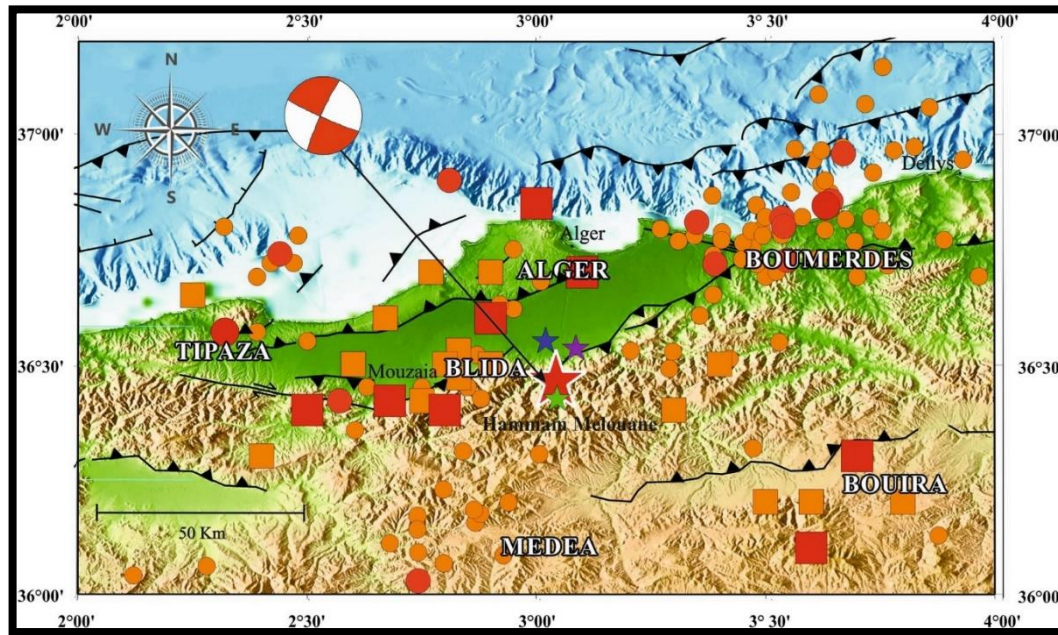


Figure II. 5 : La carte géologique de la région Algéroise (Domzig, 2006).

### II.3 Cadre sismique :

La région d'Alger est marquée par de nombreuses failles actives responsables de séismes importants qui ont affecté cette région, dont le plus récent est le séisme de Boumerdès en mai 2003, qui a fait plusieurs victimes et des pertes matérielles (Adams et al., 2004; Déverchère et al., 2005; Guessoum et al., 2018; Maouche and Harbi, 2018; Yelles-Chaouche et al., 2019). La sismicité interplaque représente une déformation instantanée de la partie Nord de la plaque africaine due à la convergence avec la plaque eurasiennne (Yelles-Chaouche et al., 2006a). La figure II.6, montrent les séismes enregistrés sur la région Algéroise.



**Figure II. 6 :** La carte de la région Algéroise, montrant la sismicité historique avec  $M > 4$  estimé de 1365 à 2013 (Mokrane, A., 1994) in (Yelles-Chaouche et al., 2017b).

*Les carrés rouges correspondent aux séismes historiques d'intensité  $IX \leq I_0 \leq X$ , les carrés bruns aux séismes historiques d'intensité  $VII \leq I_0 \leq VIII$ , les cercles rouges correspondent aux séismes instrumentaux d'intensité  $5 \leq M < 7$ , et les cercles bruns aux séismes instrumentaux d'intensité  $4 \leq M < 5$ . La secousse principale est indiquée par une étoile rouge et son mécanisme focal (étude actuelle). Les étoiles vertes, bleues et magenta représentent respectivement les localisations IGN, EMSC et USGS. Les lignes noires représentent les principales failles actives (Yelles-Chaouche et al., 2006b).*

## II.4 Cadre climatique et hydrographique :

Le climat de la côte algéroise est soumis au climat méditerranéen tempéré sub-humide avec deux saisons distinctes : un été chaud et sec et un hiver froid et pluvieux.

### II.4.1 La température :

Les températures annuelles ont connus une augmentation, l'analyse des températures moyenne mensuelles de la région Algéroise montre que les températures les plus élevées enregistrées sont le mois de juillet et août et les températures minimums enregistrées les mois de janvier et février (Fig.II.7). La température moyenne entre janvier 1982 et décembre 2022 était de  $18,3^{\circ}\text{C}$  (wofrance, 2023).

### II.4.2 Les précipitations :

L'analyse des précipitations (Figure II.8) montre des irrégularités mensuelles. Le minimum de précipitations est enregistré en juillet et le maximum en novembre.

La moyenne des précipitations entre janvier 1982 et décembre 2021 est de  $370,3 \text{ mm}$  (wofrance, 2023).

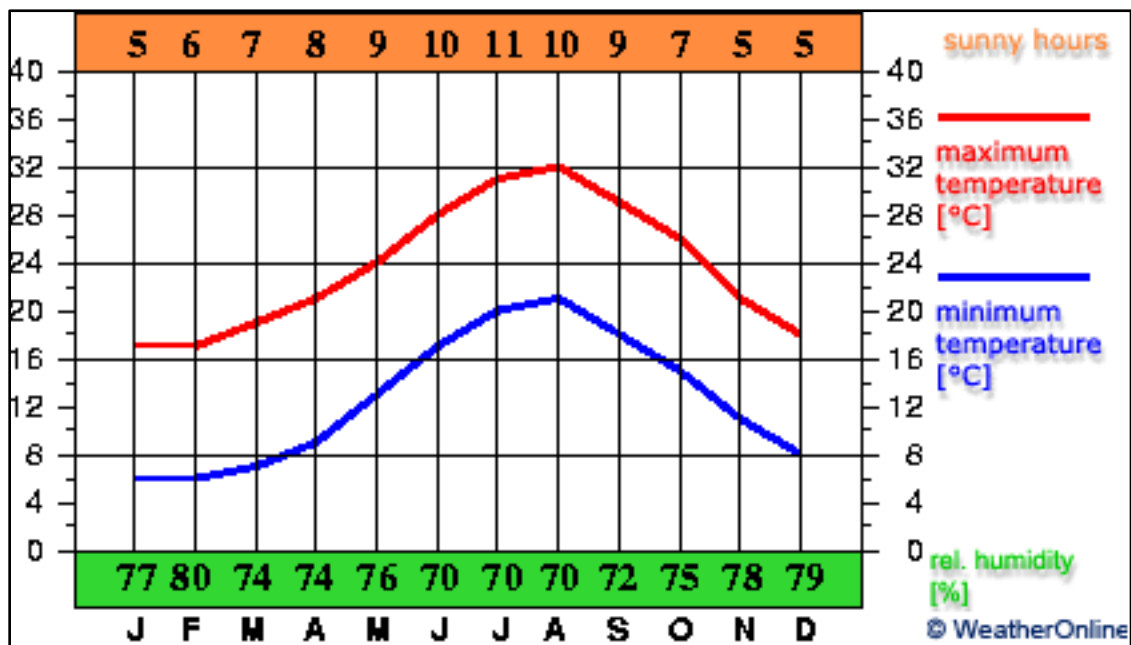


Figure II. 7 : Distribution des températures dans la région Algéroise (wofrance, 2023).

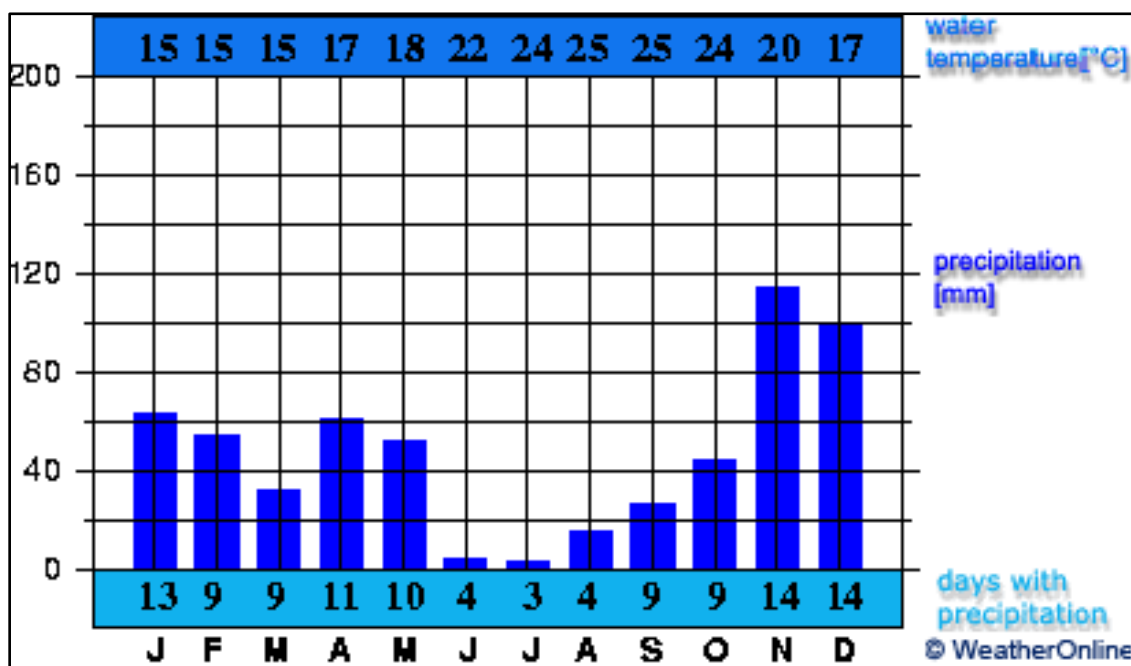


Figure II. 8 : Les précipitations mensuelles moyennes dans la région Algéroise (wofrance, 2023).

## II.5 Cadre hydrographique

### II.5.1 Les Oueds :

Les fleuves et les rivières jouent un rôle déterminant dans la production et la mise en circulation des sédiments, en transférant et/ou en tamponnant les flux des sources et des montagnes vers les environnements alluviaux en aval (Fryirs, 2013). La quantité de sédiments (naturellement fluctuante dans le temps) transférée des rivières au système côtier détermine un bilan de masse qui a des effets importants sur la position et la morphologie du littoral (Bombino et al., 2022; Falqués, 2006).

Les principaux oueds de la région Algéroise sont :

**Oued Nador** : débouche entre Tipaza et Mont Chenoua au niveau de la plage Chenoua. La superficie du bassin versant de l'Oued Nador est de l'ordre de 300 km<sup>2</sup>.

**Oued Mazafran** : c'est le plus important des oueds dans la région de Bou Ismail, la Superficie de son bassin versant est de 1889 km<sup>2</sup>. Il est formé par la réunion de trois principaux Oueds : Oued Djer, Oued Chiffa et Oued Bou Roumi. Son apports solides moyenne annuelle est de 1610 t/km<sup>2</sup> /an (A.N.R.H, 2004).

**Oued Beni Messous** : longueur est de 11 km et la superficie de son bassin versant de 33km<sup>2</sup>, il débouche dans la baie d'El Djamilia au niveau de la plage El Bahdja, dans la limite entre les communes de Ain El Benian et Chéraga, son débit liquide est 0.245 m<sup>3</sup>/s (Chabane, 2019).

**Oued El Harach** : Son bassin versant couvre une superficie de 966 km<sup>2</sup>, il traverse l'Atlas Blidéen, la plaine Mitidja et le Sahel finalement il diverse vers la mer. Le bilan des écoulements moyens annuels est de 5.41m<sup>3</sup> /s (Bachari Houma, 2009a).

**Oued El Hamiz** : La superficie du bassin versant est de 160 km<sup>2</sup>, son embouchure se situe près du cap Matifou. Il diverse à l'est de la baie d'Alger près du cap Matifou. La présence du barrage El Hamiz en amont réduit considérablement les apports solides venant en mer. (Bachari Houma, 2009b).

**Oued Boudouaou** : La superficie de son bassin versant est de 150 km<sup>2</sup> et sa longueur de 22 km. Il prend naissance à partir d'Oued Keddara et Oued El Haddad. Il débouche dans la baie de Zemmouri au niveau de la plage Mouilha, dans la limite entre les communes de Boudouaou et Corso (A.N.R.H, 2004).

**Oued Corso** : se diverse au centre de la baie de Zemmouri au niveau de la plage. La superficie du bassin versant est de 100 km<sup>2</sup>, son volume annuel moyen est évalué à 0.11 Mm<sup>3</sup> (A.N.R.H, 2004).

**Oued Isser** : s'écoule du Sud vers le Nord à travers Beni Amrane et Sidi Ali Messaoud, il transporte des matériaux solides de 4.96 million de m<sup>3</sup>/ans vers la mer (A.N.R.H, 2004).



Figure II. 9 : Réseau hydrographique de la grande baie de la côte Algéroise.

### II.5.2 Les barrages :

Les barrages jouent un rôle important dans le développement des ressources en eau. Cependant, les impacts des barrages sur le recul du littoral ont été démontrés en raison du stockage et de l'abaissement local des sédiments (Larid, 2008).

Tableau II. 4 : Les principaux barages dans la région Algéroise (Wikipédia, 2022)

| barrage                                    | Volume (m <sup>3</sup> ) |
|--|--------------------------|
| barrage de Boukourdane                     | 106 000 000              |
| Barrage de Taourira                        | /                        |
| Barrage de Kef Eddir                       | /                        |
| barrage de Douéra                          | 87 000 000               |
| Barrage de Thénia                          | 30 000                   |
| Barrage de Merdjjet El Feïat               | 50 000                   |
| <u>Barrage d'El Allal</u>                  | 60 000                   |
| Barrage de Chender                         | 1 700 000                |
| Barrage de Djenet                          | 2 800 000                |
| Brrages de Sidi Daoud                      | 3 700 000                |
| Barrage de Béni Amrane                     | 13 100 000               |
| Barrage du Hamiz                           | 16 280 000               |
| Barrage de Keddara                         | 145 600 000              |
| Barrage d'Oued Djemâa                      | 176 000 000              |
| Barrage de Tala Ouranim, Barrage d'El Ksar | /                        |

## II.6 Contexte hydrodynamique :

### II.6.1 Le Vent

Les données statistiques des vents au large ont été extraites à partir de la base de données [www.waveclimate.com](http://www.waveclimate.com) pour une période de 29 ans (1992-2021). Cette dernière résume les statistiques de vents au large des différentes baies. Les données des vents au large (Vitesses et directions) sont représentées sous forme de roses dans les figures suivantes (Figure. II.10- II.11- II.12).

#### ○ **Baie de Bou-Ismaïl :**

Les résultats des observations du vent effectuées au large de la baie de Bou-Ismaïl, sont rapportés sous forme de roses de vents pour chaque trimestre (Figure II.10). D'après les fréquences d'apparition du vent par direction et par classe de vitesse pour chaque trimestre, on enregistre une prédominance des vents issus des directions WSW, NE avec des fréquences respectives de 25% et 18% pour les deux trimestres (hiver et été) avec des vitesses relatives variant entre 12 et 15m/s. Les directions NE, WSW et SW sont aussi fréquentes en printemps et en automne mais avec des fréquences relativement faibles (10% à 11%). Une grande partie des vents issus de ces directions ont des vitesses entre 8 et 12m/s.

#### ○ **Baie d'Alger :**

Le régime et la vitesse des vents au large de la baie d'Alger peuvent être résumés dans les roses des vents suivantes (Figure II.11), dont on distingue les principales directions dominantes en fonction des saisons :

- En été : cette zone est marquée par la dominance du vent issu de secteur NE et E, avec des fréquences respectives de 23% et 17 %, leur vitesse se répartit entre 8 à 13m/s.
- En Hiver : cette zone est marquée par la dominance du vent issu de secteur SW et W, avec des fréquences respectives de 18% et 13%, la vitesse du vent se propage entre 15 à 18m/s.
- En automne et au printemps, il est marqué par la prédominance des vents de secteur NE et SW. Au printemps, la fréquence du vent est de 16% et 13% et il souffle à une vitesse qui varie entre 12 à 15m/s. En Automne la fréquence est de 11% et 13% pour les deux directions avec une vitesse qui varie entre 13 à 16m/s

#### ○ **Baie de Zemmouri**

L'analyse statique de ces données de vent (Figure II.12) montre que les directions les plus dominantes sont :

- Printemps et automne : Prédominance des vents d'Ouest à Sud-Ouest et d'Est à Nord-Est, avec des fréquences respectives de 18,99% et 19,38%. Les vents de cette direction ont des vitesses supérieures à 16 m/s.

- Période hivernale : les vents d'Ouest ont une fréquence élevée de 26,31% avec une vitesse comprise entre 12 et 16 m/s. Les autres directions sont moins fréquentes, avec des fréquences relativement faibles. Les autres directions sont moins fréquentes, avec des fréquences relativement faibles.
- Période estivale : les vents les plus dominants sont ceux des deux directions Nord-Est et en particulier Est avec des fréquences d'occurrence de 24,26% et 33,44% respectivement. Les directions de vent Nord-Ouest et Nord sont présentes mais avec une prédominance moins remarquable.
- Fréquence annuelle : les directions de vent les plus dominantes sont l'Est, l'Ouest et le Nord-Est, avec des fréquences estimées à 20,51%, 18,46% et 14,75% respectivement.

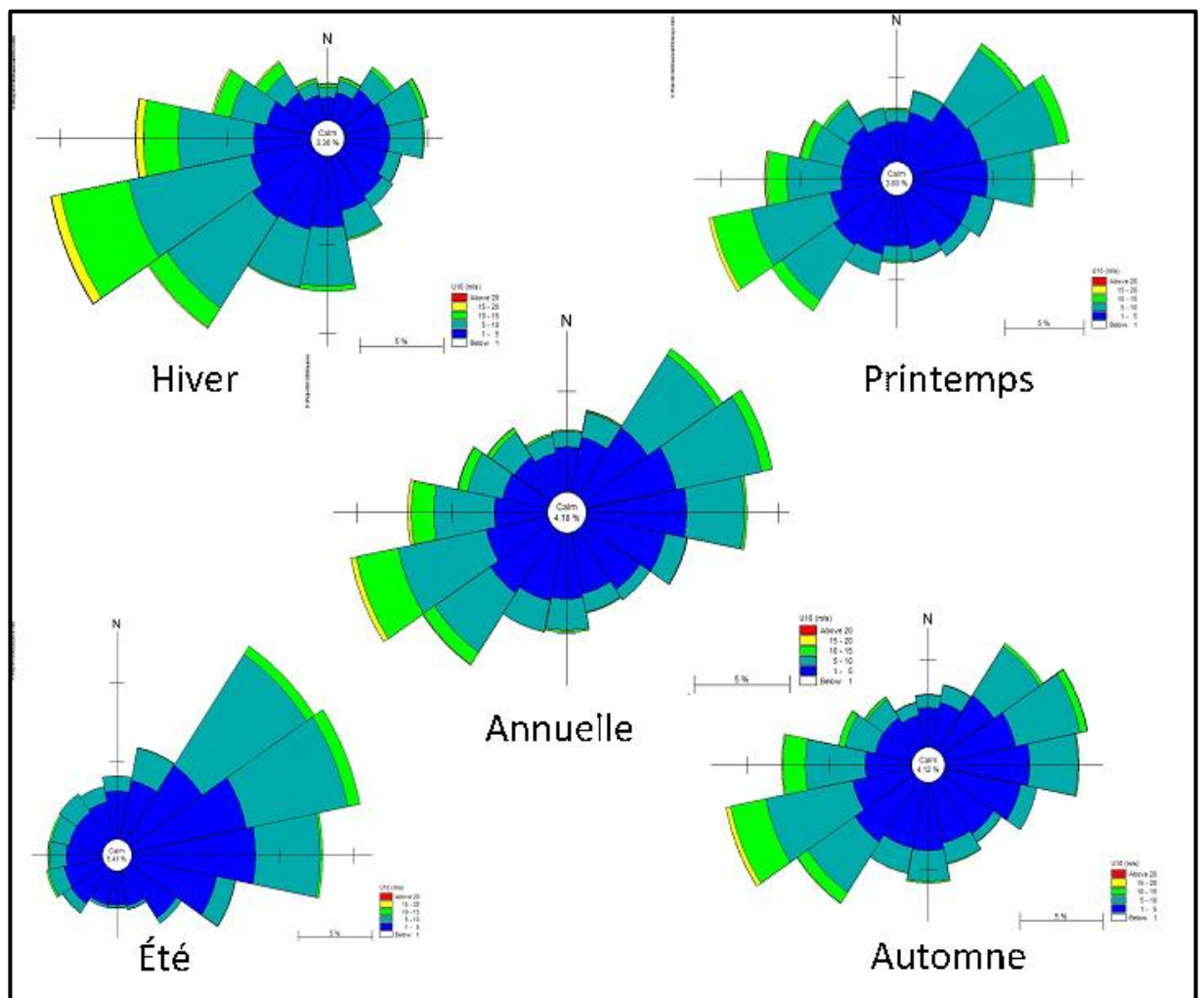


Figure II. 10 : Roses des vents au large de la baie de Bou Ismail (1992-2021).

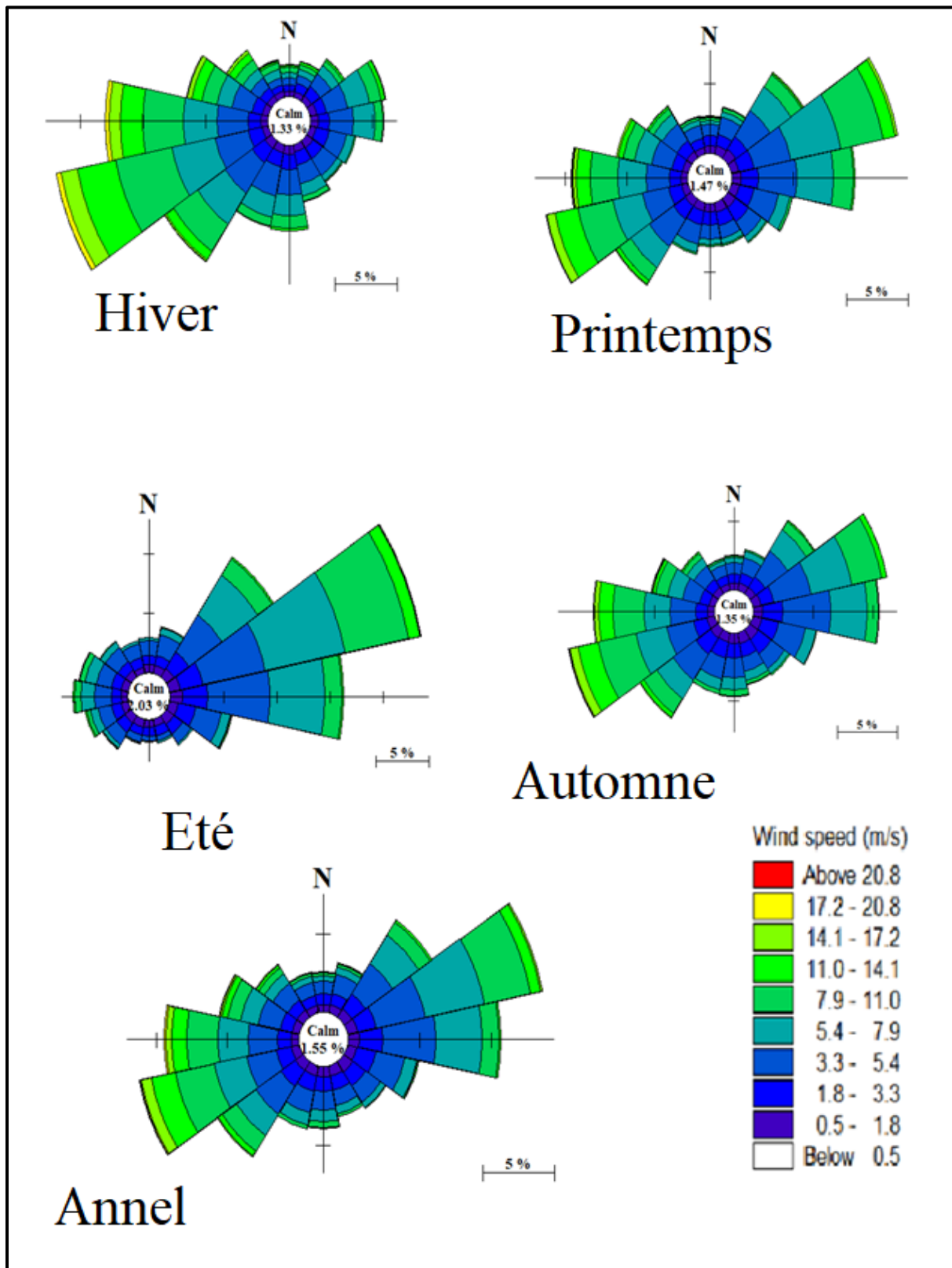
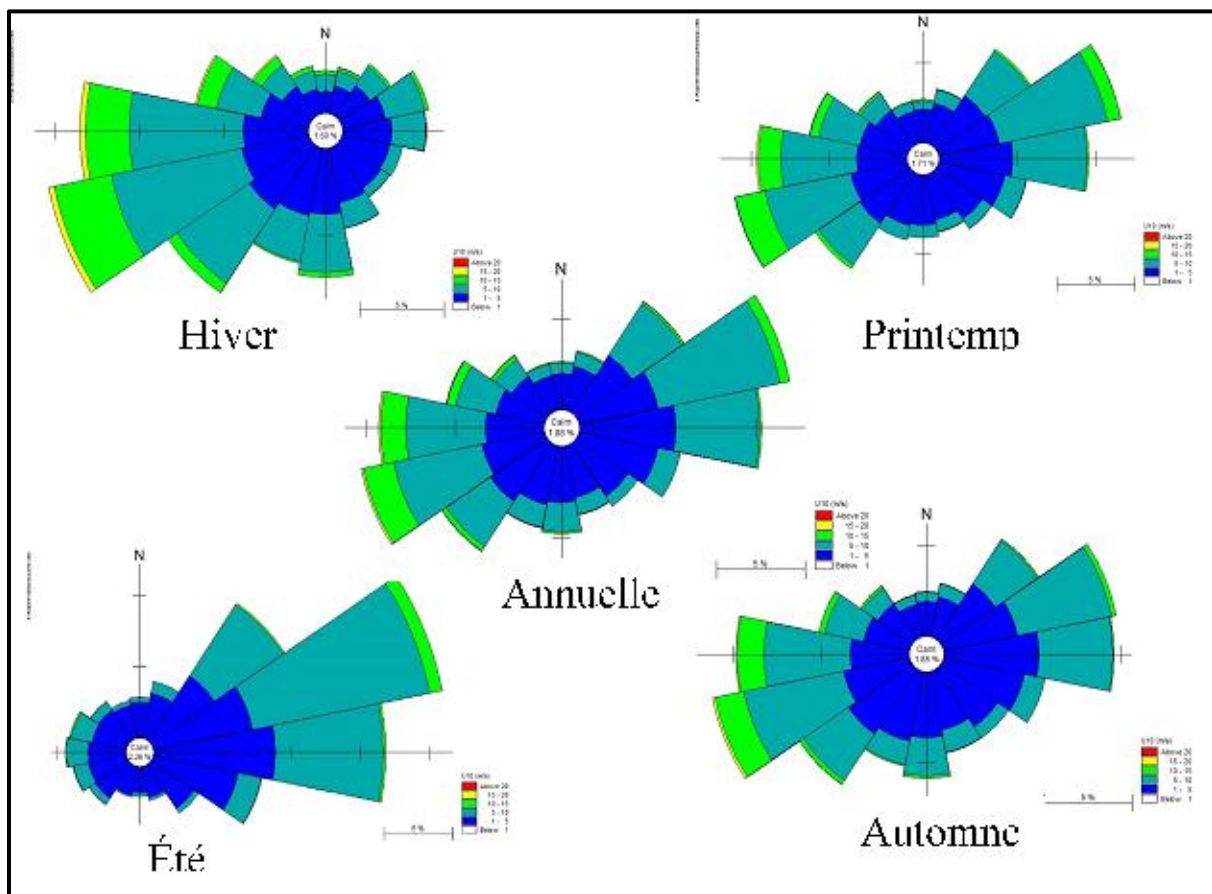


Figure II. 11 : Roses des vents au large de la baie d'Alger (1992-2021).



**Figure II. 12 :** Roses des vents au large de la baie de Zemmouri (1992-2021).

### II.6.2. La Houle

Dans toutes les études de zones côtières, l'étude de la houle est particulièrement importante pour ses impacts directs ou indirects sur la mobilité du littoral. La hauteur significative des vagues est définie comme étant la hauteur moyenne, différence de hauteur entre le creux et la crête, du tiers des ondes les plus élevées (Vanem, 2016).

L'analyse statistique des données du site [www.waveclimate.com](http://www.waveclimate.com) a permis de tracer les roses des houles trimestrielles et annuelles au large des côtes Algéroise pour la période 1992-2021 (Figures II.13, II.14 et II.15). L'analyse de ces roses révèle la prédominance des houles provenant de différents secteurs au large.

#### La baie de Bou Ismail :

Au large de la baie de Bou Ismail, les houles annuelles dominantes proviennent principalement des secteurs NE et NNE, avec plus de 40%, et des secteurs W, WNW avec environ 30%. Plus de 70% des hauteurs enregistrées de ces secteurs oscillent entre 0 m et 2,5 m, 1% des houles de secteur Ouest représentent des hauteurs allant de 2,5 m à 4 m.

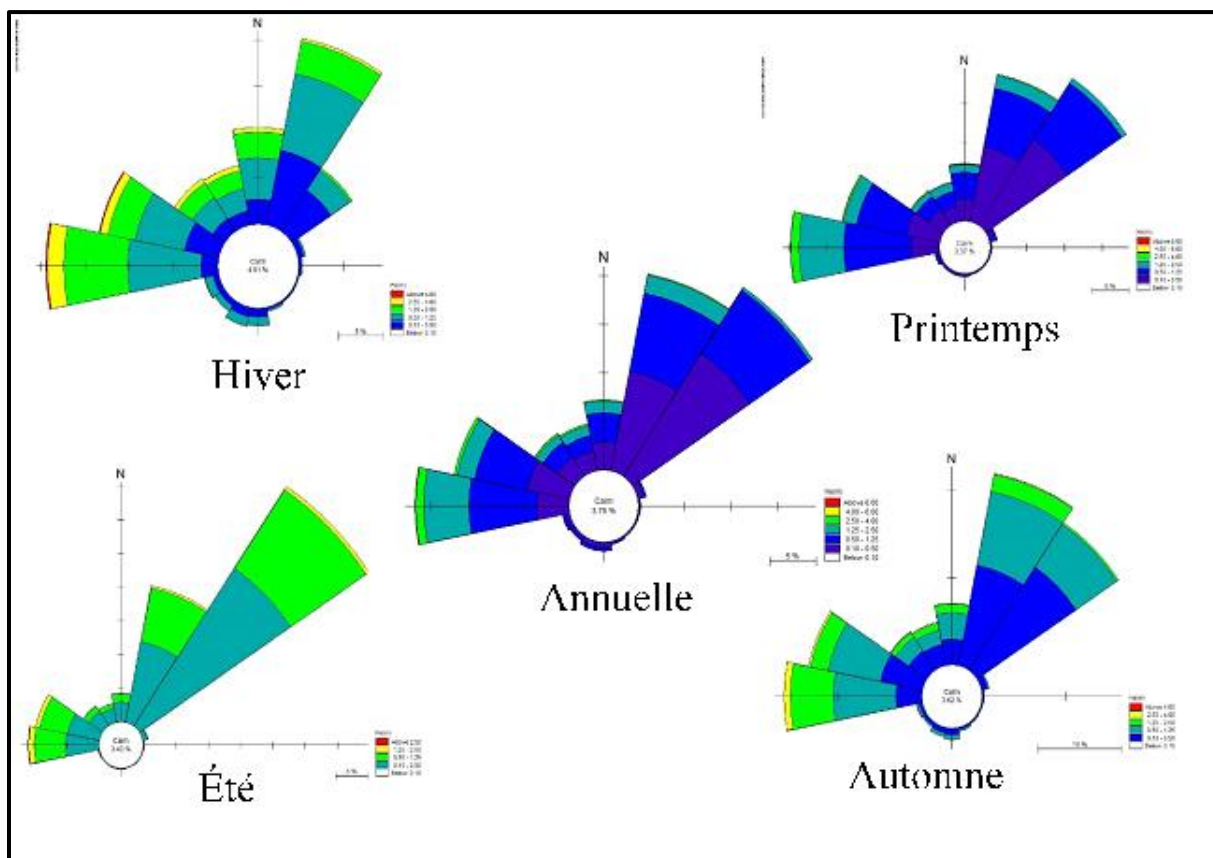
Les roses saisonnières au large de la baie de Bou Ismail montrent que :

Durant l'hiver, le maximum de fréquence provient des houles du secteur W et NNE avec respectivement des fréquences de 18% et 22% et une houle significative maximale de 6.36 m.

Au printemps, les houles plus fréquentes proviennent de secteur W, NE et NNE, elles représentent respectivement des fréquences de 23%, 25% et 21% et une houle maximale enregistrée de 4 m de secteur Ouest.

En été, ce sont les houles de secteurs NE et NNE qui sont les plus fréquentes, elles représentent respectivement des fréquences de 45% et 19 % et une houle significative maximale comprise entre 1.25 et 2.25 m.

En automne, les directions dominantes de la houle sont NNE (27%), NE (25%), W (20%) et WNW (16%). La houle maximale d'Ouest est de 4m.



**Figure II. 13 :** Roses des houles saisonnières et annuelles au large de la baie de Bou Ismail (1992-2021).

### La baie d'Alger :

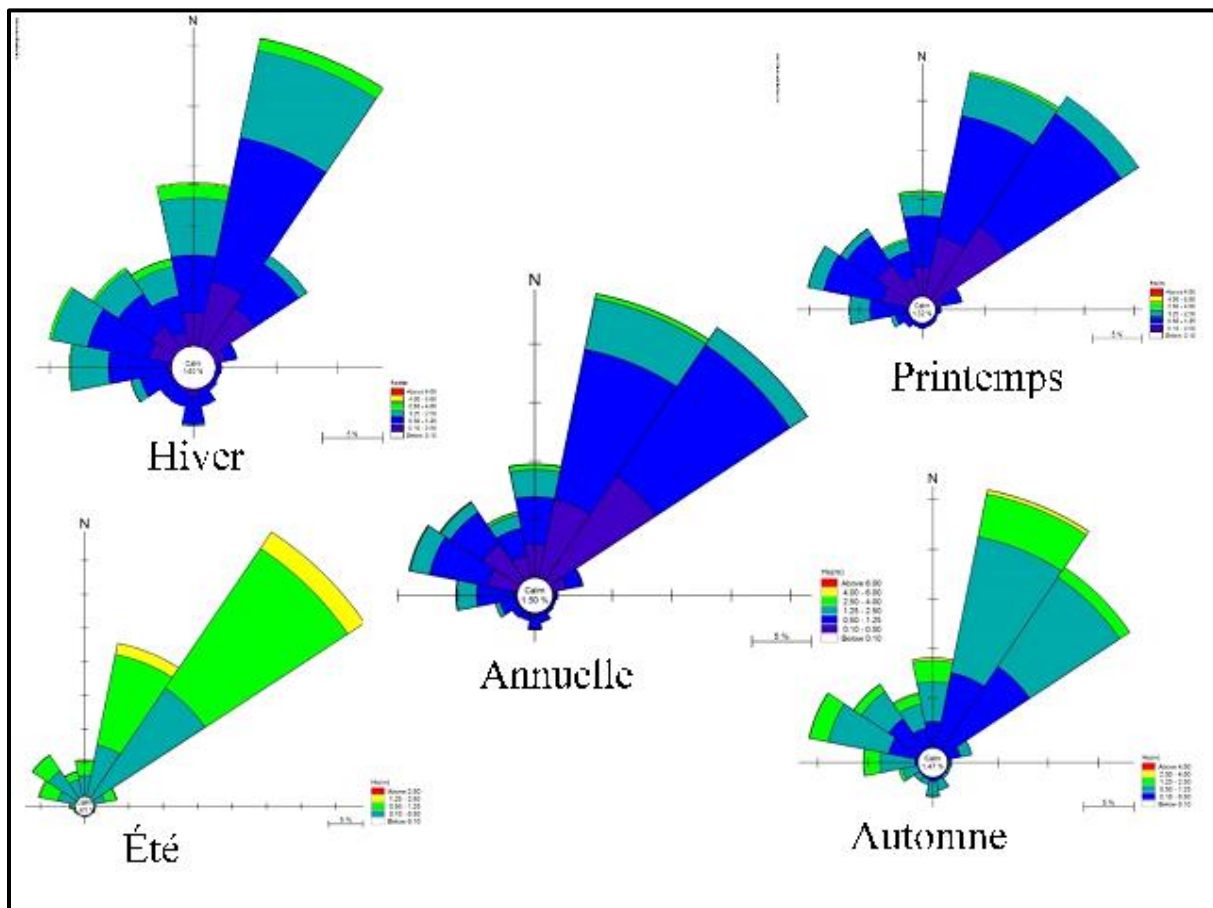
Au large de la baie d'Alger, les directions annuelles dominantes sont l'O, le NNE, le NE et l'ENE, représentant des pourcentages de 21%, 17%, 23% et 17% respectivement.

Pendant la période hivernale, les secteurs dominants sont de W avec 28%, le NNE avec 22% et NE avec 11% des observations.

Au printemps, il a été observé qu'environ 30% des houles s'approchaient de l'Ouest, 25 % des houles proviennent de direction NE, 18% de direction NNE et 15% des houles proviennent de secteur ENE.

En été, les houles dominantes proviennent de direction NE avec 35% et de secteur ENE avec 30%.

En automne, 27% des houles proviennent de secteur NNE, 23% proviennent de direction NE, 18% de secteur NW et 15% des houles proviennent de secteur N.



**Figure II. 14 :** Roses des houles saisonnières et annuelles au large de la baie d'Alger (1992-2021).

### La baie de Zemmouri :

La rose des houles annuelles montre une dominance des directions W, NE, NNE et ENE avec des pourcentages respectivement de 22%, 26%, 24% et 20%.

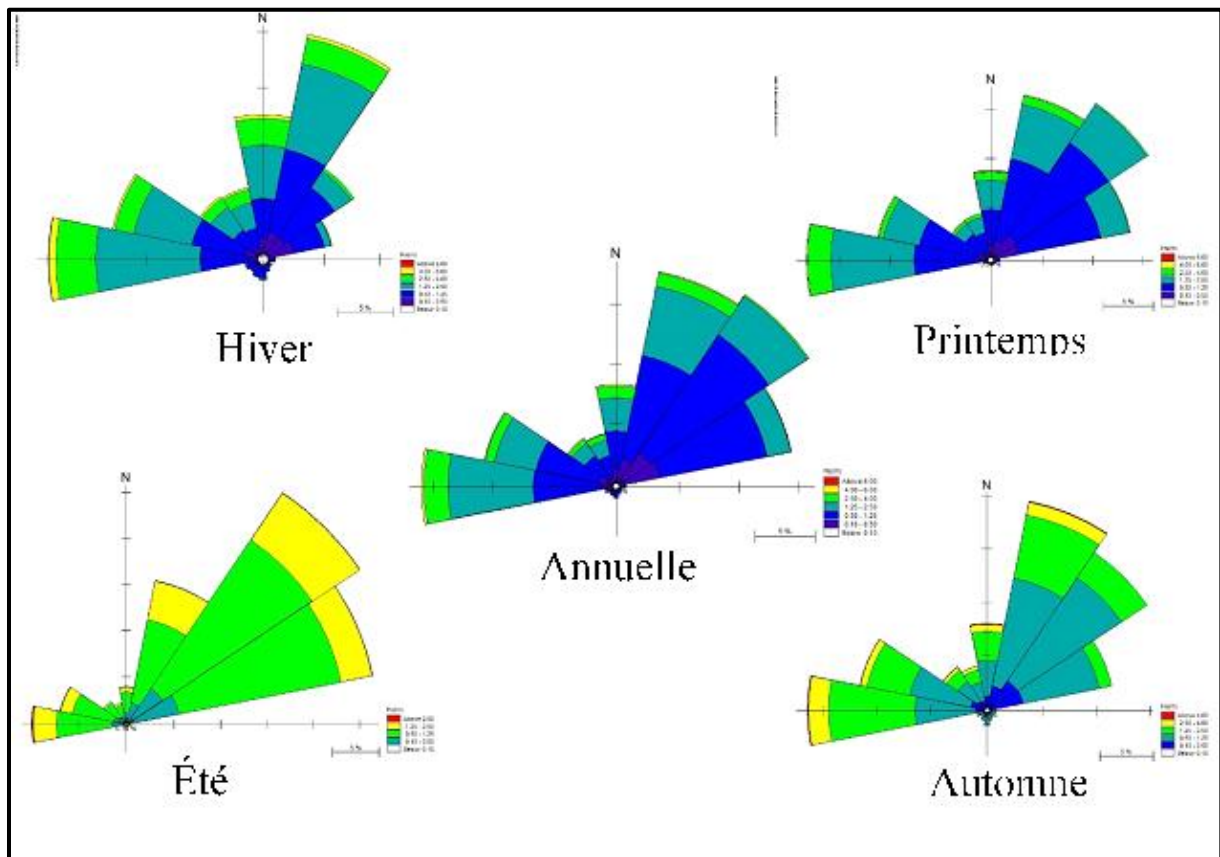
Les roses saisonnières montrent que les caractéristiques des houles au large de la zone d'étude fournissent la diversification d'une saison à l'autre :

En hiver, les houles dominantes proviennent des secteurs NNE, W, WNW et N, représentant successivement 27%, 24%, 17% et 14%.

Au printemps, les houles viennent de différentes directions, W (21%), NE (22%), NNE (19%), ENE (15%) et WNW (13%).

Durant l'été, la majorité des fréquences de houle provient du secteur NE (43%), du secteur ENE (37%) et du secteur NNE (22%).

Au printemps, les houles provenaient de différentes zones, elles sont proviennent des directions NNE (31%), W (27%), NE (26%), WNW (19%), ENE (17%) et du secteur Nord (13%).



**Figure II. 15 :** Roses des houles saisonnières et annuelles au large de la baie de Zemmouri (1992-2021).

### II.6.3. La Marée

Les marées sont des oscillations régulières du niveau de l'eau des mers et des océans sur un cycle quotidien. Cette oscillation régulière quotidienne peut aller de quelques décimètres à plus de 15 m dans certaines régions du monde. Ces fluctuations de la marée sont très importantes dans les zones côtières. Elles provoquent des inondations permanentes et épisodiques, notamment en affectant les processus physiques côtiers tels que l'élargissement vers la côte de la zone d'action des vagues. Le marnage moyen a été obtenu à partir des données du marégraphe disponible au port d'Alger. Le marnage résultant est de type microtidal. Le niveau moyen de la mer est de 40,6 cm au port d'Alger (Rami et al., 2016).

## **Chapitre III : Evolution de l'occupation des sols de la côte Algéroise**

## **Introduction :**

Le suivi de l'évolution de l'occupation des sols par la comparaison d'images Landsat de 1984, 2001 et 2021 vise à analyser en particulier les dynamiques urbaines de la région Algéroise et à évaluer la pression anthropique sur le littoral Algérois.

### **III.1 Matériel et données :**

Les images satellitaires Landsat TM, ETM+ et OLI-TIRS de 1984, 2001 et 2021 ont été utilisées pour la cartographie d'occupation du sol. La résolution de chaque image est de 30 mètres. La projection adoptée est WGS 1984, UTM-Zone 31 N. Ces scènes d'images ont été acquises pendant la période sèche (tableau III.1).

Le logiciel ArcGis 10.4 et Microsoft Excel ont été utilisés pour réaliser cette étude.

**Tableau III. 1:** Dates d'acquisition et caractéristiques des données images utilisées.

| Image             | Nombre d'images | date       | Résolution (m) |
|-------------------|-----------------|------------|----------------|
| Landsat-5 TM      | 02              | 15/08/1984 | 30             |
| Landsat-7 ETM+    | 02              | 06/08/2001 | 30             |
| Landsat-8 OLI-TIR | 02              | 05/08/2021 | 30             |

Le processus s'est déroulé en trois (03) étapes : i) Prétraitement des images satellitaires et classification ; ii) ; exécution et validation des résultats de la classification supervisée par la méthode du maximum de vraisemblance ; enfin : iii) la quantification du changement.

### **III.2 Prétraitement des images satellitaires et classification :**

La couverture de la zone d'étude a nécessité deux (02) scènes Landsat pour les années 1984, 2001 et 2021. La mosaïque des scènes par capteurs grâce à l'outil "Copy Raster" puis "mosaic to new raster" ont été effectuées sur les images ci-dessus. Ensuite l'extraction des bandes de 30 km et 3 km ont été effectuées sur chaque image (figure. III.1).

Ainsi, sur la base des connaissances de la région d'étude, acquises lors de plusieurs visites de terrain, des anciennes cartes d'occupation du sol et des images Google Earth, un regroupement des classes d'occupation du sol a été réalisé par une classification supervisée appuyée par l'algorithme du maximum de vraisemblance. Cet algorithme s'appuie sur les statistiques des zones d'entraînement, en calculant la probabilité d'appartenance d'un pixel à une classe donnée afin de l'affecter à l'occupation du sol la plus probable (Koffi Djagnikpo et al., 2017). Pour produire les cartes d'occupation du sol pour les années 1984, 2001 et 2021, au moins 50 échantillons de polygones ont été prélevés pour chaque type d'occupation du sol. Ainsi, cinq classes d'occupation du sol ont été sélectionnées en fonction de l'objectif de l'étude : les forêts, les terres agricoles, sols nus, l'eau et l'espace urbanisé.

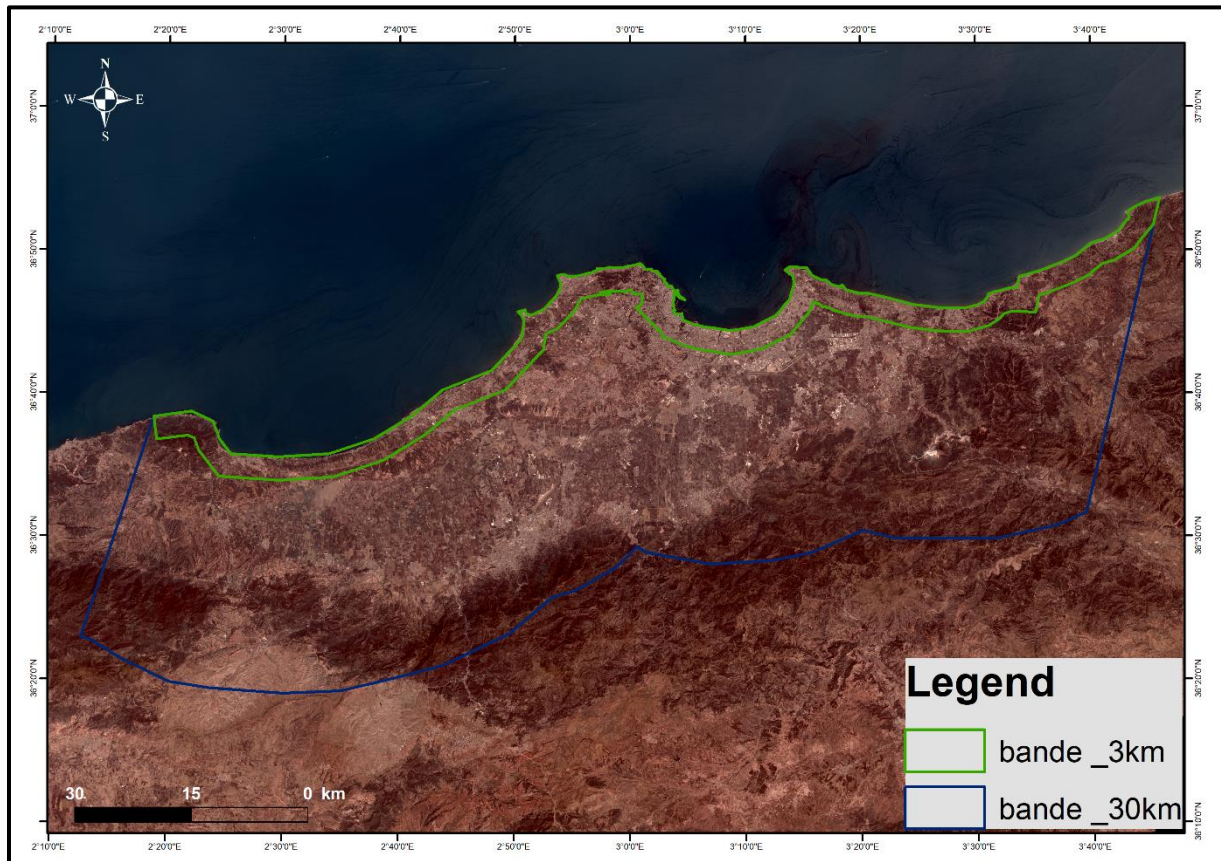


Figure III. 1 : Délimitation de la bande 3 km et 30 km de la région Algéroise.

### III.3 : Validation des classifications :

La validation des classifications a été effectuée à l'aide du coefficient de Kappa (MacQueen, 1967). Les valeurs de Kappa inférieures à 0.50, comprises entre 0.5 et 0.75 et supérieures à 0.75 indiquent respectivement une mauvaise, une acceptable et une excellente classification. Pour chaque carte d'occupation du sol, 50 points ont été utilisés pour cette évaluation. Ensuite, une comparaison diachronique des images Landsat de 1984, 2001 et 2021 a été utilisée.

Les résultats de l'analyse de la qualité des classifications supervisées effectuées révèlent que pour chacune des images de 1984, 2001 et 2021, les valeurs du coefficient Kappa (Tableau III.2 III.3 et III.4) sont respectivement de 0,78, 0,90 et 0,93, ce qui indique une discrimination statistiquement fiable entre les différentes classes d'occupation du sol. Les classifications sont donc jugées excellentes.

**Tableau III. 2 :** Matrice de confusion relative à la carte d'occupation du sol de la région Algéroise de 1984

| ClassValue | C_1 | C_2 | C_3    | C_4 | C_5 | Total | U_Accuracy | Kappa         |
|------------|-----|-----|--------|-----|-----|-------|------------|---------------|
| C_1        | 10  | 5   | 0      | 0   | 0   | 15    | 0.666      | 0             |
| C_2        | 0   | 20  | 5      | 1   | 1   | 27    | 0.7401     | 0             |
| C_3        | 0   | 0   | 11     | 0   | 0   | 11    | 1          | 0             |
| C_4        | 0   | 0   | 0      | 9   | 0   | 9     | 1          | 0             |
| C_5        | 0   | 0   | 0      | 0   | 9   | 9     | 1          | 0             |
| Total      | 10  | 25  | 16     | 10  | 10  | 71    | 0          | 0             |
| P_Accuracy | 1   | 0.8 | 0.6875 | 0.9 | 0.9 | 0     | 0.830      | 0             |
| Kappa      | 0   | 0   | 0      | 0   | 0   | 0     | 0          | <b>0.7792</b> |

**Tableau III. 3 :** Matrice de confusion relative à la carte d'occupation du sol de la région Algéroise de 2001.

| OID | ClassValue | C_1 | C_2   | C_3   | C_4 | C_5 | Total | U_Accuracy | Kappa        |
|-----|------------|-----|-------|-------|-----|-----|-------|------------|--------------|
| 0   | C_1        | 9   | 0     | 0     | 0   | 0   | 9     | 1          | 0            |
| 1   | C_2        | 1   | 20    | 1     | 0   | 1   | 23    | 0.869      | 0            |
| 2   | C_3        | 0   | 0     | 17    | 0   | 1   | 18    | 0.944      | 0            |
| 3   | C_4        | 0   | 0     | 0     | 10  | 0   | 10    | 1          | 0            |
| 4   | C_5        | 0   | 1     | 0     | 0   | 8   | 9     | 0.888      | 0            |
| 5   | Total      | 10  | 21    | 18    | 10  | 10  | 69    | 0          | 0            |
| 6   | P_Accuracy | 0.9 | 0.952 | 0.944 | 1   | 0.8 | 0     | 0.927      | 0            |
| 7   | Kappa      | 0   | 0     | 0     | 0   | 0   | 0     | 0          | <b>0.906</b> |

**Tableau III. 4 :** Matrice de confusion relative à la carte d'occupation du sol de la région Algéroise de 2021

| OID | ClassValue | C_1 | C_2 | C_3 | C_4 | C_5   | Total | U_Accuracy | Kappa        |
|-----|------------|-----|-----|-----|-----|-------|-------|------------|--------------|
| 0   | C_1        | 18  | 0   | 0   | 1   | 1     | 20    | 0.9        | 0            |
| 1   | C_2        | 0   | 10  | 0   | 0   | 0     | 10    | 1          | 0            |
| 2   | C_3        | 0   | 0   | 11  | 0   | 0     | 11    | 1          | 0            |
| 3   | C_4        | 0   | 0   | 0   | 9   | 1     | 10    | 0.9        | 0            |
| 4   | C_5        | 0   | 0   | 0   | 0   | 9     | 9     | 1          | 0            |
| 5   | Total      | 18  | 10  | 11  | 10  | 11    | 60    | 0          | 0            |
| 6   | P_Accuracy | 1   | 1   | 1   | 0.9 | 0.818 | 0     | 0.95       | 0            |
| 7   | Kappa      | 0   | 0   | 0   | 0   | 0     | 0     | 0          | <b>0.936</b> |

Les taux de changement de superficie (taux de changement global) des classes d'occupation du sol entre 1984 et 2021 ont été calculés à l'aide de l'équation proposée par la (FAO, 1996) (III.1).

$$Tg = \frac{S1-S2}{S1} * 100 \quad (III.1)$$

Avec S1 la surface d'une classe d'unité de surface à la date t1 ; S2 la surface de la même classe d'unité de surface à la date t2.

Les valeurs positives signifient une augmentation de la surface de la classe sur la période analysée, tandis que les valeurs négatives indiquent une perte de surface d'une classe entre les deux dates. Les valeurs proches de zéro indiquent une relative stabilité de la classe sur les deux périodes.

### **III.4 : Résultat et interprétation :**

#### **III.4.1 : La bande des 30km :**

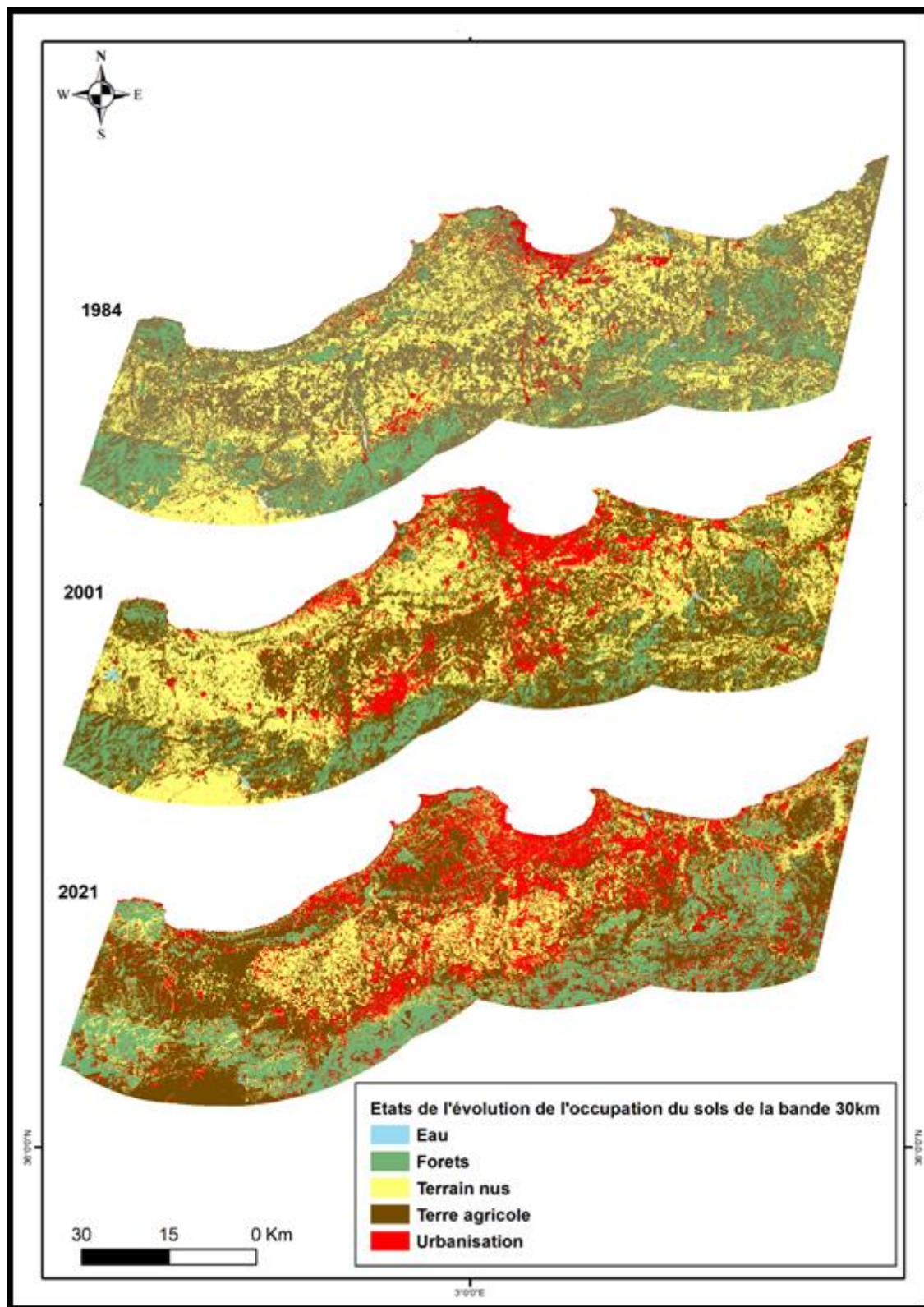
L'évolution de l'occupation du sol entre les deux dates peut être observée directement sur les cartes d'occupation du sol. Pour ce faire, nous avons adopté les mêmes symbologies (représentation cartographique) pour chaque type d'occupation du sol.

L'analyse visuelle des cartes obtenues (Figure III.2) et Figure III.3 montre que l'urbanisation se caractérise par une dynamique progressive au détriment des terres agricoles.

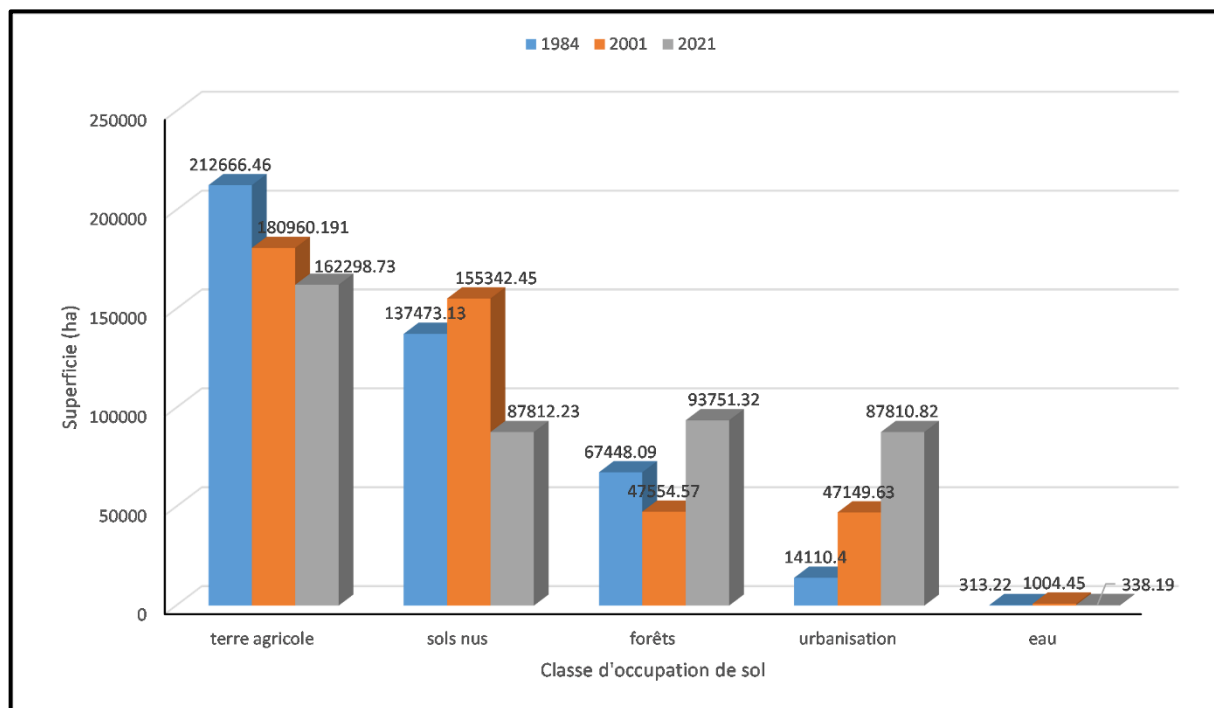
Les différentes conversions sont détaillées dans le tableau III.5. Ce tableau montre la superficie de chaque classe pour les trois années de l'étude (1984, 2001 et 2021) et l'évolution de la superficie de chaque classe pour les trois années de l'étude et l'évolution de l'utilisation des sols sur cette période de 37 ans.

La superficie de l'urbanisation, en 1984 est de 14110 ha soit 3.27% de la superficie totale de la zone étudiée (432011 ha), en 2001 la superficie de l'urbanisation est passée à 47149 ha soit 10.91% de la superficie totale, en 2021, la superficie de l'urbanisation est augmentée à 87810 ha soit 20.32% de la superficie totale. L'augmentation de la superficie urbanisée est expliquée peut-être par la croissance démographique : la population de trois wilayas côtières (Tipasa, Alger et Boumerdes) est passée de 2961317 habitants en 1987 à 4414694 habitants en 2008, soit une augmentation globale de 48.84%. En 2021, la population estimée à 5771607 habitants, soit une augmentation globale de 31% en 13 ans. La population des communes côtières Algéroise est passée de 934297 habitants en 1987 à 1403072 habitants en 2008, soit un accroissement global de 38.16%, ou une multiplication par 1,38 en l'espace de 21 ans. Environ 32% de la population totale des trois wilayas côtières réunies (Tipasa, Alger, Boumerdes) vit dans des communes côtières, selon le recensement de 2008. En outre, l'installation d'infrastructures depuis l'indépendance jusqu'à aujourd'hui, des ports de commerce et de plaisance, des villes touristiques et des hôtels ont été construits sur la bande côtière à moins de 300 m.

Nous constatons que les taux de changement global de l'occupation de sol, une diminution de la superficie des terres agricoles de 23.68% et des sols nus de 36.65%, est compensé par une augmentation de l'urbanisation de 522%, des forêts de 38.95% et de palans d'eau de 7.97%.



**Figure III. 2 :** Cartes d'occupation du sol de 1984, 2001 et 2021 de la région Algéroise.



**Figure III. 3 :** Evolution des classes d'occupation du sol de la bande 30 km de 1984 à 2021.

**Tableau III. 5 :** Evolution des occupations du sol dans la bande de 30 km entre 1984 et 2021 dans la région Algéroise.

| Occupation du sol | Superficie (ha) |           |           | Variation (%) 1984-2021 |
|-------------------|-----------------|-----------|-----------|-------------------------|
|                   | 1984            | 2001      | 2021      |                         |
| Terres agricoles  | 212666.46       | 180960.19 | 162298.73 | -23.68                  |
| Sols nus          | 137473.13       | 155342.45 | 87812.23  | -36.65                  |
| Forêts            | 67448.09        | 47554.57  | 93751.32  | 38.99                   |
| Urbanisation      | 14110.4         | 47149.63  | 87810.82  | 522.31                  |
| Eau               | 313.22          | 1004.45   | 338.19    | 7.97                    |

#### III.4.1 La bande des 3km :

L'analyse visuelle des cartes obtenues (figure III.4) montre que l'urbanisation est concentrée dans la baie d'Alger en 1984 puis progresse en 2001 vers l'est et l'ouest de la baie. En 2021, la quasi-totalité du littoral Algérois est occupée par l'urbanisation.

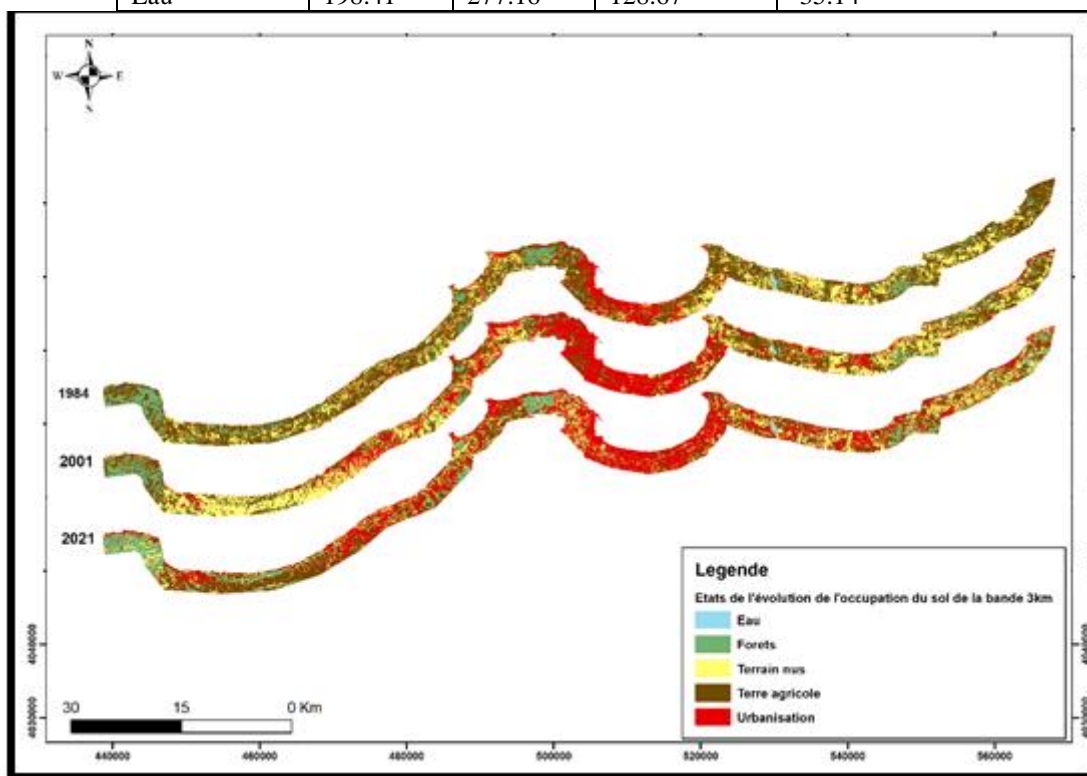
La superficie du littoral Algérois (du Mont Chenoua à l'Ouest à Cap Djenet à l'Est) est de 46363 ha. L'analyse des changements de l'occupation du sol a permis de conclure que la classe d'urbanisme a progressé de 4482.59 ha soit 9.75% en 1984, à 12950.19 ha soit 27.93% en 2001 et à 16115.54 ha soit 34.75% en 2021. La superficie de l'urbanisation en 2021 montre la littoralisation du littoral Algéroise.

Le taux global de changement entre 1984 et 2021 de l'utilisation des terres dans le littoral Algérois se caractérise par une diminution de -41,69% des terres agricoles, -12,21% des sols

nus et -35,14% des plans d'eau qui sont transformés par une augmentation de 259,51% de l'urbanisation et de 19,04% des forêts (tableau III.6).

**Tableau III. 6 :** Evolution des occupations du sol dans la bande de 3 km entre 1984 et 2021 dans la région Algéroise.

| Occupation du sol | Superficie (ha) |           |          | Variation (%) 1984-2021 |
|-------------------|-----------------|-----------|----------|-------------------------|
|                   | 1984            | 2001      | 2021     |                         |
| Terres agricoles  | 25714.47        | 15942.24  | 14992.09 | -41.69                  |
| Sols nus          | 10978.65        | 14345.215 | 9637.30  | -12.21                  |
| Forêts            | 4989.6          | 2848.94   | 5489.84  | 19.04                   |
| Urbanisation      | 4482.59         | 12950.19  | 16115.54 | 259.51                  |
| Eau               | 198.41          | 277.16    | 128.67   | -35.14                  |



**Figure III. 4 :** Cartes d'occupation du sol de 1984, 2001 et 2021 de la côte Algéroise.

### III.5 Conclusion :

Les résultats obtenus lors de la classification d'images à l'aide de l'algorithme du maximum de vraisemblance semblent être très satisfaisants (valeurs élevées obtenues pour les précisions de classification et des coefficients Kappa). Ces résultats confirment que le littoral Algérois a subi des changements en termes d'utilisation du sol au cours de cette période de 37 ans (entre 1984 et 2021). Ces changements concernent un étalement urbain important au détriment des terres agricoles et des sols nus, qui sont en régression.

## **Chapitre IV :**

**Hydrodynamique sédimentaire du littoral de la baie de Bou Ismail, baie d'Alger et la baie de Zemmouri**

## **IV.1 Introduction**

La connaissance des conditions de la houle à la côte est nécessaire pour quantifier leur contribution aux différents processus littoraux, niveaux marins, courants côtiers, dynamique sédimentaire, en effet, la houle tend à augmenter le niveau de la mer dans les zones de déferlement. De plus, la houle, conjuguée à des niveaux marins élevés peut entraîner des phénomènes de franchissement par paquets de mer et en conséquence des submersions en arrière de frange côtière.

La zone de déferlement est le siège d'une intense activité sédimentologique. Dans certaines conditions de mer à faible marnage, où le déferlement se produit toujours dans la même zone, une forte accumulation de matériaux sous forme de barre qui provoque et facilite le déferlement. Le déferlement des vagues engendre des courants (de dérive, de retour, d'arrachement) qui vont à leur tour agir sur le processus de déferlement et ainsi de suite. Si la direction des houles incidentes n'est pas perpendiculaire à la côte, une forte composante parallèle à la côte est générée, conduisant aux courants de dérive. Le transport de sédiments non cohésifs dépend des mouvements d'eau générés soit par les courants, soit par les vitesses orbitales liées à la houle, soit le plus souvent par une combinaison de ces deux phénomènes. Les sédiments transportés par ces courants constituent la dérive littorale des sédiments. Les houles associées aux courants côtiers sont les facteurs générateurs du transport côtier du sable. Les estimations de la dérive littorale des sédiments doivent reposer sur des études analytiques de l'évolution du trait de côte prenant en compte le régime des houles et des courants dans le secteur d'étude sur une période assez longue.

La modélisation numérique marine est cruciale pour la simulation et la prévision des phénomènes maritimes. Divers logiciels développés par des institutions académiques et des entreprises privées sont disponibles. En effet, les modèles numériques permettent la prédiction des marées, des courants et des processus côtiers. Ils évaluent également l'impact des infrastructures côtières et des changements environnementaux. La modélisation numérique est donc un outil précieux pour la prise de décisions éclairées dans la gestion des zones marines, la planification des infrastructures et la préservation des écosystèmes côtiers (Remya et al., 2012).

La suite du logiciel MIKE 21, développée par DHI, permet de modéliser numériquement le transport sédimentaire intégrant l'ensemble des paramètres entrant en jeu dans cette problématique en prenant en compte un couplage dynamique entre la propagation de la houle, la courantologie et le transport sédimentaire.

Afin de comprendre le fonctionnement hydrosédimentaire du littoral Algérois, une modélisation véritablement bidimensionnelle de la propagation de la houle, de la courantologie et du transport sédimentaire est mise en œuvre.

## **IV.2. Présentation de la modélisation :**

### **IV.2.1. Principe de la modélisation :**

Le principe général et les phases de la modélisation mises en œuvre pour étudier les mouvements sédimentaires dans les trois baies (Bou Ismail, Alger, Zemmouri) :

- Modélisation de la propagation de la houle à l'échelle de la Baie
- Modélisation de la propagation de la houle à l'échelle de la plage
- Détermination de conditions climatologiques représentatives
- Modélisation couplée propagation de houle / courantologie / transport sédimentaire à l'échelle locale basée sur les conditions représentatives définies au préalable.

En absence de mesure, la caractérisation des vagues au droit des sites d'étude n'est pas immédiate. C'est pourquoi, pour connaître les conditions de houle au voisinage des côtes, il est nécessaire de calculer au moyen d'un modèle numérique la propagation et la génération des houles depuis le large, ou elles sont connues, jusqu'au littoral.

La première phase consiste en la détermination des caractéristiques de houle (hauteur, période et direction) au large des trois baies. Vu qu'il n'existe pas de données de houlographe à proximité du site d'étude, cette phase préalable se base sur une modélisation à l'échelle de chaque baie.

La deuxième phase vise à condenser la climatologie au large issue de la phase précédente en quelques conditions représentatives qui permettront de restituer les courants engendrés par la réfraction et le déferlement de la houle, le transport sédimentaire annuel dans la zone d'étude.

La troisième phase consiste à déterminer les taux de transport sédimentaire à partir des conditions climatologiques représentatives définies au cours de la deuxième phase. Cette phase se fait à l'échelle rapprochée au site d'étude afin de bien décrire les contraintes de radiations issues du déferlement des houles.

Les deuxième et troisième phases ont pour but de restituer le transport sédimentaire bidimensionnel annuel à partir d'un nombre restreint de conditions. Cette démarche est essentielle à la compréhension des mécanismes influençant le transport sédimentaire.

L'extension géographique des différents modèles utilisés au cours des phases de modélisation de cette étude sera fournie dans les sections suivantes.

### **IV.2.2. Présentation du modèle :**

Le modèle numérique utilisé dans le cadre de cette étude est le MIKE21-DHI de l'institut hydraulique Danois qui est un puissant système de modélisation numérique des phénomènes physiques (Houle, Courant et Transport sédimentaire), il permet de faire des simulations à grande échelle et d'augmenter la résolution des mailles de calculs à certains endroits du domaine simulé à l'aide de grilles imbriquées.

Mike 21 est un modèle de houle spectrale basé sur la conservation de la densité de l'action d'onde qui permet de simuler la propagation des états de mer dans les domaines offshore et côtier. Le modèle inclut les effets de la réfraction et de shoaling liés aux variations de bathymétrie, la génération de la houle par action du vent, la dissipation de la houle. La résolution par méthode des volumes finis se base sur le maillage flexible composé d'éléments triangulaire dans le plan horizontal. Ces éléments peuvent être affinés dans les zones d'études d'intérêt particulier (DHI, 2014).

Une étude bidimensionnelle de la propagation de la houle, de la courantologie et du transport sédimentaire est mise en œuvre ; celle-ci est effectuée avec les modules HD, SW et ST, respectivement, de la suite du logiciel MIKE 21. Une courte description de ces modules est donnée ci-après.

Dans un premier temps, il s'agit de déterminer à l'aide du modèle SW le climat de houles dans la région d'intérêt (sur une grande échelle). Les sortants de ce module ainsi que les niveaux d'eau aux frontières ouvertes de la grille de calculs hydrodynamiques et les vents en surface permettront de calculer les courants causés par l'effet combiné des vents et des houles au moyen du module HD. Finalement, les courants générés par le module HD et les données de houles générées par le module SW seront pris en entrée par le modèle de transport de sédiment ST qui calcul alors le transport de sédiments à chaque pas temporel des simulations hydrodynamiques ainsi que le transport net de sédiments durant la période de simulation.

### ○ **Mesh generator**

Le Mesh Generator de Mike 21 est un outil conçu pour créer des maillages numériques flexibles et fixes pour les modèles MIKE Zéro avec une possibilité d'ajustement de la résolution de la maille. L'outil offre deux options d'interpolation pour les éléments triangulaires, le voisin naturel et l'interpolation linéaire, qui peuvent être utilisées indépendamment du type de maillage. De plus, la fonction d'imbrication de plusieurs maillages est disponible pour le maillage fixe (DHI, 2014). Pour la création de la Mesh avec le module 'Mesh Generator', on a utilisé :

1. Un système de projection adapté à notre zone d'étude : WGS\_84\_UTM\_ZONE\_31,
2. Le trait de côte et la bathymétrie de la zone enregistrés dans un fichier (.xyz),
3. Un maillage flexible avec des tailles de maille différentes pour obtenir des résultats précis et réduire les temps de calcul du logiciel.

### ○ **MIKE 21 SW**

MIKE 21 SW est le module de propagation de la houle spectrale. Le modèle simule la propagation, l'évolution et la transformation des vagues générées par les vents et des houles au large et dans les zones côtières. Il prend en compte la génération de la houle par action du vent, les interactions non linéaires vague-vague ; la Dissipation due au frottement sur le fond ; la Dissipation due au déferlement ; la Réfraction et le Shoaling due à la variation de la profondeur ; les Interactions vagues-courants et les effets de la variation temporelle de la profondeur.

Mike 21 SW comprend deux formulations, la première est la formulation entièrement spectrale qui est caractérisée par l'équation de conservation de l'action des vagues et la deuxième est la formulation paramétrique découplée directionnelle qui consiste à paramétrer l'équation de conservation de l'action des vagues cette dernière est basée dans le domaine fréquentiel en introduisant le zéro et le premier moment du spectre d'action des ondes.

Les principales applications du modèle MIKE 21 SW sont :

- Conception et optimisation des structures de défense des ports et marinas contre les vagues.
- Etablissement du climat des vagues dans une région côtière en fonction des vagues du large.

- Génération des cisaillements de radiations des vagues pour le calcul des courants côtiers par MIKE 21/3
- Couplage avec les modèles de transports de sables et de boues dans les zones littorales.

### Equations en eaux profondes :

Le modèle est basé sur la résolution des équations tridimensionnelles incompressibles de Reynolds moyennées de Nâvier-Stokes, sous les hypothèses de Boussinesq et de pression hydrostatique (Boussinesq, 1872; Jeschke et al., 2017). L'équation de continuité locale s'écrit comme suit :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = s \quad (\text{éq IV.1})$$

Et les deux équations d'impulsion horizontale pour les composantes x et y sont respectivement :

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial \eta p}{\partial y} + \frac{\partial w u}{\partial z} = f v - g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{1}{\rho_o} \frac{\partial p_a}{\partial x} - \\ \frac{g}{\rho_o} \int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial x} dz - \frac{1}{\rho_o h} \left( \frac{\partial s_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{xy}}{\partial y} \right) + F_u + \frac{\partial}{\partial z} \left( v_t \frac{\partial u}{\partial z} \right) + u_s s \quad (\text{éq IV.2}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial \eta p}{\partial y} + \frac{\partial w u}{\partial z} = f v - g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{1}{\rho_o} \frac{\partial p_a}{\partial x} - \\ \frac{g}{\rho_o} \int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial x} dz - \frac{1}{\rho_o h} \left( \frac{\partial s_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{xy}}{\partial y} \right) + F_u + \frac{\partial}{\partial z} \left( v_t \frac{\partial u}{\partial z} \right) + u_s s \quad (\text{éq IV.3}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial v^2}{\partial y} + \frac{\partial u v}{\partial x} + \frac{\partial w v}{\partial z} = f u - g \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{1}{\rho_o} \frac{\partial p_a}{\partial y} - \\ \frac{g}{\rho_o} \int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial y} dz - \frac{1}{\rho_o h} \left( \frac{\partial s_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{yy}}{\partial y} \right) + F_v + \frac{\partial}{\partial z} \left( v_t \frac{\partial v}{\partial z} \right) + v_s s \quad (\text{éq IV.4}) \end{aligned}$$

Où (t est le temps ; x, y et z sont les ordinales cartésiennes :  $\eta$  est l'élévation de la surface : d est la profondeur d'eau :  $h = \eta + d$  est la profondeur d'eau totale : u, v et w sont la vitesse composante dans les directions x, y et z :  $f = 2\Omega \sin\Phi$  est le paramètre de Coriolis ( $\Omega$  est la vitesse angulaire et  $\Phi$  la latitude géographique) : g est l'accélération de gravité :  $\rho$  est la densité de l'eau ;  $S_{xx}$ ,  $S_{xy}$ ,  $S_{yx}$  et  $S_{yy}$  sont des composantes du tenseur radial.  $v_t$  est la viscosité verticale turbulente.  $p_a$  est la pression atmosphérique :  $\rho_o$  est la densité de référence de l'eau. S est l'amplitude du débit dû aux sources ponctuelles et ( $u_s$ ,  $v_s$ ) est la vitesse à laquelle l'eau est rejetée dans l'eau ambiante.

Les termes de contrainte horizontale sont décrits à l'aide d'une relation gradient-contrainte, qui est simplifiée en :

$$F_u = \frac{\partial}{\partial x} \left( 2A \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( A \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right) \quad (\text{éq IV.6})$$

$$F_v = \frac{\partial}{\partial x} \left( A \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( 2A \frac{\partial v}{\partial y} \right) \quad (\text{éq IV.7})$$

A est la viscosité horizontale

Les conditions aux limites de surface et de fond pour u, v et w sont :

$$A z = \eta$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + u \frac{\partial \eta}{\partial x} + v \frac{\partial \eta}{\partial y} - w = 0, \left( \frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \frac{1}{\rho_0 v_t} (\tau_{sx}, \tau_{sy}) \quad \text{éq IV.8}$$

$$A z = -d$$

$$u \frac{\partial d}{\partial x} + v \frac{\partial d}{\partial y} + w = 0, \left( \frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \frac{1}{\rho_0 v_t} (\tau_{bx}, \tau_{by}) \quad \text{éq IV.9}$$

Où  $(\tau_{sx},)$  et  $(\tau_{bx},)$  sont les composantes x et y des contraintes de vent de surface et de fond.

### Équations de conservation de l'action des vagues :

L'équation déterminante est l'équation d'équilibre de l'action des vagues formulée en coordonnées cartésiennes ou sphériques.

#### Coordonnées cartésiennes :

En coordonnées cartésiennes horizontales, l'équation de conservation de l'action des vagues peut s'écrire (DHI, 2016):

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{v}N) = \frac{S}{\sigma} \quad \text{éq IV.10}$$

Où  $N(x^{\vec{}} , \sigma, \theta, t)$  est la densité d'action,  $t$  est le temps,  $x^{\vec{}} = (x, y)$  est les coordonnées cartésiennes,  $v^{\vec{}} = (C_x, C_y, C_\sigma, C_\theta)$  est la vitesse de propagation d'une onde de groupe dans l'espace à quatre dimensions  $x, c$  et  $\$,$  et  $S$  est le terme source de l'équation du bilan énergétique.  $\nabla$  est l'opérateur différentiel à quatre dimensions dans l'espace  $x^{\vec{}} , \sigma, \theta$  et  $S.$

Les quatre vitesses de propagation caractéristiques sont données par :

$$(c_x, c_y) = \frac{d\vec{x}}{dt} = \vec{c}_g + \vec{U} \quad \text{éq IV.11}$$

$$c_\sigma = \frac{d\sigma}{dt} = \frac{\partial \sigma}{\partial d} \left[ \frac{\partial d}{\partial t} + \vec{U} \cdot \nabla_{\vec{x}} d \right] - c_g \vec{k} \cdot \frac{\partial \vec{U}}{\partial s} \quad \text{éq IV.12}$$

$$(c_x, c_y) = \frac{d\vec{x}}{dt} = \vec{c}_g + \vec{U} \quad \text{éq IV.13}$$

$$c_\theta = \frac{d\theta}{dt} = -\frac{1}{k} \left[ \frac{\partial \sigma}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial m} + \vec{k} \cdot \frac{\partial \vec{U}}{\partial m} \right] \quad \text{éq IV.14}$$

$S$  est la coordonnée spatiale dans la direction d'onde  $\theta,$  et  $m$  est une coordonnée perpendiculaire à  $S.$   $\nabla_{x^{\vec{}}}$  est l'opérateur bidimensionnel différentiel dans l'espace  $x^{\vec{}}.$

- MIKE 21 HD

MIKE 21 HD constitue le noyau de la suite logicielle MIKE 21 en fournissant les paramètres hydrodynamiques nécessaires aux autres modules. C'est un modèle bidimensionnel pour les calculs hydrodynamiques à surface libre qui permet de simuler les variations du niveau d'eau et des écoulements, moyennés sur la colonne d'eau, en fonction des paramètres de forçage des zones côtières et du large. Le modèle hydrodynamique de MIKE 21 est utilisé pour simuler de nombreux phénomènes hydrauliques dont la marée, les courants induits par le vent et la houle ainsi que les surcotes. MIKE 21 HD prend également en compte les phénomènes d'immersion et émergence des côtes (Than, 2015b).

L'équation en eau peu profonde dans le système de coordonnées Cartésien L'intégration des équations de quantité de mouvement horizontale et l'équation de continuité de la profondeur  $h=\eta+d$  en eau peu profonde produisent (DHI, 2016; Than, 2015b):

a. Equation de continuité :

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} = hS \quad \text{éq IV.15}$$

B. Equation de conservation du mouvement :

$$\begin{aligned} \frac{\partial hu}{\partial t} + \frac{\partial hu^2}{\partial x} + \frac{\partial hvu}{\partial y} = fvh - gh \frac{\partial \eta}{\partial t} - \frac{h}{\rho_o} \frac{\partial P_a}{\partial x} \\ - \frac{gh^2}{2\rho_o} \frac{\partial \rho_w}{\partial x} + \frac{\tau_{sx}}{\rho_o} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_o} - \frac{1}{\rho_o} \left( \frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} (hT_{xx}) + \frac{\partial}{\partial x} (hT_{xy}) + hu_s S \quad \text{éq IV.16} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial hv}{\partial t} + \frac{\partial huv}{\partial x} + \frac{\partial hv^2}{\partial y} = fuh - gh \frac{\partial \eta}{\partial t} - \frac{h}{\rho_o} \frac{\partial P_a}{\partial y} \\ - \frac{gh^2}{2\rho_o} \frac{\partial \rho_w}{\partial y} + \frac{\tau_{sy}}{\rho_o} - \frac{\tau_{by}}{\rho_o} - \frac{1}{\rho_o} \left( \frac{\partial S_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} (hT_{xy}) + \frac{\partial}{\partial x} (hT_{yy}) + hv_s S \quad \text{éq IV.17} \end{aligned}$$

Où :

- t : Temps ;
- x, y, z : Coordonnées cartésiennes ;
- $\eta$  : Hauteur de la surface ;
- d : Profondeur de l'eau ;
- h : Profondeur totale de l'eau,  $h = \eta + d$  ;
- f : Paramètre de Coriolis,  $f = 2\Omega \sin\theta$  ;
- $\Omega$  : vitesse angulaire de révolution ;
- $\theta$  : Latitude géographique ;
- $\rho_w$  : Densité de l'eau ;
- $p_a$  : Pression atmosphérique ;
- $\rho_o$  : Densité de référence de l'eau ;
- u, v, w : Composantes de la vitesse du courant dans les directions x, y, et z;
- $S_{xy}, S_{yx}, S_{xx}, S_{yy}$  : Composantes du tenseur de rayonnement ;
- $\nu_t, A$  : Viscosités turbulentes verticale et horizontale, respectivement ;
- S : Amplitude de la décharge causée par des sources ponctuelles ;
- ( $u_s, v_s$ ) : Vitesses par laquelle l'eau est déchargée dans l'eau ambiante ;

$(\tau_{sx}, \tau_{sy}), (\tau_{bx}, \tau_{by})$  : Composantes x et y des contraintes de cisaillement du vent de surface et du fond, respectivement, la barre supérieure décrit une valeur moyenne.

u, v : les vitesses des courants à la profondeur moyenne sont définies par :

$$h\bar{u} = \int_{-d}^{\eta} u dz \quad \text{éq IV.18}$$

$$h\bar{v} = \int_{-d}^{\eta} v dz \quad \text{éq IV.19}$$

Les contraintes latérales  $T_{ij}$  comprennent le frottement visqueux, l'advection différentielle et le frottement turbulent. Ils sont estimés à l'aide d'une viscosité turbulente sur la base de la formulation des gradients de vitesse moyenne de la profondeur :

$$\begin{aligned} T_{xx} &= 2A \frac{\partial u}{\partial x'} \\ T_{xy} &= A \left( \frac{\partial u}{\partial y'} + \frac{\partial v}{\partial x'} \right) \\ T_{yy} &= 2A \frac{\partial v}{\partial y} \end{aligned} \quad \text{éq IV.20}$$

#### ○ MIKE 21 ST

MIKE 21 ST calcule le transport sédimentaire sur le fond et en suspension sous l'action combinée des courants et de la houle. Dans la zone de déferlement, les courants de retour sont inclus. Le modèle est déterministe et demande un minimum de calibration. Les taux initiaux de sédimentation/érosion sont calculés sur base de l'équation de conservation de la masse sédimentaire.

Le module ST peut calculer les taux de transport des sédiments à l'aide de deux modèles différents : courant de retour, combiné des courants et de la houle.

Deux méthodes disponibles pour calculer le ST dans des conditions combinées de vagues et de courant. La méthode Bijker et la méthode STP (Sediment Transport Program) de DHI.

La principale équation qui permet de mesurer le transport sédimentaire par la méthode STP est :

$$q_{tp} = q_b + q_s \quad \text{éq IV.21}$$

Où  $q_{tp}$ ,  $q_b$ , et  $q_s$  sont le transport total des sédiments, le transport par charriage et le transport par suspension.

#### à).Transport par charriage

##### à.1).Transport par charriage des sables

Le transport sans dimension par charriage  $\Phi_b$  se fait par un model déterminé par (Engelund and Fredsoe 1976) :

$$\Phi_b = 5p(\sqrt{\bar{\phi}'} - 0.7\sqrt{\bar{\phi}_c}) \quad \text{éq IV.22}$$

Où  $\theta'$  est la contrainte de cisaillement sans dimension,  $p$  est la probabilité que toutes les particules d'une couche s'orientent, elles sont données par :

$$p = \left[ 1 + \left( \frac{\frac{\pi}{6}\beta}{\theta' - \theta_c} \right)^4 \right]^{-1/4} \quad \text{éq IV.23}$$

$$\theta' = \frac{u_f'^2}{(s-1)gd} \quad \text{éq IV.24}$$

Où  $\theta_c$  est le paramètre de Shields critique :

$$\theta_c = \theta_{c,0} \left( \frac{-\cos\psi \sin\beta + \sqrt{u_s^2 + \cos^2\beta - \sin^2\psi \sin^2\beta}}{u_s} \right) \quad \text{éq IV.25}$$

Où

- $\mu_s$  est un coefficient de frottement statique ( $\mu_s = \tan\phi_s$ ,  $\phi_s$  = angle de repose) ;
- $\theta_{c,0}$  est le paramètre de Shields critique sur le fond plat ;
- $\psi$  est l'angle entre le courant et la direction de la pente ;
- $\beta$  est la pente du fond.

A l'aide de l'équation  $\phi_b = 5p(\sqrt{\theta'} - 0.7\sqrt{\theta_c})$ , on peut calculer les moyennes temporelles (DHI 2014) :

$$\phi_{b1} = \frac{1}{T} \int_0^T \phi_b(t) \cos(\phi(t)) dt \quad \text{éq IV.26}$$

$$\phi_{b2} = \frac{1}{T} \int_0^T \phi_b(t) \sin(\phi(t)) dt \quad \text{éq IV.27}$$

$$\phi_{b2} = \phi_{b2} \sqrt{(s-1)gd_{50}^3} \quad \text{éq IV.28}$$

Où :

- $\Phi_{b1}$  est le transport par charriage sans dimension dans le sens du courant moyen ;
- $\Phi_{b2}$  est le transport par charriage sans dimension perpendiculaire à la direction moyenne du courant ;
- $\phi(t)$  est la direction de l'écoulement instantané ;
- $q_{b1}$  est le transport par charriage dans le sens de courant moyen ;
- $q_{b2}$  est le transport par charriage perpendiculaire à la direction moyenne du courant.

## A.2).Transport par charriage des sables grossiers

Le rapport des forces pour un mouvement unique pour un sédiment d'une particule sphérique peut être calculé comme suit (DHI 2014) :

$$\bullet \quad V(s + C_m) \frac{dU_{b,x}}{dt} = 0.5 \cdot C_D A U_{r,x} |\overline{U_r}| + V_m \frac{dU_{0,x}}{dt} - g(s-1)V(\mu_d \cos\alpha \cos\beta_x + \sin\beta_x) \quad \text{éq IV.29}$$

- $V(s + C_m) \frac{dU_{b,y}}{dt} = 0.5. C_D A U_{r,y} |\overline{U_r}| + V_m \frac{dU_{0,y}}{dt} - g(s - 1)V(\mu_d \cos \alpha \cos \beta_y + \sin \beta_x)$  **éq IV.30**
- $\rho s = \frac{dy}{dx} = \tau_b - \tau_c - n(F_d + F_i + F_g)$  **éq IV.31**
- $\phi_c = \frac{\tau_c}{\rho g(s-1)D} = \frac{4\mu_s}{3\alpha^2 C_d} = \left(1 - \frac{1}{g(s-1)\mu_s} \frac{dU_{0,w}}{dt} \text{sign}(U_{0,w})\right)$  **éq IV.32**
- $\phi_c = \phi_{c,0} \left( \frac{-\cos \psi \sin \beta + \sqrt{u_s^2 + \cos^2 \beta - \sin^2 \psi \sin^2 \beta}}{u_s} \right)$  **éq IV.33**

Où

- V est le volume de la particule de sédiment,  $V = (\pi D^3/6)$  ;
- $\rho$  est la densité du sédiment ;
- D est la taille du grain des sédiments ;
- $C_m$  est le coefficient de masse hydrodynamique ;
- A est l'aire de la surface du sédiment de particules,  $A = (\pi D^2/4)$  ;
- s est la densité spécifique des sédiments ;
- $\mu_d$  est le coefficient de frottement dynamique ;
- $C_d$  est le coefficient de traînée ;
- $U_b$  est la vitesse des particules dans le mouvement orbital ;
- $\mu_s$  est le coefficient de frottement statique ( $\mu_s = \tan \phi_s$ ,  $\phi_s =$  angle de repose) ;
- $\alpha$  est le coefficient sans dimension ;
- $U_0$  est la vitesse d'écoulement oscillant près du fond ;
- $U_r$  est le rapport de la vitesse d'écoulement dans la direction x :  $U_r = U_0 - U_b$  ;
- $(U_r)$  est la vitesse d'écoulement à la profondeur moyenne dans la direction x ;
- x et y sont des indices qui indiquent les projections en x et direction y.

$$\frac{d\overline{q_b}}{dt} = V \frac{d(n\overline{U_b})v}{dt} \quad \text{éq IV.34}$$

- $\overline{U_b}$  est la vitesse des particules à la profondeur moyenne ;
- $\overline{q_b}$  est le transport par charriage à la profondeur moyenne ;
- $T_c$  est la contrainte de cisaillement critique du fond ;
- $\tau_b$  est la contrainte de cisaillement du fond ;
- n est le nombre de particules en mouvement des sédiments ;
- $F_i$  est la force d'inertie ;
- $F_d$  est la force de traînée ;
- $F_g$  est la force de gravité.

#### b).Transport par suspension

Ce transport de sédiments est déterminé comme le produit de la concentration de sédiments instantané et des vitesses instantanées du débit (Vu, 2018):

$$q_s = \frac{1}{T} \int_0^T \int_{2d}^D (u \cdot C) dz dt \quad \text{éq IV.35}$$

○ **Modèle couplé MIKE21/3 FM**

MIKE 21/3 Modèle Couplé FM est un modèle de la série d'outils MIKE, qui a été développé par le (DHI). Ce modèle utilise la méthode des volumes finis avec une approche de maillage flexible. Il a été appliqué dans les domaines des environnements océanographiques, côtiers et estuariens.

Les deux principaux modules du modèle sont l'hydrodynamique et les spectres de vagues, ce qui permet de modéliser l'interaction mutuelle entre la vague et le courant en deux et trois dimensions.

Le modèle MIKE 21 Flow FM comprend six modules intitulés Hydrodynamique (Moussaid et al. 2015) Transport, Module Ecologie, Transport de la boue, Suivi des particules et Transport du sable. Le module HD est une étape préalable pour les cinq autres modules. Les équations proposées par le programme sont celles de (de Saint-Venant 1871) en deux dimensions.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} + \frac{\partial r}{\partial x} = Q_l \quad \text{éq IV.36}$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{q^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{qr}{h} \right) = -gh \frac{\partial z}{\partial x} - g \frac{\sqrt{q^2 + r^2} q}{C^2 h^2} + C_x + D_x + W_x + T_x + S_x \quad \text{éq IV.37}$$

$$\frac{\partial r}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{qr}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{r^2}{h} \right) = -gh \frac{\partial z}{\partial y} - g \frac{\sqrt{q^2 + r^2} r}{C^2 h^2} + C_y + D_y + W_y + T_y + S_y \quad \text{éq IV.38}$$

Où

$D_x, C_x, T_x, W_x, S_x$  et  $D_y, C_y, T_y, W_y, S_y$  représentent la variation de la densité, la force de Coriolis, l'effet de la turbulence, l'effet du vent et le flux de quantité de mouvement.

$Q_l$  est le volume entrant par unité de temps et par unité de surface.

### IV.2.3. Construction du modèle

#### IV.2.3 .1. Emprise du modèle, bathymétrie et pas de maille

Emprise du modèle Mike 21 couvre une zone s'étendant d'environ 185 km de Cap Djenet à l'Est jusqu'à Bou Ismail à l'Ouest, répartie sur trois baies (Baie de Bou Ismail, Baie d'Alger et la baie de Zemmouri). L'extension géographique du modèle et la localisation des données bathymétriques sont illustrées sur les figures IV.1 à IV.6.

##### a- Emprise et bathymétrie

Les changements morphologiques du domaine marin et les migrations longitudinales et/ou transversales des corps sédimentaires ont pu être observés sur des cartes bathymétriques. Au total 03 cartes bathymétriques ont été acquises pour les trois baies (Bou Ismail, Alger et Zemmouri).

La bathymétrie a été obtenue par la digitalisation de la carte publiée par NAVIONICS SonarChart™, édition 2021 à l'échelle de 1/250000 avec une résolution qui varie entre 100 et 0,5m du large vers la côte. Cette base de données a été complétée par plusieurs levés au large

réalisés par GEBCO, afin d'obtenir une carte globale de la région à partir de la ligne de côte jusqu'au large (plus de 100 m de profondeur).

Pour cela on a utilisé le logiciel **ArcGIS 10.4** qui est une suite de logiciels d'information géographique (SIG) développés par la société américaine Esri (Environmental Systems Research Institute). Il est composé de plusieurs modules connectés entre eux (ArcMap, ArcScène, ArcCatalogue, ...).

L'utilisation des données bathymétriques sur Mike21, nécessite la transformation du shapfile d'ArcMap de la bathymétrie en fichiers XYZ, avec l'outil de conversion d'ArcToolBox.

Suite à la génération de la mesh, une interpolation des points de la bathymétrie selon le maillage de la mesh est nécessaire.

Les méthodes d'interpolation sont variables indépendamment du type de maillage utilisé. Le générateur de maillage offre deux possibilités d'interpolation pour les éléments triangulaires. Les deux méthodes d'interpolation possibles sont le voisin le plus proche et l'Interpolation linéaire (DHI, 2014).

### **b- Création 2D Bathymétries sous le maillage**

Le module "*Mesh Generator*" nous offre un environnement pour la création, l'édition et la présentation de bathymétries numériques 2D détaillées. "*Mesh Generator*" génère un format souple de maillage (\*.MESH).

Le programme nous fournit les utilitaires pour importer des données du trait de côte, notamment les bathymétries. Pour faciliter le processus d'élaboration manuelle des données et leur présentation, des cartes graphiques des images de fond peuvent être importées et superposées aux données bathymétriques.

Diverses options d'interpolation sont disponibles pour fournir la meilleure méthode possible pour notre type de données. Lorsque la bathymétrie a été préparée, nous pouvons utiliser les utilitaires d'exportation de données bathymétriques de sortie dans différents formats.

La création d'une bathymétrie est généralement divisée en les phases suivantes : le choix du système de projection, le traitement des données bathymétriques XYZ, la génération du maillage et l'interpolation des valeurs bathymétriques sur le maillage.

Le maillage est composé d'éléments triangulaires dont la taille a été ajustée suivant les évolutions bathymétriques et la précision souhaitée. Le pas de maille varie de 300m environ dans la zone offshore entre les isobathes -50 à -20 m puis passe à l'ordre de 10m dans la zone côtière comprise entre l'isobathe -20 m et les terres.

La carte bathymétrique du modèle est obtenue par interpolation des sondes bathymétriques et des levés topographiques sur le maillage ainsi définis. La bathymétrie obtenue (Figure IV.2, IV.4 et IV.6) présentent des valeurs comprises entre -500m et 0m par rapport au zéro hydrographique.

### **IV.3 Résultats et discussions :**

#### **IV.3.1 Interprétation des résultats bathymétriques des trois Baies :**

##### **IV.3.1.1 Bathymétrie de la Baie de Bou-Ismaïl :**

La bathymétrie obtenue pour la baie de Bou-Ismaïl présente des valeurs comprises entre -1 m et -200 m au large. Bien que l'étude bathymétrique nécessite une précision assez importante pour les calculs hydrodynamiques.

L'analyse de cette carte fait ressortir deux zones :

La zone Ouest : L'analyse de la carte bathymétrique de cette zone montre des isobathes presque parallèle à la ligne de côte, très serrés entre -1 et -35m, cela est due généralement à morphologie complexe des fonds et les conditions hydrodynamiques ce qui montre une pente abrupte. Au-delà de cette profondeur, les isobathes se réorganisent et deviennent parallèle et un peu espacées vers le large.

La zone Est : les isobathes de cette zone sont irrégulières et bien espacés en comparaisant avec la première zone.

L'analyse de la carte bathymétrique de la première zone d'étude montre des isobathes plus au moins régulières, espacées et parallèles à la côte. La morphologie sous-marine dans la partie Ouest de la zone d'étude (plage Chenoua et Grand bleu) est légèrement chahuté jusqu'à -20 m, par contre la partie Est de cette zone (plage Matares) présente des isobathes plus espacées.

L'analyse de la carte bathymétrique de la deuxième zone montre des isobathes plus au moins régulières et parallèles à la côte. La zone présente un fond marin assez régulier dont les isobathes sont très rapprochées traduisant une pente abrupte. Cependant la partie Ouest de cette zone présente une barre sous-marine et ce n'est qu'à partir de -5 m que ces isobathes redeviennent régulières traduisant une pente plus douce, généralement dû au rapport solide de l'Oued.

L'analyse de la carte bathymétrique de la partie de la baie d'El Djamila met en évidence deux zones : Une zone entre 0 et -5m, il y a un resserrement des isobathes ce qui indique une pente moins douce, avec la présence de petites fosses au voisinage des ouvrages. Cela témoigne d'une hydrodynamique important dans cette zone.

Une zone comprise entre -5 et -8m, avec des isobathes bien espacés qui présentent un fond relativement régulier et une pente douce.

La zone du large montre des isobathes généralement régulières (entre -8 à -60 m), parallèles au rivage, elles sont relativement espacées traduisant ainsi un fond régulier.

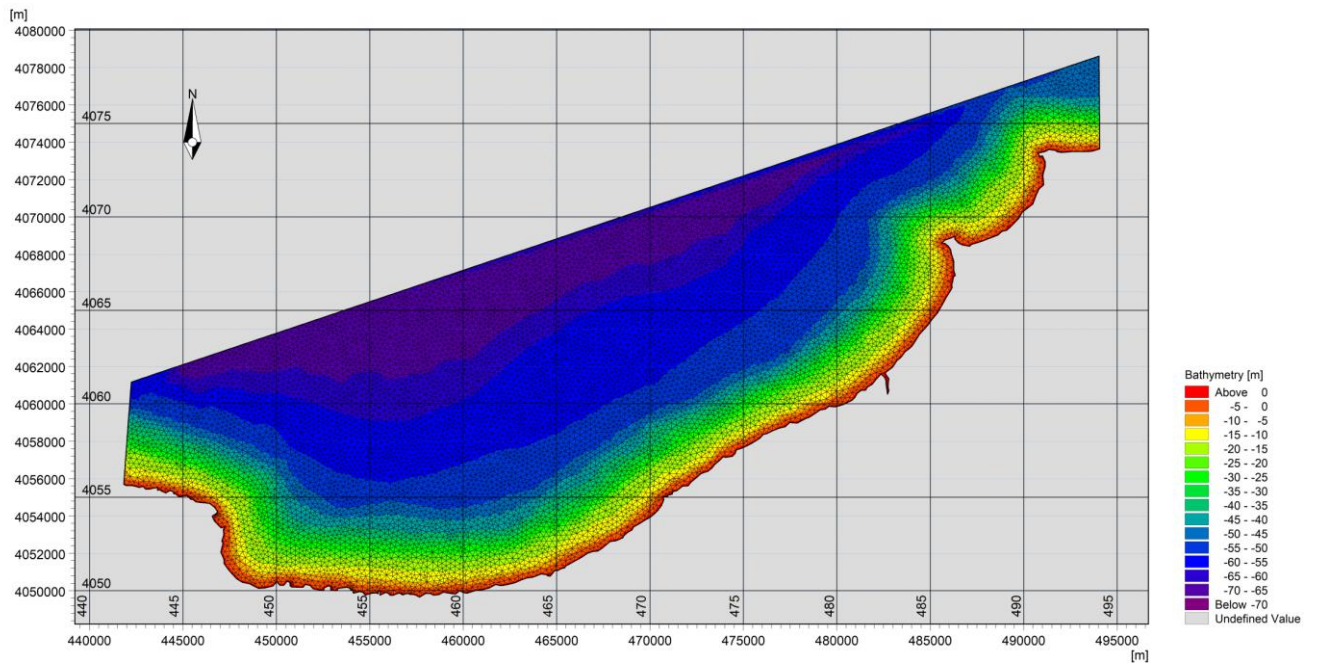


Figure IV. 1 : Emprise et maillage du modèle côtier de la baie de Bou Ismail.

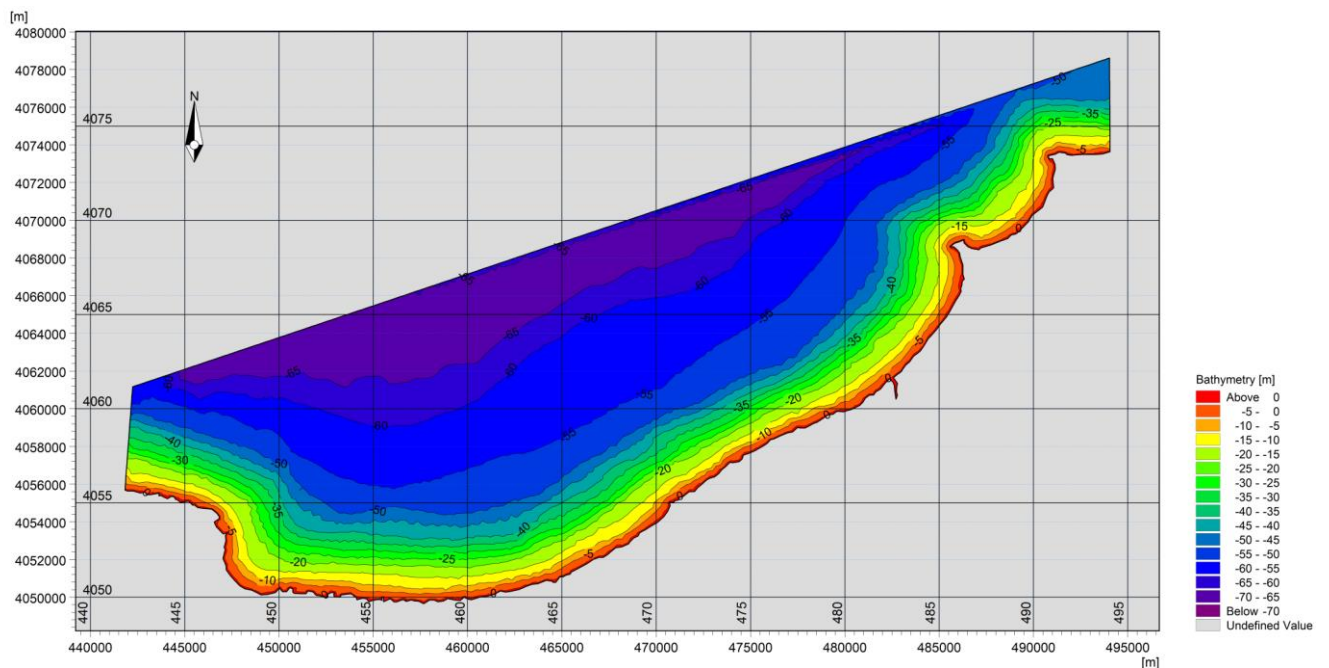


Figure IV. 2 : Carte bathymétrique de la baie de Bou Ismail.

#### IV.3.1.2 Bathymétrie de la Baie d'Alger

Après avoir conçue les cartes bathymétriques de la baie d'Alger, nous avons pu faire les constatations suivantes :

Deux zones morphologiques bien distinctes sont mises en évidence :

- **Une zone au large** : montre des isobathes généralement régulières (entre 8 à 60 m), parallèles au rivage, elles sont relativement espacées traduisant ainsi un fond régulier.

Ces fonds sont moins actifs par rapport à la zone côtière. Cependant, à l'Est de Cap Matifou, les isobathes sont serrées, ce qui présente probablement des fonds rocheux.

- **Une zone côtière :** montre des isobathes généralement hétérogènes bien serrés (entre 1 à 8 m) et une morphologie particulière caractérisée par la présence de rides d'avant côte discontinue, cette irrégularité est due au rapport de l'Oued el Harrache et l'implantation des ouvrages de protections (Sablette,...). La zone Est de la baie d'Alger est caractérisée par une topographie complexe et la nature du fond marin dépend essentiellement des fluctuations hydrométéorologiques.

Bien que l'étude bathymétrique nécessite une précision assez importante pour les calculs hydrodynamiques. Des zones d'étude ont été choisies sur ce littoral.

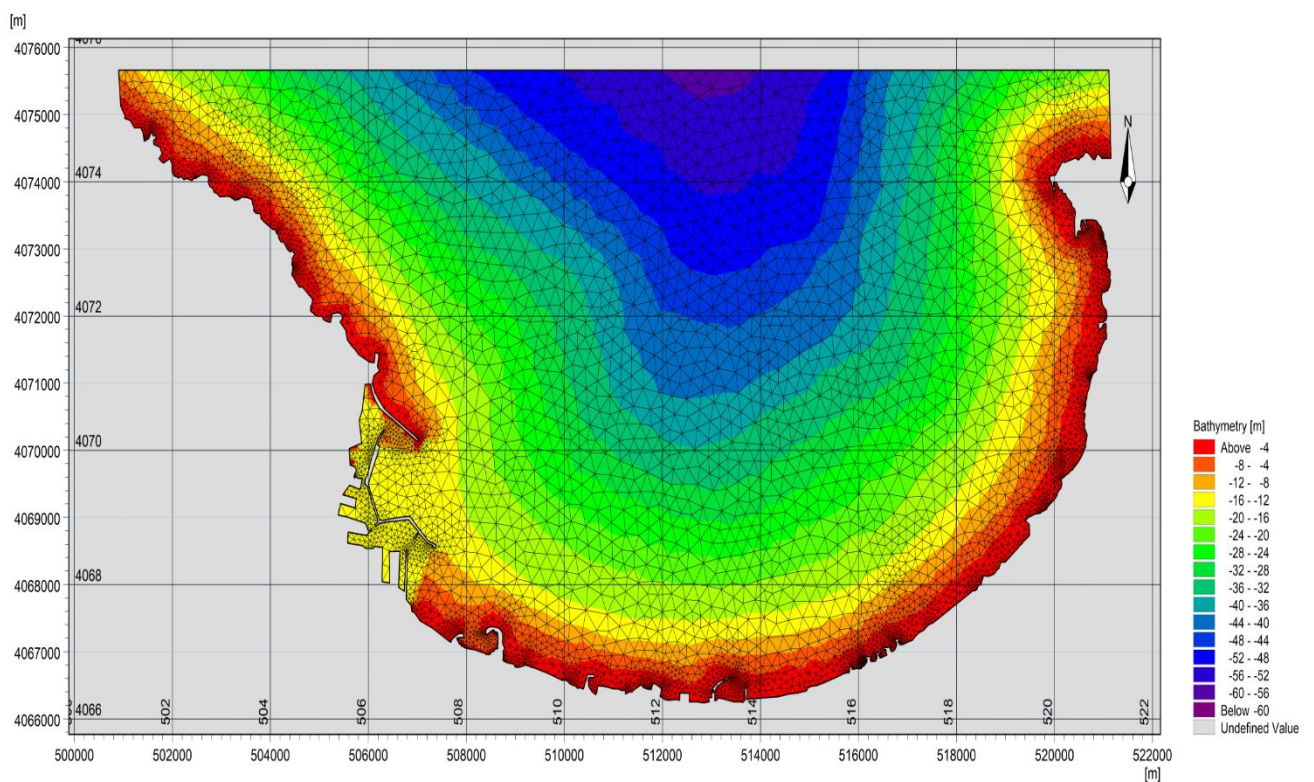
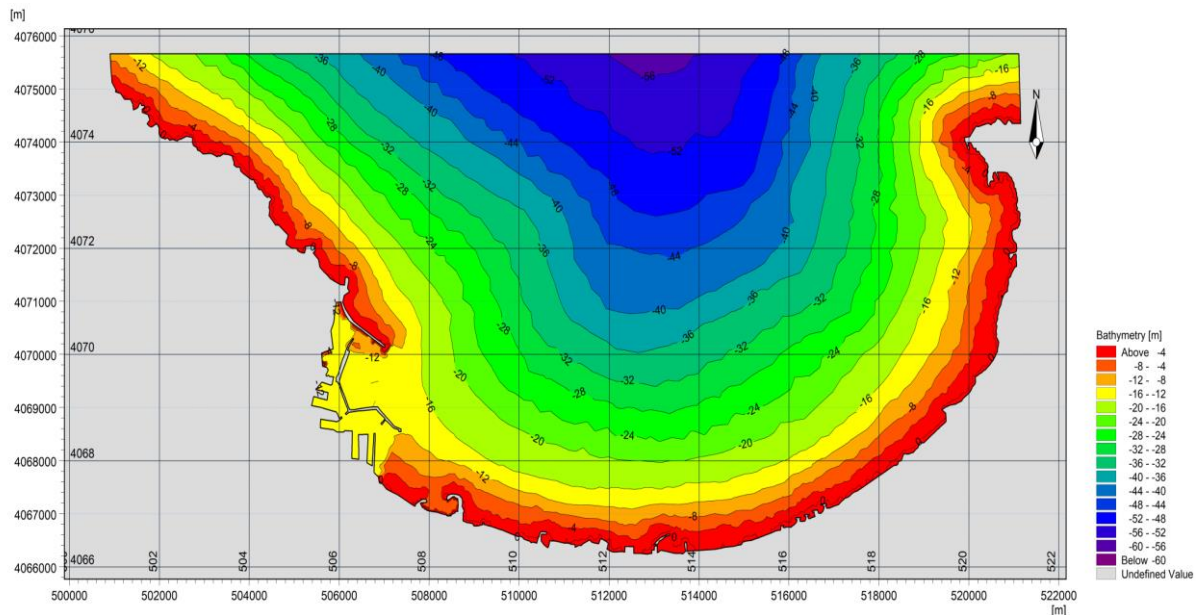


Figure IV. 3 : Emprise et maillage du modèle côtier de la baie d'Alger.



**Figure IV. 4 :** Carte bathymétrique de la baie d'Alger.

#### IV.3.1.3 Bathymétrie de la Baie de Zemmouri :

L'analyse de la carte bathymétrique (figure IV.6) de baie de Zemmouri, fait ressortir deux zones morphologiques bien distinctes sont mises en évidence :

- **La zone côtière :** montre des isobathes généralement perturbées (entre 1 à 10 m) et une morphologie particulière caractérisée par la présence de rides d'avant côte discontinue (séparés par un sillon), bien développée à l'approche de la côte et par des fosses de lévigation. Ce type de morphologie témoigne d'une mobilité de ces fonds sous l'action des houles et les courants engendrés avec ses houles. Par conséquent, cette zone est caractérisée par une topographie complexe et la nature du fond marin dépend essentiellement des fluctuations hydrométéorologiques.

La zone présente un fond marin assez régulier dont les isobathes sont très rapprochées traduisant une pente abrupte. Cependant la partie Ouest de la Baie de Zemmouri présente deux irrégularité où on constate une variation de la pente qui devienne un peu douce au niveau de Boudouaou Elbahri et aussi aux allant tour de Ain Taya qui est probablement dû aux apports des sédiments terrigènes par l'Oued de Boudouaou et Oued Réghaia respectivement et la présence des ouvrages de protection dans cette zone qui perturbe la dynamique sédimentaire et ce n'est qu'à partir de -5 m que ces isobathes redeviennent régulières.

- **La zone au large :** présence des isobathes parallèles au rivage, elles sont relativement espacées traduisant ainsi un fond régulier. Ces fonds sont moins actifs par rapport à la zone côtière. Cependant, à l'est de Cap Djenet, les isobathes sont serrées, ce qui présente probablement un petit chenal avec une pente moyenne de 1 %

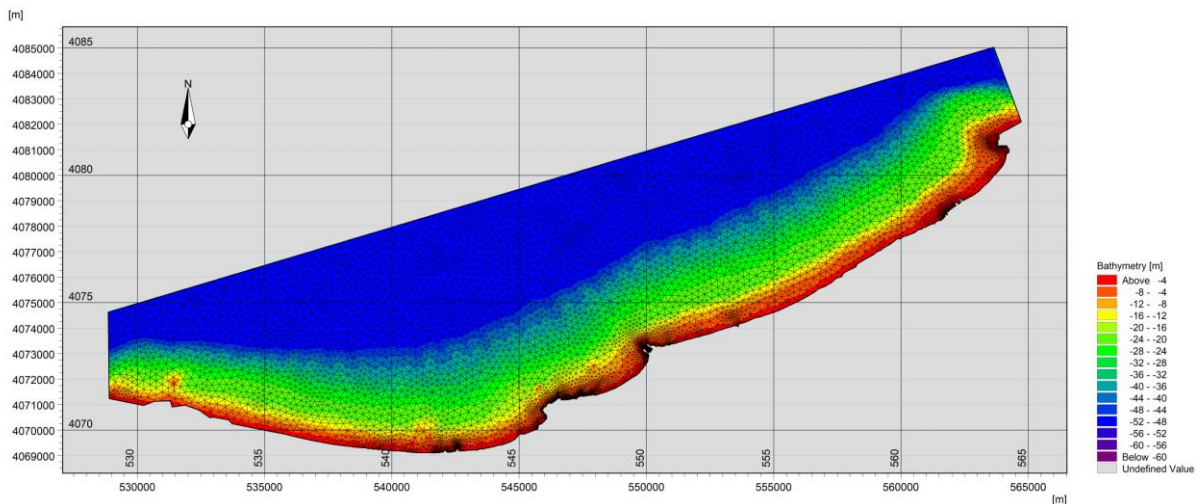


Figure IV. 5 : Emprise et maillage du modèle côtier de ma baie de Zemmouri.

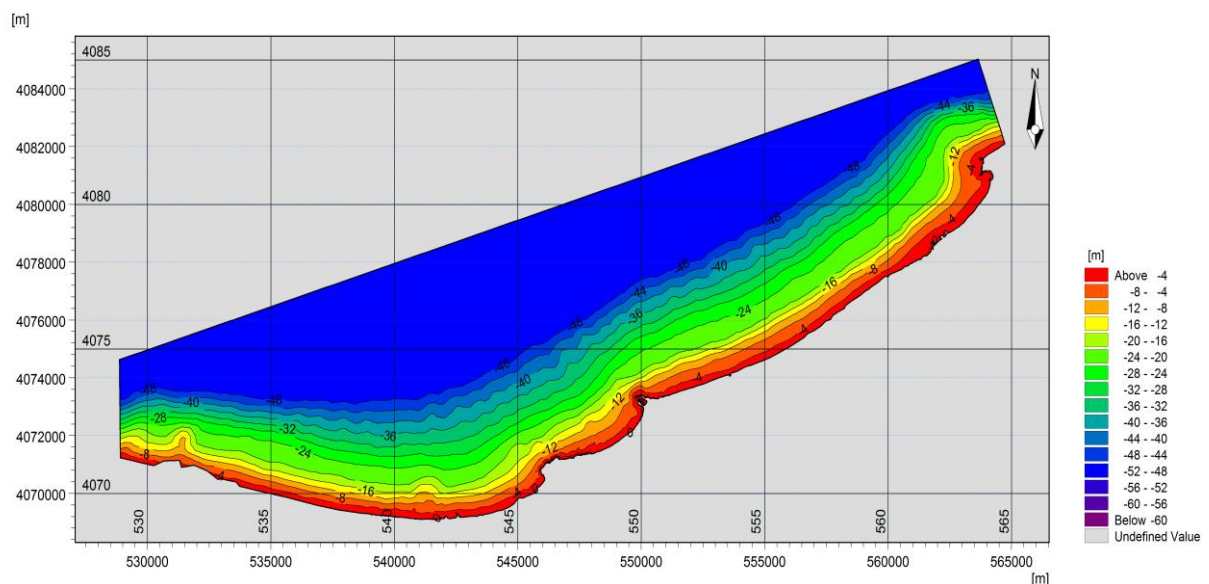


Figure IV. 6 : Carte bathymétrique de la baie de Zemmouri.

#### IV.4 Modélisation de la houle au large à l'aide du code de calcul (SW-Mike21) :

Pour simuler la propagation de la houle du large vers la côte, nous avons choisi la formule directionnelle dans le domaine spectral et la formule quasi stationnaire dans le domaine temporel. L'algorithme d'itération Newton-Raphson avec les valeurs par défaut a été utilisé.

##### a. Données d'entrée et calibration du modèle SW

Le but du calibrage est de régler le modèle afin de reproduire les conditions connues ou mesurées pour une situation particulière.

Les paramètres de calibrage utilisés pour le modèle MIKE 21 SW sont la résolution dans l'espace géographique et spectral, le frottement du fond, et les paramètres de déferlement.

Pour valider le modèle hydrodynamique, plusieurs données ont été introduites, la bathymétrie et la donnée d'entrées et les conditions limites.

Pour la génération des simulations, nous avons pris les trois directions de la houle les plus dominantes et les plus fréquentes dans les trois baies (Nord, Nord-Est, et Nord-Ouest). Ces

données sont extraites à partir du site web [www.climatewave.com](http://www.climatewave.com). L'analyse de ces données a déjà été présentée dans le chapitre II.

En parallèle, une vitesse de vent pour chaque direction est prise en considération. Il est important de préciser que dans le présent travail, nous avons pris trois paramètres de la houle pour définir les conditions limites (hauteur significative, période de la houle et la direction) comme suit (Tableau IV.1).

**Tableau IV. 1** : Les caractéristiques des houles incidentes (hauteur, période, direction) (Source [www.waveclimate.com](http://www.waveclimate.com)).

|                    | <b>(Hauteur significative Hs)</b> | <b>Tp (Période)</b> | <b>Dir (Direction)</b> |
|--------------------|-----------------------------------|---------------------|------------------------|
| Baie de Zemmouri   | 2.56m                             | 8.00s               | 45°N                   |
|                    | 2.64m                             | 8.10s               | 360°N                  |
|                    | 3.25m                             | 8.25s               | 315°N                  |
| Baie d'Alger       | 2.56m                             | 8.00s               | 45°N                   |
|                    | 2.64m                             | 8.10s               | 360°N                  |
|                    | 3.25m                             | 8.25s               | 315°N                  |
| Baie de Bou Ismail | 3.10m                             | 8.56s               | 45°N                   |
|                    | 3.17m                             | 8.71s               | 360°N                  |
|                    | 3.79m                             | 9.25s               | 315°N                  |

## B. Configuration du module SW :

Afin de simuler la propagation de la houle du large vers la côte, l'équation choisie est la formule directionnelle dans le domaine spectral et la formule quasi-stationnaire dans le domaine temporel. L'algorithme d'itération Newton-Raphson avec les valeurs par défaut a été utilisé.

### Données d'entrée et calibration :

Plusieurs types de données sont nécessaires pour cette étude. Celles-ci seront insérées en entrée du modèle de MIKE 21 Spectral Waves FM . Les différentes données utilisées sont mentionnées ci-dessous :

- Bathymétrie ;
- Des Directions des houles dominantes ; ici on la direction Nord, Nord-Est et Nord-Ouest.
- Des données sur le vent on a choisi des valeurs constantes ; une vitesse de 6m/s et une direction 45°.

La procédure de calibration est ensuite exposée. On a choisi le déferlement et le frottement du fond comme paramètres de calibration. Le déferlement est spécifié en utilisant un gamma constant  $\gamma = 0.8$ . Le frottement du fond marin est spécifié en utilisant la rugosité de Nikuradse (kN en mètre) égale à 0.04, les deux paramètres sont déterminés par défaut.

Pour calibrer le modèle hydrodynamique, deux facteurs ont été pris en compte. Ils sont la viscosité et la rugosité du fond (nombre de Manning). La constante de Smagorinsky varie de 0,24 à 0,9 (DHI, 2014). Le nombre de Manning est de 24 à 35 (mètre un tiers par 212 seconde).

L'estimation qu'on l'a choisi pour les deux paramètres, était par défaut 0.8 et 32 respectivement.

Après avoir introduit la bathymétrie et la données d'entrées et définir les conditions limites, la simulation a été lancée. La durée d'un effort de simulation varie dans le temps, selon la complexité des objectifs, des processus impliqués et de leur saisonnalité.

Les données sortantes sélectionnées qui représentent le climat de houle à la côte sont les suivantes (tableau IV.2) :

**Tableau IV. 2 : Sortants du modèle SW.**

| Name                     | Symbole                  | unité     |
|--------------------------|--------------------------|-----------|
| Hauteur Significative    | $H_{m0}$                 | mètre     |
| Période de pique         | $T_p$                    | seconde   |
| Direction moyenne        | MWD                      | degrés    |
| Ecart-type               | DSD                      | degrés    |
| Contraintes de radiation | $S_{xx}, S_{xy}, S_{xy}$ | $m^3/s^2$ |

#### IV.4.2 Résultats

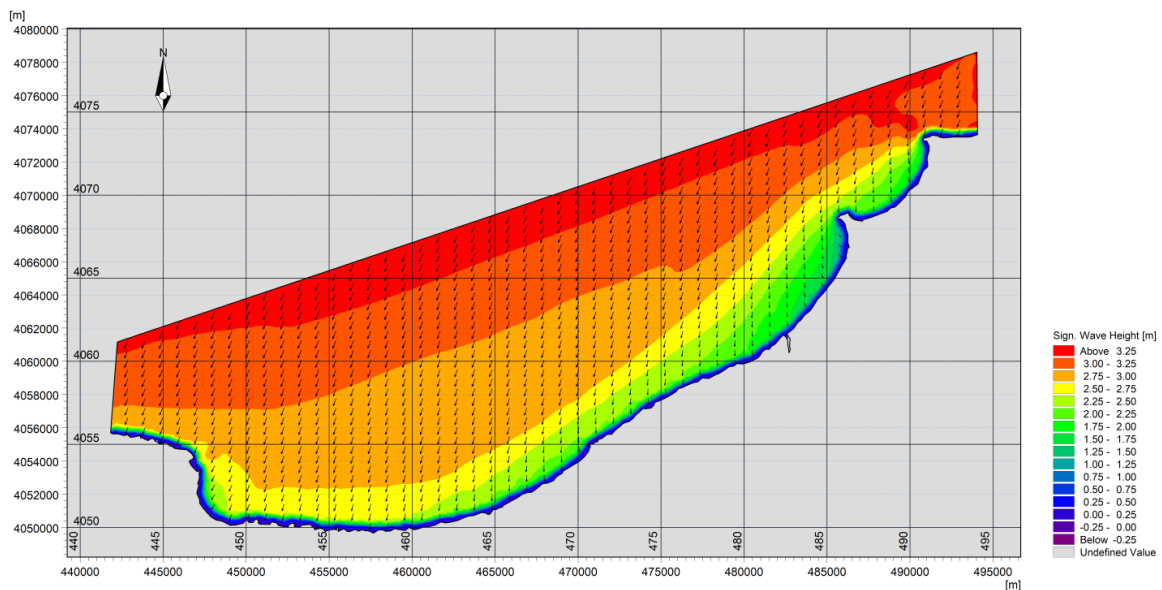
Pour chaque simulation, il est alors possible d'extraire en tout point du maillage les caractéristiques de la houle (période, hauteur, direction). Les caractéristiques de la houle sont également disponibles sous forme de carte présentant la direction (vecteurs) et les contours des isohauteurs ou des isopériodes.

##### A. Baie de Bou-Ismaïl

###### ▪ Propagation des houles de direction Nord-Est (45°)

Les houles de direction 45°N (figure IV.7) sont très fréquentes, elles apparaissent surtout lors des tempêtes printanière, elles arrivent avec une obliquité de 20 à 40° par rapport au rivage, en engendrant des courants de dérive parallèles à la cote et des courants de retours dans le sens opposé. Les cartes montrent que les orthogonales sont peu réfractées. Au large, les houles de direction Nord-Est ne subissent aucune modification et gardent leurs caractéristiques initiales ( $H_s$  de 4m), mais au fur et à mesure, qu'elles propagent vers la cote et l'effet de fond commence à être ressenti, la hauteur de la houle diminue en rapprochant de la cote pour atteindre des valeurs inférieures varient en fonction de la morphologie des fonds. La houle arrive à la cote avec des hauteurs comprises entre 1m et 2.5m, ce qui rend la côte très vulnérable.

Les houles du Nord-Est ont tendance à arriver de manière perpendiculaire à la côte ouest (plages Chenoua) en gardant presque la totalité de leurs énergies du large. Ces houles dont le coefficient de réfraction moyen est de 0,57 à la profondeur de 5 m peuvent générer des courants littoraux et entraîner l'érosion côtière. Cependant les houles significatives arrivant du Nord-Est (entre 1 m et 3,8 m) ont des hauteurs plus élevé par rapport aux autres directions. Au niveau de la partie Est (Douaouda, El Khaloufi, Complexe touristique, Sable d'Or, Azur, Palm Beach et Plage Ouest de Sidi Fredj...), les houles du Nord-Est sont moyennement réfractées par le cap Caxine, perdant une partie de leurs énergies du large, le coefficient de réfraction moyen varie entre 0,3 et 0,52, ce qui favorise la formation des plages sableuses.



**Figure IV. 7 :** Champs de houles (MWD=45°) dans la baie de Bou Ismail.

La simulation montre que le champ de houle dans la zone de Sidi Fredj se propage de la direction Nord-Est avec une hauteur maximale de 3.25 m en diminuant progressivement du fait du fond jusqu'à atteindre son minimum qui est de l'ordre de 0.25 m au pied de la côte.

- **Propagation des houles de direction Nord (360°)**

La figure ci-après (figure IV.8) représente le plan de propagation de la houle à des profondeurs allant du large jusqu'au rivage, venant de la direction Nord avec une hauteur significative de 3.5m. Les houles du Nord ont tendance à arriver de manière perpendiculaire à la côte en gardent presque la totalité de leurs énergies du large. Ces houles dont le coefficient de réfraction moyen varie entre de 0,82 et 1 à la profondeur de 5 m peuvent générer des courants littoraux et entraîner l'érosion côtière. La houle arrive à la cote avec des hauteurs comprises entre 2 m et 3 m, ce qui rend la partie centre et Ouest très vulnérable. Des hauteurs moins élevées (1m et 2m) sont enregistrées au voisinage de presque Ile de Sidi Fredj. Pour cette direction (360° N) de houle, la zone de Sidi Fredj est exposée directement aux houles de façon perpendiculaire.

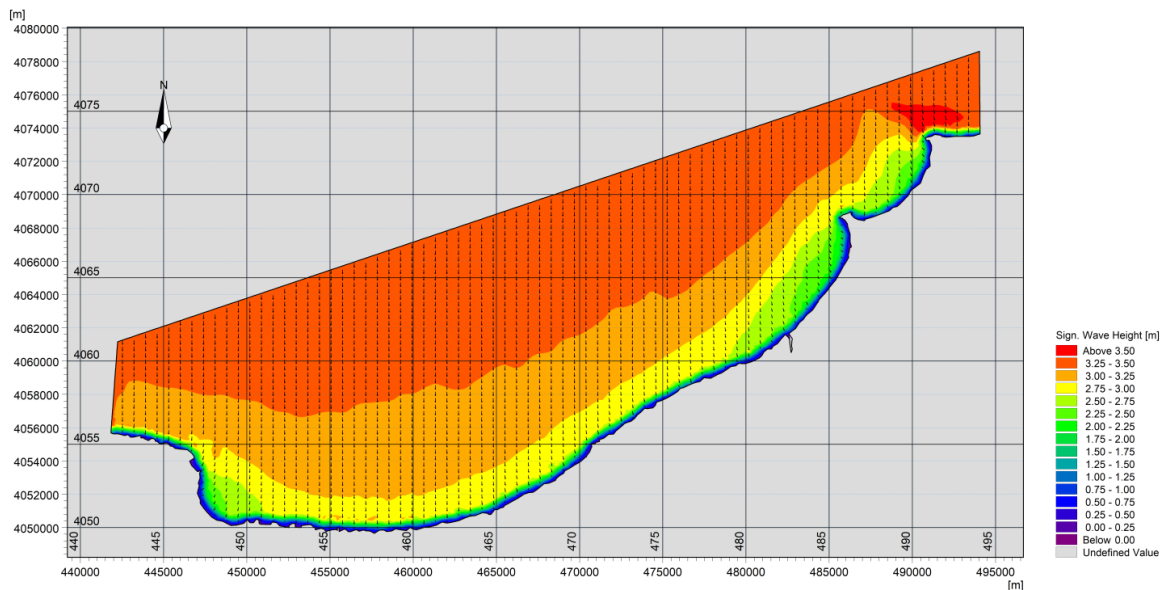
- **Propagation des houles de direction Nord-Ouest (315°)**

La figure ci-après montre le plan de propagation de la houle a des profondeurs allant de 60 m jusqu'au rivage, venant de la direction Nord-Ouest. Les houles issues de secteur 315°N, ce sont des houles hivernales, elles sont réfractées. Les orthogonales de la houle abordent la côte en subissant une rotation entre 2° et 8°. Ces houles engendrent une dérive littorale Ouest-Est le long de toute la côte (figure IV.9).

La houle ne perd que très peu de son énergie, les orthogonales ne pivotent que légèrement à l'approche du rivage, ces données font de cette houle la plus menaçante pour la zone Est ou on observe des hauteurs qui varient entre 1.2m et 2.5m.

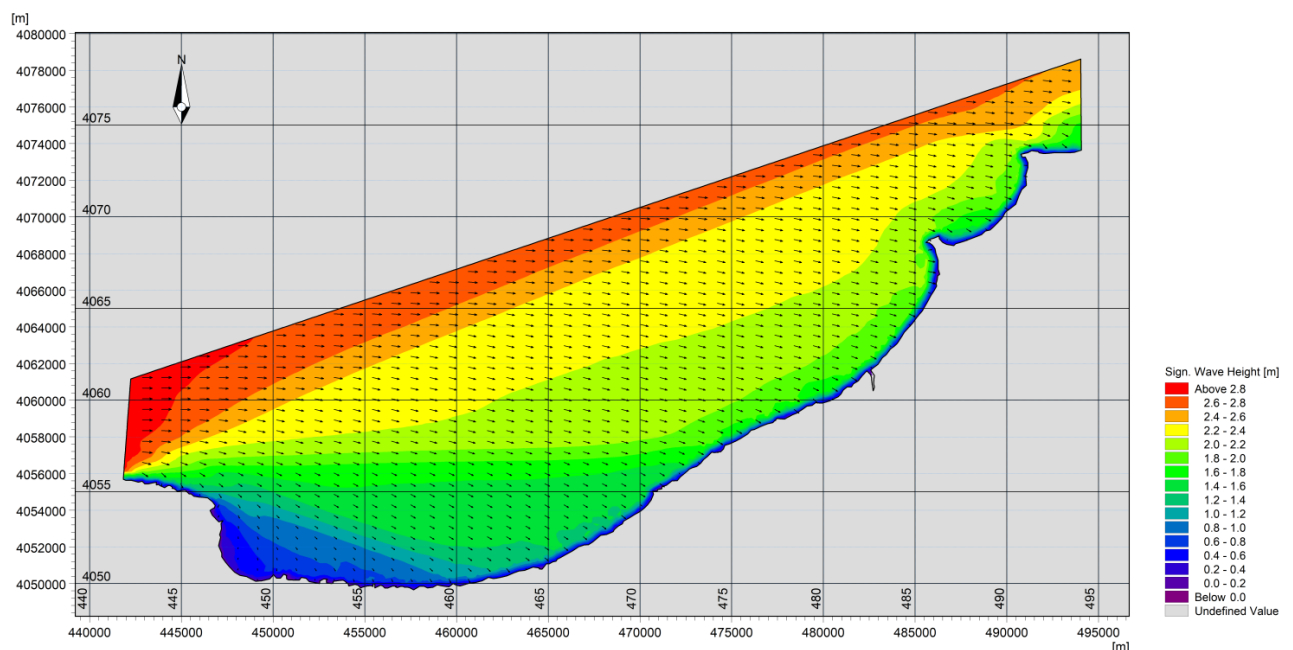
Les houles du Nord-Ouest ont tendance à arriver de manière perpendiculaire à la côte en gardent presque la totalité de leurs énergies du large. Ces houles dont le coefficient de

réfraction moyen est de 0,72 à la profondeur de 5 m peuvent générer des courants littoraux et entraîner l'érosion côtière.



**Figure IV. 8 :** Propagation des houles de direction Nord-Ouest (360°).

Au niveau de la baie de El Djamilia, on observe que la houle commence à perdre ses caractéristiques jusqu'à atteindre son minimum qui est de l'ordre de 0.30 m de hauteur prêt de la côte dû généralement à la diffraction de la houle au niveau de la jetée principale du port.



**Figure IV. 9 :** Champs de houles (MWD=315°) de la baie de Bou Ismail.

### B. Baie d'Alger

L'étude de la réfraction montre que la baie d'Alger est exposée aux houles des secteurs Nord-Est, Nord et Nord-Ouest qui sont considérées comme des directions pénalisantes. Cela

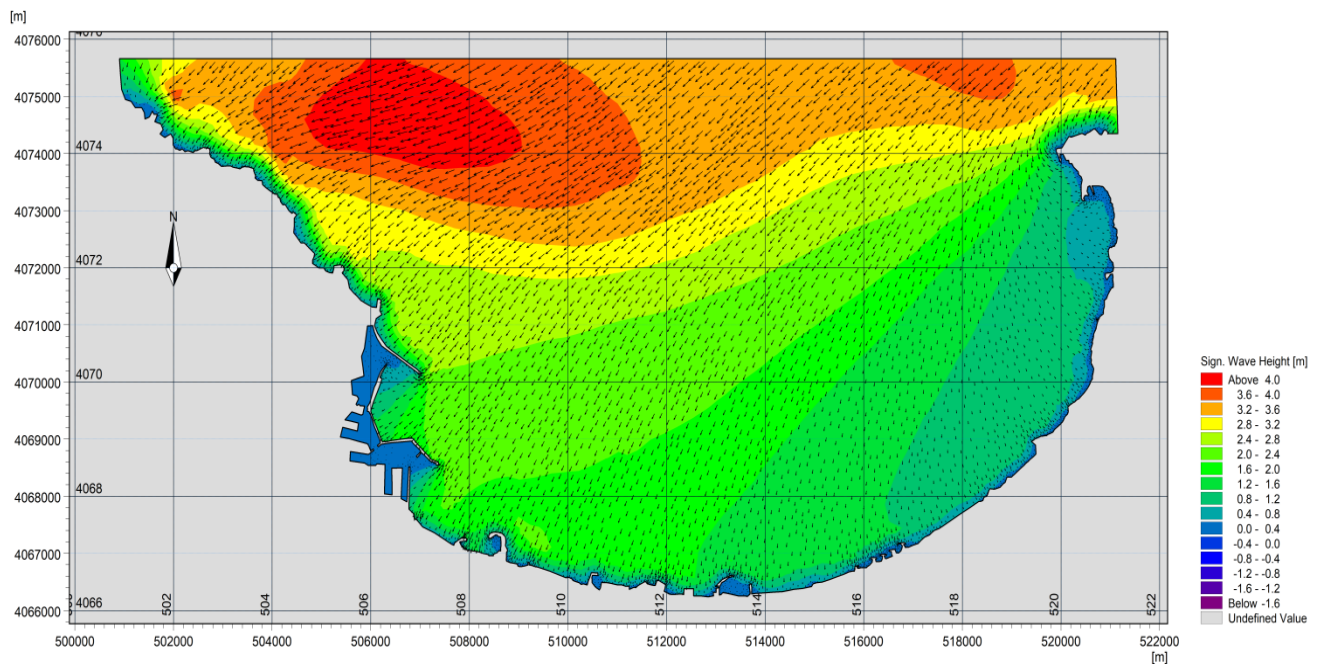
est justifié par la configuration du trait de côte qui est parallèle au Nord-Ouest et qui reçoit l'énergie de ces trois directions dominantes.

▪ **Propagation des houles de direction Nord-Est (45°)**

Au large, ces houles de direction Nord-Est (45°) ne subissent aucune modification, mais au fur et à mesure, lorsque la houle commence à ressentir le fond, la houle change ses caractéristiques du large. La hauteur de la houle diminue considérablement dans la partie Ouest suite à la diffraction et à la réfraction de la houle. La partie orientale est abritée, elle ne subit que les houles diffractées au niveau du Cap Matifou. L'étude de la réfraction montre que cette zone d'étude (Tamentfoust Est et Ouest, Les Ondines Nord et Sud) est protégée des houles du secteur Nord-Est, la hauteur de la houle est comprise entre 0.2 m et 0.5 m.

Au fur et à mesure, lorsque la houle commence à ressentir le fond, la houle change ses caractéristiques du large, la hauteur de la houle diminue pour atteindre la partie centrale avec des valeurs moins élevées. La partie centrale (Mazella, Pins Maritimes, la Sirène I, Sirène I et Verte Rive) est exposée aux houles de ce secteur, cela est justifié par la configuration du trait de côte qui est parallèle au Nord et qui reçoit l'énergie de la houle oblique. La hauteur de la houle ne dépasse pas 1m à la cote.

La partie Ouest (au voisinage du port d'Alger, sablette et Piquet Blanc) est exposée à l'action de la houle de ce secteur. Les houles du Nord-Est qui arrivent en oblique à la côte sont très peu réfractées. Les houles de cette direction dominante gardent presque la totalité de leurs énergies du large. Cependant, les houles significatives de 3,5 m du large vers la côte. Ces houles dont le coefficient de réfraction moyen varie entre 0,8 et 1.04 à 5 m peuvent générer des courants littoraux et entraîner l'érosion côtière.



**Figure IV. 10 :** Champs de houles (MWD=45°) dans la d'Alger.

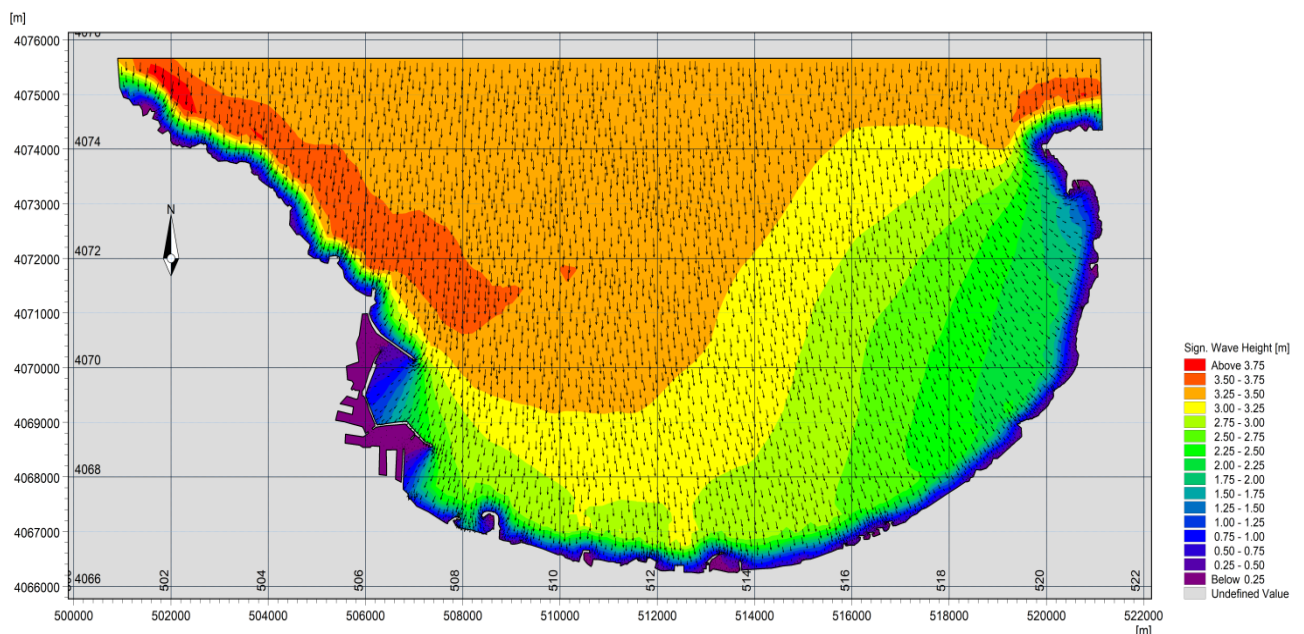
**Propagation des houles de direction Nord (360°)**

La figure ci-après (figure IV.11) montre le plan de propagation de la houle a des

profondeurs allant de 60 m jusqu'au rivage, venant de la direction Nord avec une hauteur significative de 3.5m.

D'après la carte, on remarque que les houles de secteur 360°N sont frontales, c'est dû d'une part au fait que ces houles se réfractent le moins avec des angles de déviation presque nul, toutefois, elles subissent des déformations au niveau des affleurements rocheux de Cap Matifou et d'autre part c'est liée à la configuration de la côte qui est pratiquement perpendiculaire à la direction des houles. Presque la totalité de la cote de la baie d'Alger est exposée à la houle Nord.

Les houles du Nord ont tendance à arriver de manière perpendiculaire à la côte en gardent presque la totalité de leurs énergies du large. Ces houles dont le coefficient de réfraction moyen varie entre 0,8 et 1.04 à la profondeur de 5 m peuvent générer des courants littoraux et entrainer l'érosion côtière.



**Figure IV. 11 :** Champs de houles (MWD=360°) dans la baie d'Alger.

### **Propagation des houles de direction Nord-Ouest (315°)**

Les houles issues de secteur 315°N (figure IV.12), ce sont des houles hivernales, elles sont réfractées. Les orthogonales de la houle abordent la côte en subissant une rotation entre 3° et 10°. Ces houles engendrent une dérive littorale Ouest-Est le long de toute la côte sauf au niveau de la Sablette, la plage qui est abritée par des jetées orienté dans le sens opposé des crêtes de houles.

Par conséquent, le climat de houles reste modéré au niveau de la cote. En effet dans cette localité les houles subissent une diffraction par les jetées du Ports, les ouvrages du rivage de la sablette. Par contre, la propagation semble se faire de façon quasi-frontale. La houle ne perd que très peu de son énergie, les orthogonales ne pivotent que légèrement à l'approche du rivage, ces données font de cette houle la plus menaçante pour la zone Est ou on observe des hauteurs qui varient entre 1.5 m et 2.53 m. Ces houles dont le coefficient de réfraction moyen varie entre 0.85 et 1 peuvent générer des courants littoraux et entrainer l'érosion côtière.

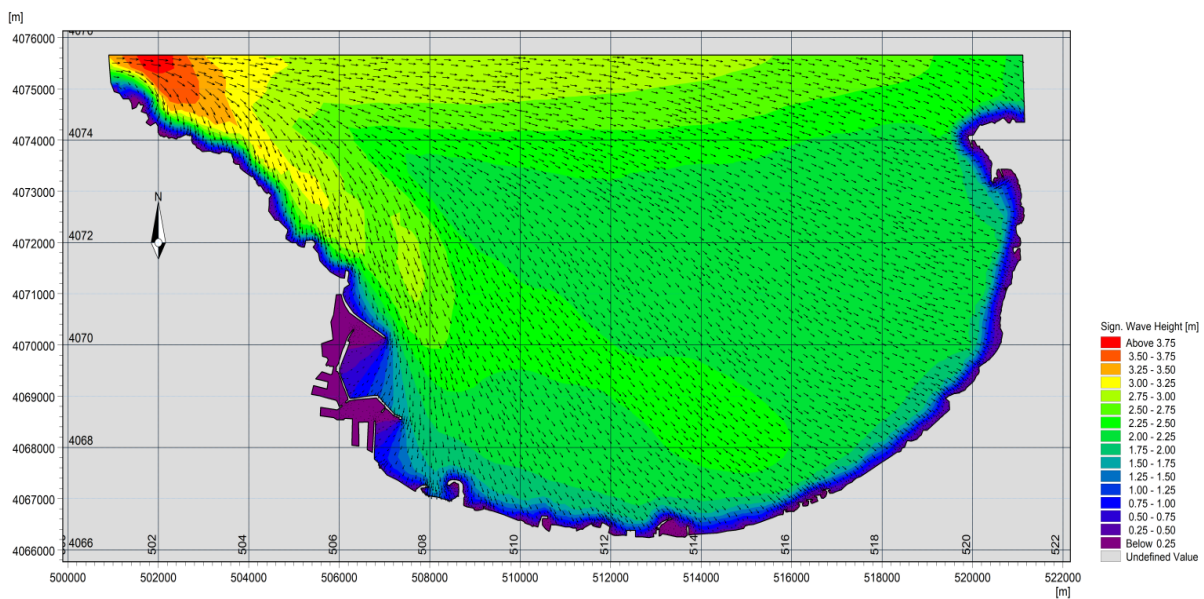


Figure IV. 12 : Champs de houles (MWD=315°) sur la baie d'Alger.

### Baie de Zemmouri :

L'étude de la réfraction montre que la baie de Zemmouri est exposée aux houles des secteurs Nord Est, Nord et Nord-Ouest. Cela est justifié par la configuration du trait de côte qui est parallèle au Nord-Ouest et qui reçoit l'énergie de ces trois directions dominantes.

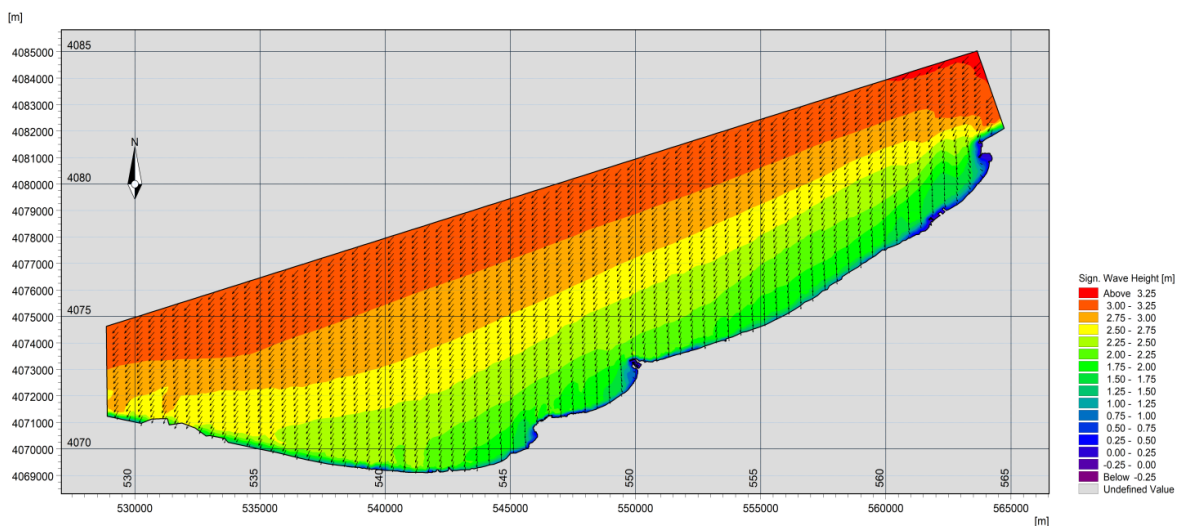


Figure IV. 13 : Champs de houles (MWD=45°) dans la baie de Zemmouri.

#### ▪ Propagation des houles de direction Nord-Est au large (45°) :

Les houles 45°N (Figure IV.13) sont très fréquentes, elles apparaissent surtout lors de la période printanière, elles arrivent à la côte avec une obliquité de 25 à 40° par rapport à la direction initial du large. Au large, les houles de direction Nord-Est ne subissent aucune

modification et gardent leurs caractéristiques initiales ( $H_s$  de 4m), les orthogonales sont peu réfractées, mais au fur et à mesure, qu'elles propagent vers la côte et l'effet de fond commence à être ressenti, la hauteur de la houle diminue en rapprochant de la côte pour atteindre des valeurs inférieures variant en fonction de la morphologie des fonds.

Le plan de vague se diffracte dans la partie Ouest au niveau de l'îlot de Réghaia (Hadjrat Bounatah). Dans la partie Est la propagation se fait latéralement par rapport au rivage, la houle semble ne pas conserver son énergie du large, la zone apparaît naturellement abrité par le Cap. Les orthogonales pivotent légèrement à l'approche du rivage vers les directions Nord et Nord-Est de la zone.

La houle atteint la côte avec des hauteurs variables selon la bathymétrie, des valeurs entre 1.25m et 2.5m enregistrées dans la partie Ouest (Ain taya, Reghaia et Boudouaou el Bahri) et dans la zone Est (plage de Zemmouri). Des valeurs faibles de l'ordre de 0.5m -1.5m dans les zones abritées (plage Boumerdes, port de Zemmouri...). À l'approche de la côte jusqu'à -1m de profondeur, une diminution moyenne des hauteurs varie de 0.7 et 0.25 m de hauteur au voisinage de certaines plages (plages du Cap Djenet), cela signifie que la houle perd une partie de son énergie presque trois quarts  $3/4$  lors de son évolution vers la côte. Cette dissipation d'énergie est accompagnée par un pivotement très faible des orthogonales de direction NNE et ENE.

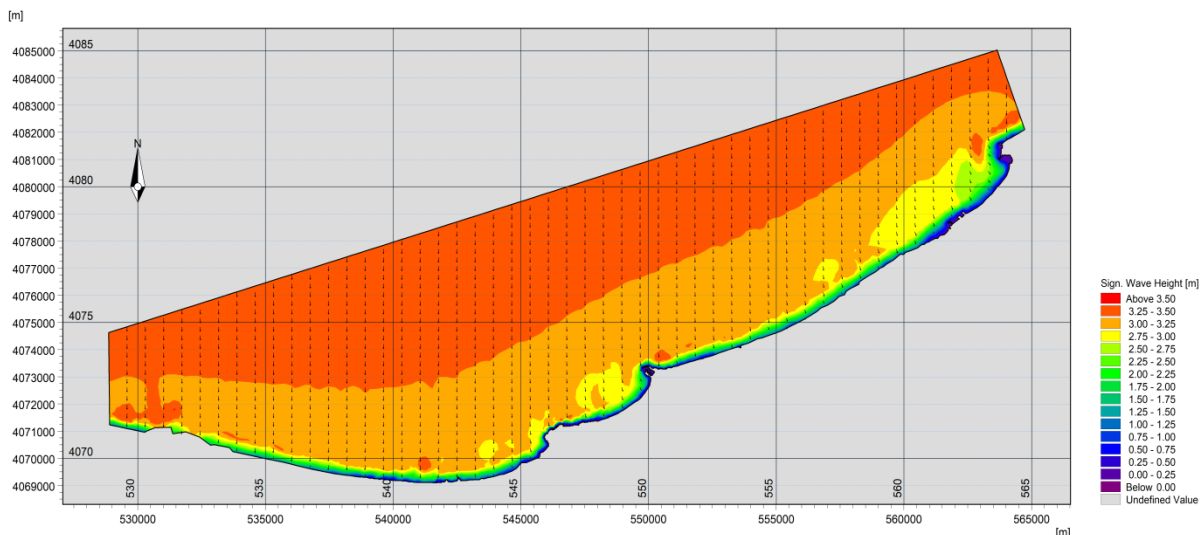
### ▪ Propagation des houles de direction Nord au large ( $360^\circ$ )

Cette figure IV.14 représente les résultats obtenus de l'étude de la réfraction de la houle de  $360^\circ$ N et cela pour une seule période (8.7s).

Au large, ces houles de direction Nord ( $360^\circ$ ) ne subissent aucune modification, mais au fur et à mesure, lorsque la houle commence à ressentir le fond, la hauteur de la houle diminue considérablement. Au voisinage des profondeurs de 30m, on observe que la hauteur de la houle ne varie pas, elle est de 3.5m environ, au-delà de cette profondeur on observe une diminution de cette hauteur avec une valeur de 2.2m à -2.1m de profondeur, marquant qu'il n'y a aucun pivotement des orthogonales.

D'après la carte, au voisinage de la côte on remarque que les houles de secteur  $360^\circ$ N sont frontales, c'est dû d'une part au fait que ces houles se réfractent le moins avec des angles de déviation presque nul, toutefois, elles subissent des déformations au niveau des affleurements rocheux de Réghaia et Ain Taya, et d'autre part c'est liée à la configuration de la côte qui est pratiquement perpendiculaire à la direction des houles.

A l'approche de la côte à des profondeurs inférieures à -1m, une diminution remarquable des hauteurs des vagues ( $H_s$  varie entre 0.69 m et 0.71 m), avec des coefficients de réfraction relativement faible entre 0.15 à 0.19 et des angles d'incidences de direction moyenne vers le Nord-Est au niveau de la partie Est, et cela signifie que la houle perd une grande partie de son énergie presque  $4/5$  lors de son évolution vers la côte. Cette dissipation d'énergie est accompagnée par un pivotement des orthogonales vers le Nord-Est avec un faible degré. Les valeurs de  $H_s$  varient entre 1,6 à 2,4 m au côté Ouest de la baie.



**Figure IV. 14 :** Champs de houles (MWD=360°) dans la baie de Zemmouri.

A l'exception de la zone de Cap Djenet, les hauteurs de la houle atteignent les 2.75m juste auprès de la jetée principale, cela est dû généralement au déferlement important des vagues ainsi que la diffraction de la houle sur les jetées du port.

Donc pour la direction 360°, on peut dire que la houle a une propagation quasi frontale et suit presque le même comportement d'évolution avec celle d'une direction 45°, et cela aussi pourrait avoir une influence sur notre zone d'étude.

- **Propagation des houles de direction Nord-Ouest (315°)**

Les houles issues de secteur 315°N (figure IV.15), sont généralement des houles hivernales. Au large, ces houles de direction Nord-Ouest ne subissent aucune modification, mais au fur et à mesure, lorsque la houle commence à ressentir le fond, la hauteur de la houle diminue considérablement, elles sont réfractées au voisinage de la côte. Les orthogonales de la houle abordent la côte en subissant une rotation entre 3° et 10°. Ces houles engendrent une dérive littorale Ouest-Est le long de toute la côte sauf au niveau de Réghaia Plage qui est abritée par un îlot orienté dans le sens opposé des crêtes de houles. Par conséquent, le climat de houles reste modéré au niveau de cette plage. En effet dans cette localité les houles subissent une diffraction à 1 Km du rivage. Par contre, la propagation semble se faire de façon quasi-frontale. La houle ne perd que très peu de son énergie, les orthogonales ne pivotent que légèrement à l'approche du rivage, ces données font de cette houle la plus menaçante pour la zone d'étude.

Pour la houle de période (9s), nous marquons que les hauteurs significatives sont au-dessus de 4 m au large, en revanche, près des côtes nous avons des hauteurs plus faibles où elles sont comprises entre 0,2-0,8 m à l'Est et entre 1.0-2,0 m à l'Ouest. Au niveau du Cap Matifou, les hauteurs remarquées sont les plus faibles du fait qu'elles sont entre 0.2 et 0.8m et cela signifie que la houle perd une très grande partie de son énergie lors de son trajet vers la côte due généralement à la variation abrupte de la bathymétrie.

Cette dissipation d'énergie est accompagnée par un pivotement léger des orthogonales vers le Nord-Est notamment au niveau du port de Cap Djenet.

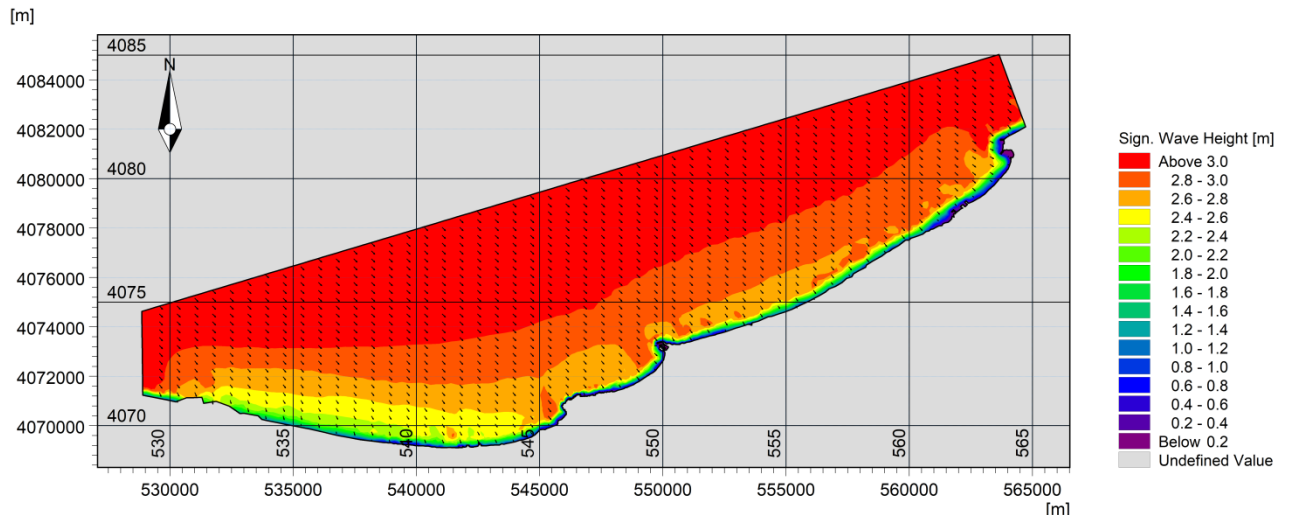


Figure IV. 15 : Champs de houles (MWD=315°) dans la baie de Zemmouri.

#### IV.5 Modélisation des champs de courants générés par la houle :

L'objectif de cette partie est de modéliser les champs de courants générés par les houles approchant le rivage, au moyen du module HD. Les contraintes de radiation étant calculées par le module SW elles nous ont servi à modéliser la courantologie au niveau de la grande baie de Bou Ismail, baie d'Alger et la baie de Zemmouri.

##### IV.5.1 Conditions aux limites et autres paramètres :

Le niveau de la mer est considéré constants (0.34 m). Les flux tout au long des limites ouvertes sont considérés perpendiculaires par rapport aux limites. Par conséquent la surface initiale est considérée nulle aussi. La viscosité et la résistance sont considérées comme valeurs par défaut (0.5 et  $32 \text{ m}^{1/3} / \text{s}$  respectivement). Les contraintes de radiations incluses dans chaque grille de calcul sont calculées par le module SW.

##### IV.5.2 Résultats des simulations HD et interprétations :

###### A. Baie de Bou-Ismail

Les figures ci-après (Figure IV.16 à IV.18) montrent les champs de courants induits par les vagues calculées au moyen du modèle numérique MIKE21-HD pour les trois directions de houle sélectionnées.

D'après la figure IV.16, on observe que les champs des courants montrent des activités hydrodynamiques dans toute la zone, surtout dans la partie Est où on observe un courant important qui est dirigé vers l'Ouest avec une vitesse de 0.30 m/s. Des vitesses importantes varient entre 0.45m/s à 1m/s enregistrées dans la zone centre et dû généralement à la concentration des orthogonales de la houle dans cette zone.

On remarque au niveau de la plage de Moretti des vitesses allant de 0.55 m/s à 1.02 m/s due à la concentration de l'énergie de la houle suivant la direction Est-Ouest. Suite à la présence des ouvrages de protection la vitesse du courant diminue à un intervalle de 0.8 m/s à 1.2 m/s et on remarque un changement de direction du fait de la dissipation d'énergie.

Les houles issues du secteur Nord-Ouest donnent naissance près de la côte à un courant de dérive dirigé vers l'Est ce courant prend une direction avec des vitesses moyennes dans la partie centre ou les vitesses des courant de dérive ne dépassent pas 0.7m /s.

Les houles de secteur Nord donnent naissance à des courants moins importants par rapport aux autres, qui sont dirigé vers le secteur Ouest avec une vitesse de 0.3 m/s dans la partie Ouest et une vitesse de 0.72 m/s dans la partie Est. Ces courants favorisent le déplacement des quantités importantes de sédiment et peut provoquer l'érosion de ses zones.

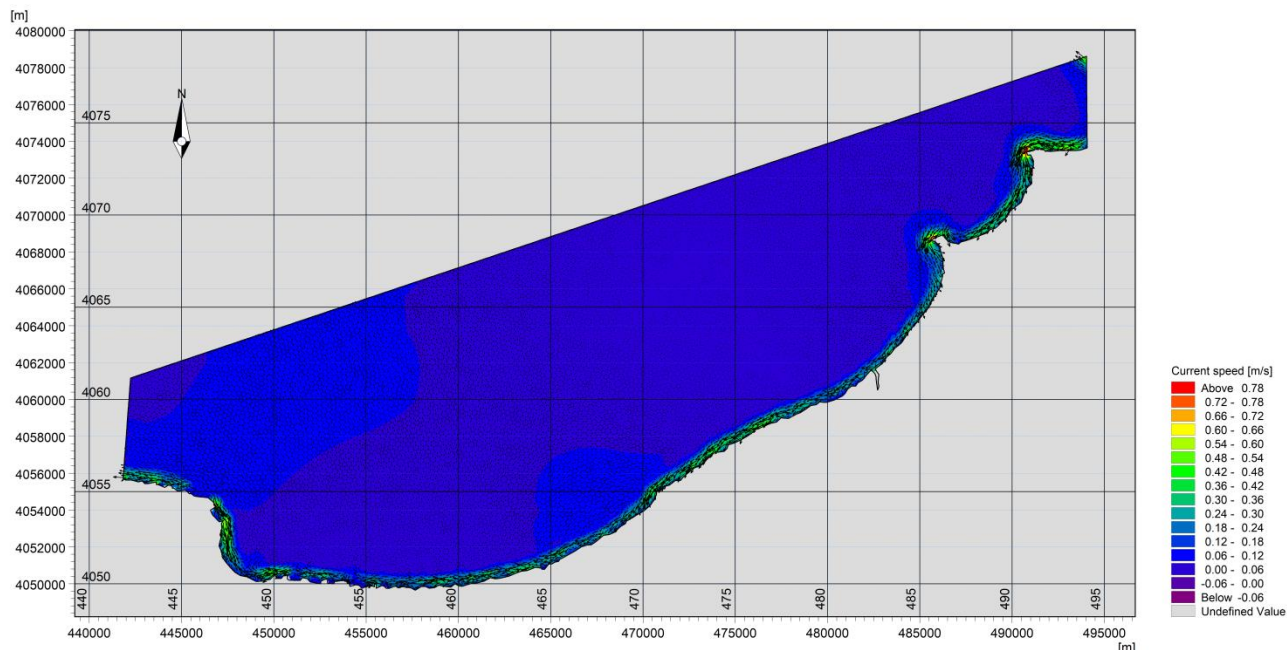


Figure IV. 16 : Champs de courants dans la baie de Bou Ismail pour : MWD=45°.

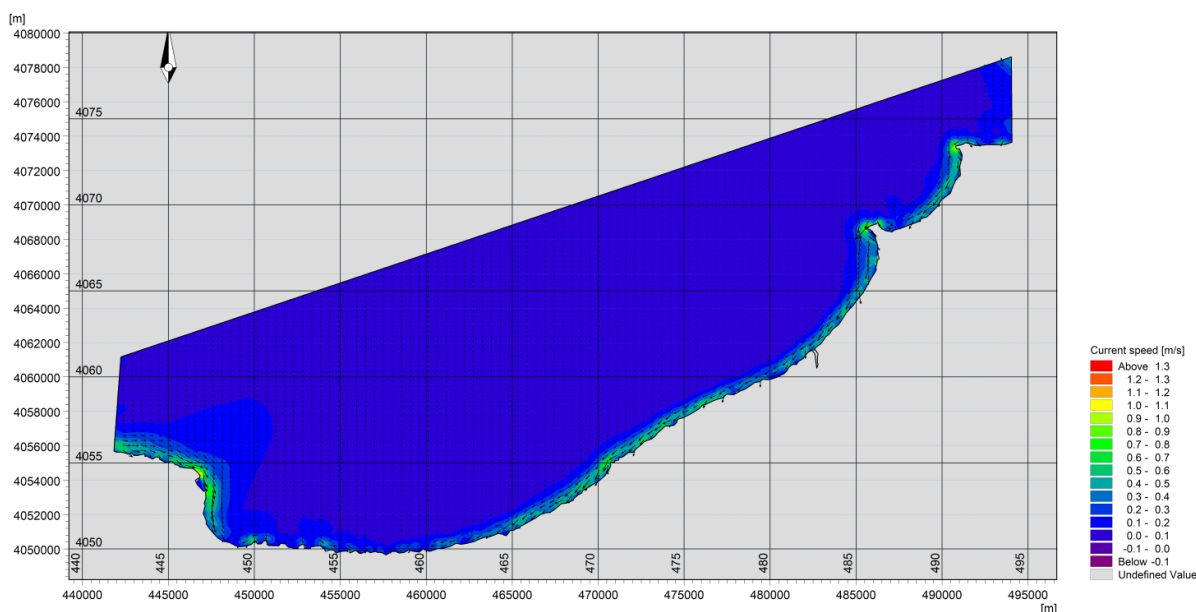
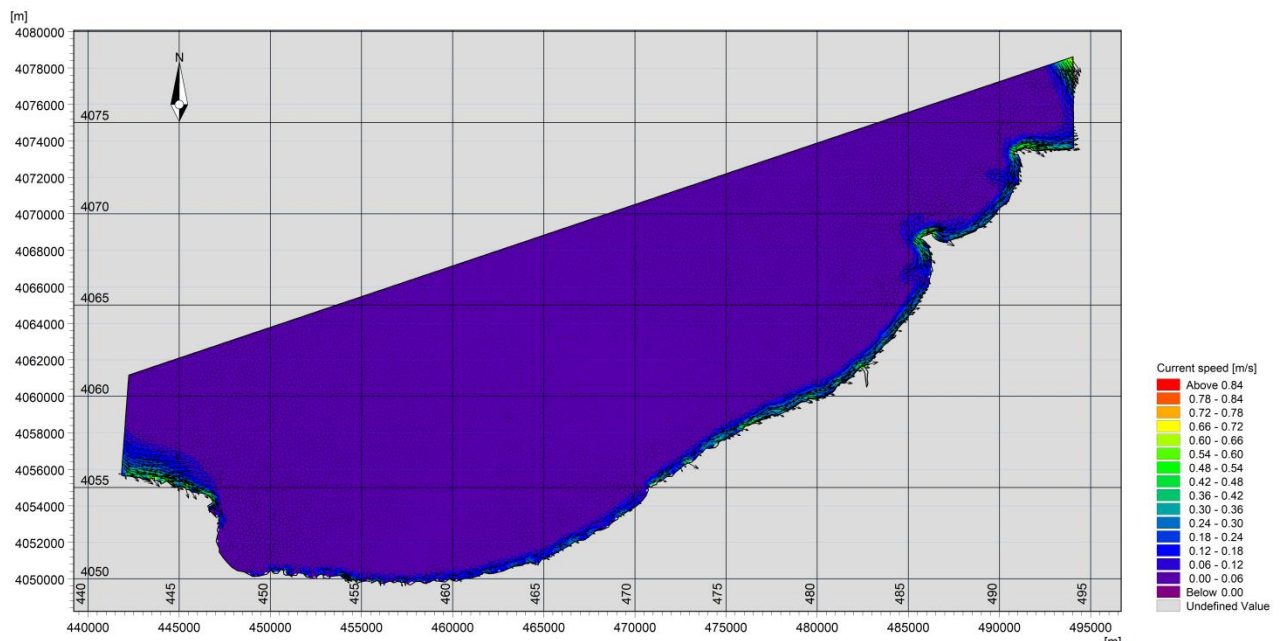


Figure IV. 17 : Champs des courants dans la baie de Bou Ismail pour : MWD=360°.



**Figure IV. 18 :** Champs des courants dans la baie de Bou Ismail pou :  $MWD=315^\circ$ .

### B. Baie d'Alger

Les figures ci-après (Figures IV.19, IV.20, IV.21) montrent les champs de courants induits par les vagues calculées au moyen du modèle numérique MIKE21-HD pour les trois directions de houles sélectionnées.

Les vagues venant du secteur Nord-Est génèrent un courant de dérive littorale parallèle à la côte et orienté d'Est en Ouest avec des vitesses faibles comprises entre 0.15 m/s et 0.50m/s au niveau de la partie centrale jusqu'au port d'Alger. Des vitesses importantes varient entre 0.5m/s à 0.9m/s enregistrées dans la zone Ouest dû généralement à la diffraction de la houle et à la concentration des orthogonales de la houle dans cette zone.

Les houles issues du secteur Nord-Ouest donnent naissance près de la côte à un courant de dérive dirigé vers l'Est. Loin au large, ce courant prend une direction nettement opposée mais avec des vitesses nettement faibles dans la partie Est ou les vitesses des courant de dérive ne dépassent pas 0.3m/s.

On observe que les houles de secteur Nord donnent naissance à des courants moins importants par rapport à la direction Nord-Est, qui est dirigé vers le secteur Ouest avec une vitesse de 0.2 m/s dans la partie Ouest et une vitesse de 0.4 m/s dans la partie Est. On remarque aussi une circulation turbionnaire derrière les ouvrages de protection et les jetées, dû généralement à la diffraction de la houle au niveau des extrémités de ces ouvrages.

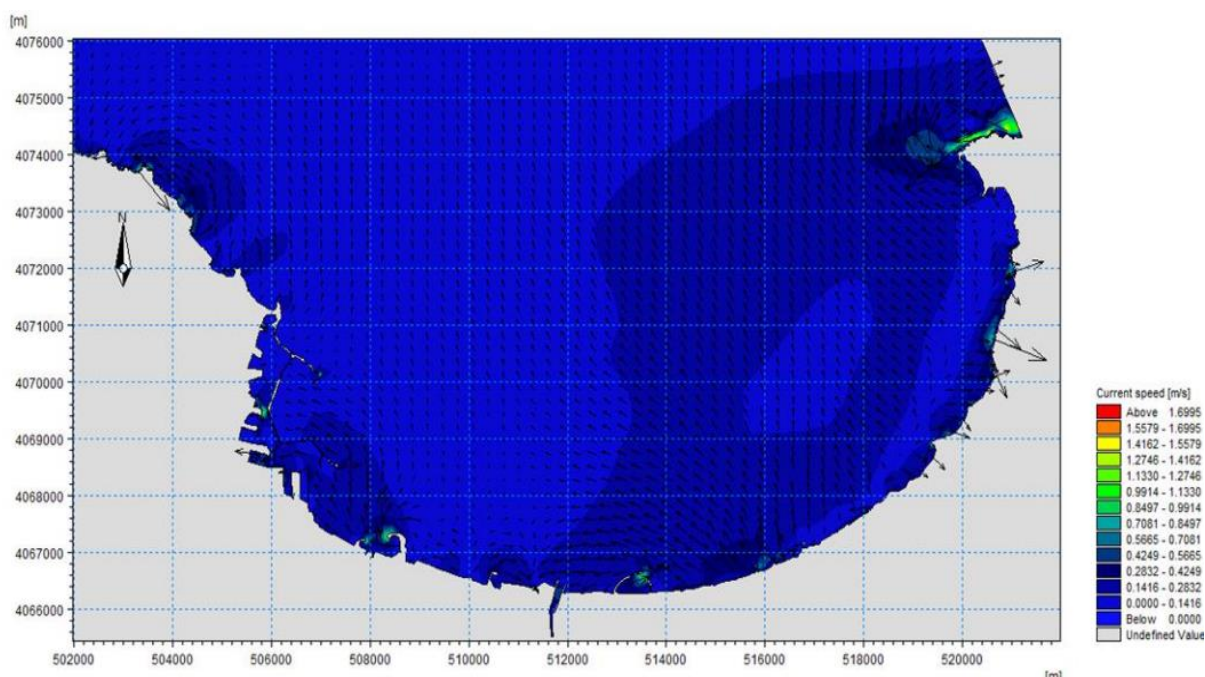


Figure IV. 19 : Champs des courants dans la baie d'Alger pour : MWD=45°.

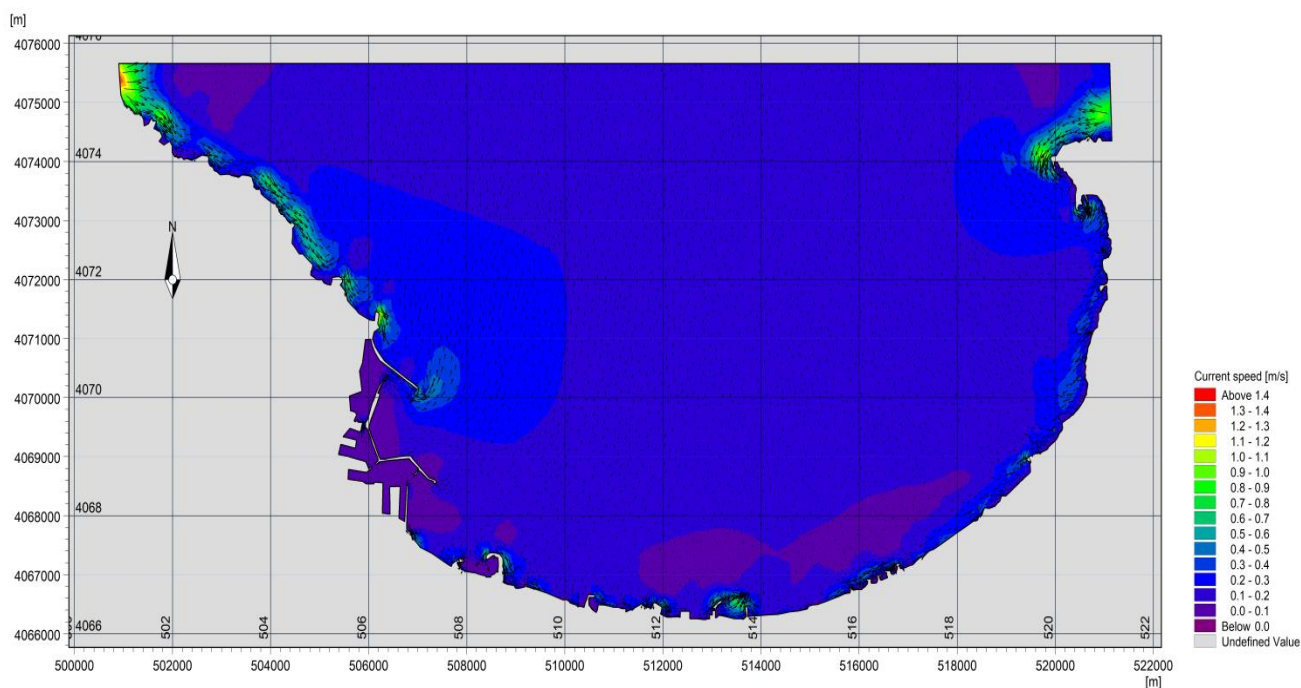
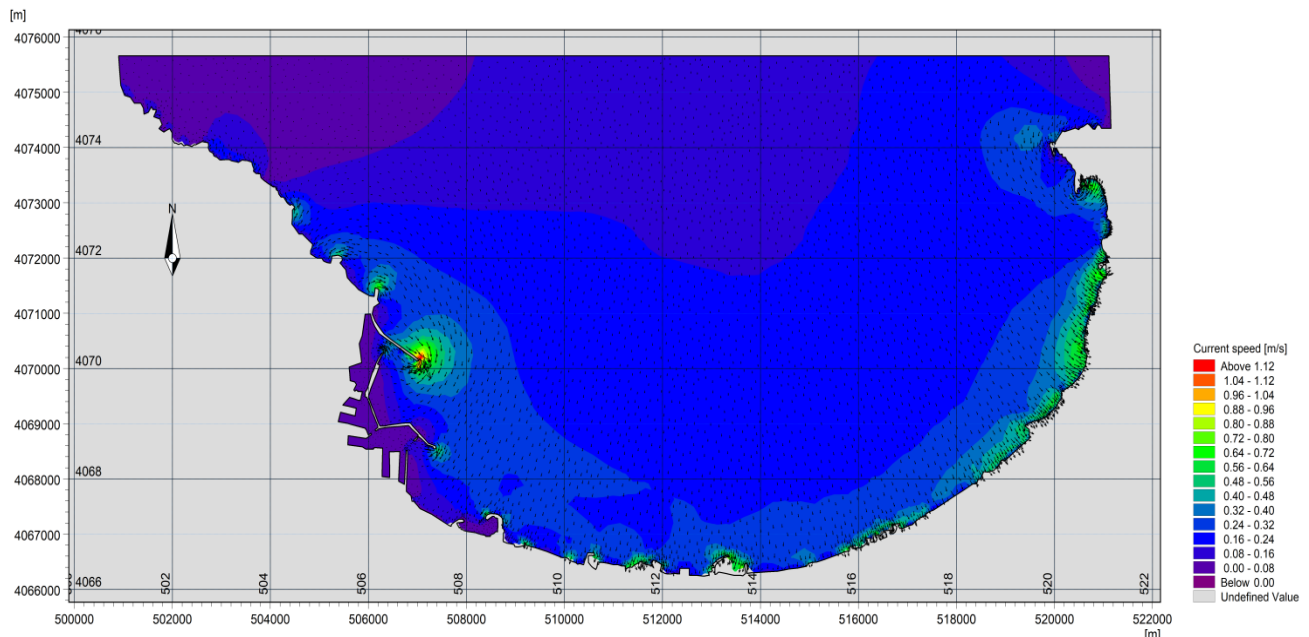


Figure IV. 20 : Champs des courants dans la baie d'Alger pour : MWD=360°.



**Figure IV. 21** : Champs des courants sur la baie d'Alger pour : MWD=315°.

### C. Baie de Zemmouri :

Les figures ci-après (Figure IV.22 à IV.24) représentent les champs de courants induits par les vagues calculées au moyen du modèle numérique MIKE21-HD pour les trois directions de houles sélectionnées.

Les vagues venant du secteur Nord-Est génèrent un courant de dérive littorale parallèle à la côte et orienté d'Est en Ouest. Des vitesses importantes varient entre 0.5 m/s à 1 m/s enregistrées dans la zone de Zemmouri. Les vitesses sont plus élevées dans la zone Est de l'embouchure de l'oued Réghaia qui dépassent 0.6m/s. Ces vitesses diminuent en allant vers l'ouest à cause de l'effet d'abri de l'île, Hadjrat Bounattah, et du léger changement dans l'orientation de la côte. Ces fortes vitesses sont à l'origine du transport sédimentaire vers l'Ouest en favorisant l'érosion des cotes sableuses exposées à ses courants.

D'après la figure IV.22, on observe que les champs des courants formés par la houle de secteur Nord-Est (45°N) dans la région de Boumerdes montrent des activités hydrodynamiques dans presque toute la zone. On remarque que le courant se propage d'Est en Ouest suivant une direction parallèle au trait de côte avec une vitesse majoritaire qui varie entre 0.50 m/s à 1.05 m/s, ce courant est produit principalement par le phénomène de réfraction de la houle.

Plus à l'Ouest, le long de la plage, Deca Plage, les vitesses du courant long-shore augmentent de nouveau puis elles diminuent progressivement en allant vers la localité d'Ain Chorb où note un changement de la direction de la côte et la présence de hauts fonds à l'avant côte. L'effet de ces hauts fonds engendre localement un courant dans la direction opposée.

A l'Est du port de Cap Djenet, on remarque des champs de courants plus importants qui dépassent la vitesse de 1.5m/s orienté vers la direction Ouest, c'est l'origine des accumulations

de quantités importantes du sable au niveau de la jetée principale et favorise l'ensablement du port. Avec des vagues venant de l'autre côté, ici en cours à des vitesses plus élevées, ce qui aura un effet visible sur le transport des sédiments et de l'évolution côtière.

Les houles issues du secteur Nord-Ouest donnent naissance près de la côte à un courant de dérive dirigé vers l'Est. Loin au large, ce courant prend une direction nettement opposée mais avec des vitesses nettement faibles dans la partie Est ou les vitesses des courant de dérive ne dépassent pas 0.5m /s. Par contre dans la partie Ouest, au niveau des plages de la baie de Zemmouri Est, on observe des champs de courant importants avec des vitesses qui dépassent 1m/s. ce courant joue un rôle important dans la redistribution des sédiments accumulés au voisinage du port de Zemmouri pour alimenter la plage.

D'après la figure IV.24, on observe que les houles de secteur Nord donnent naissance à des courants moins importants par rapport aux autres directions, qui sont dirigé vers le secteur Ouest avec une vitesse de 0.2 m/s. On remarque aussi une circulation turbionnaire derrière les ouvrages de protection et les jetées, dû généralement à la diffraction de la houle au niveau des extrémités de ces ouvrages. Au niveau de la zone Est des vitesses relativement faibles d'environ 0.08m/s. On constate des courants avec une vitesse un peu élevée au niveau de la zone centre de Zemmouri varie entre 0.5m/s – 0.9m/s.

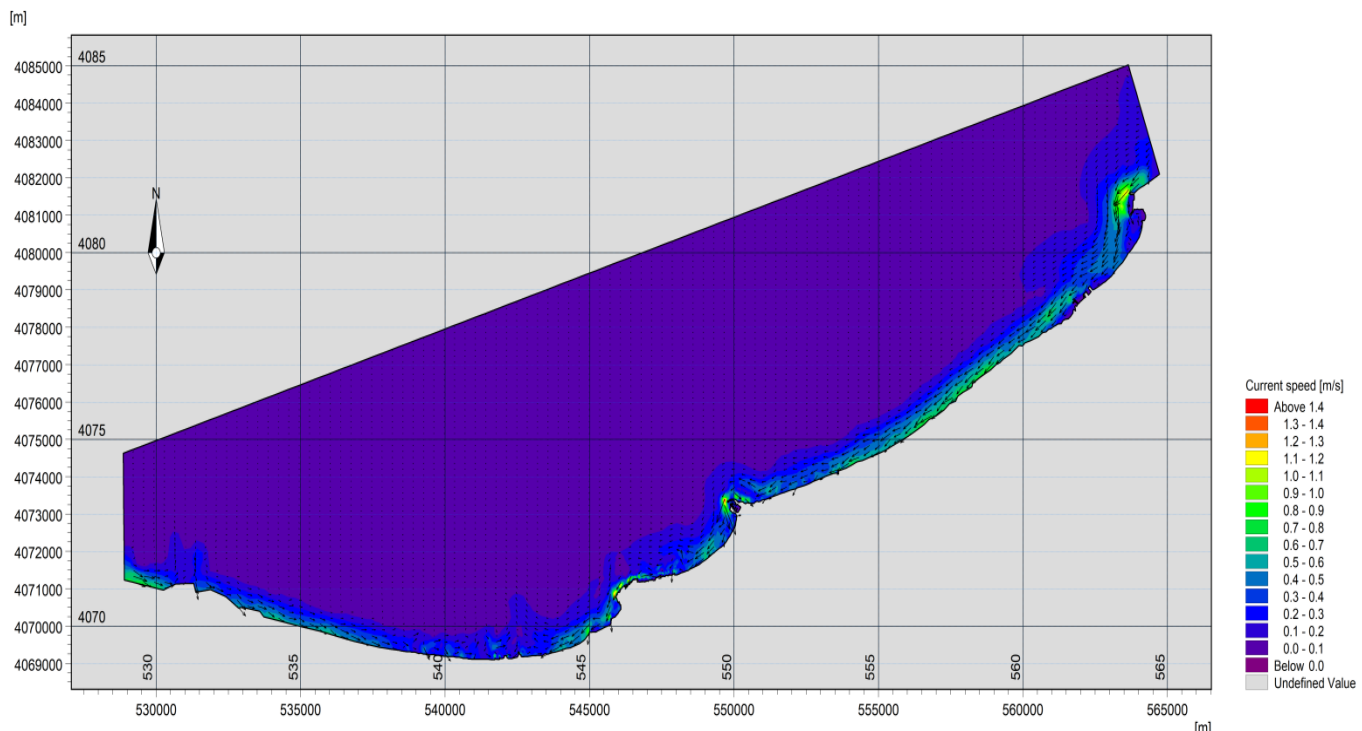


Figure IV. 22 : Champs des courants dans la baie de Zemmouri pour : MWD=45°.

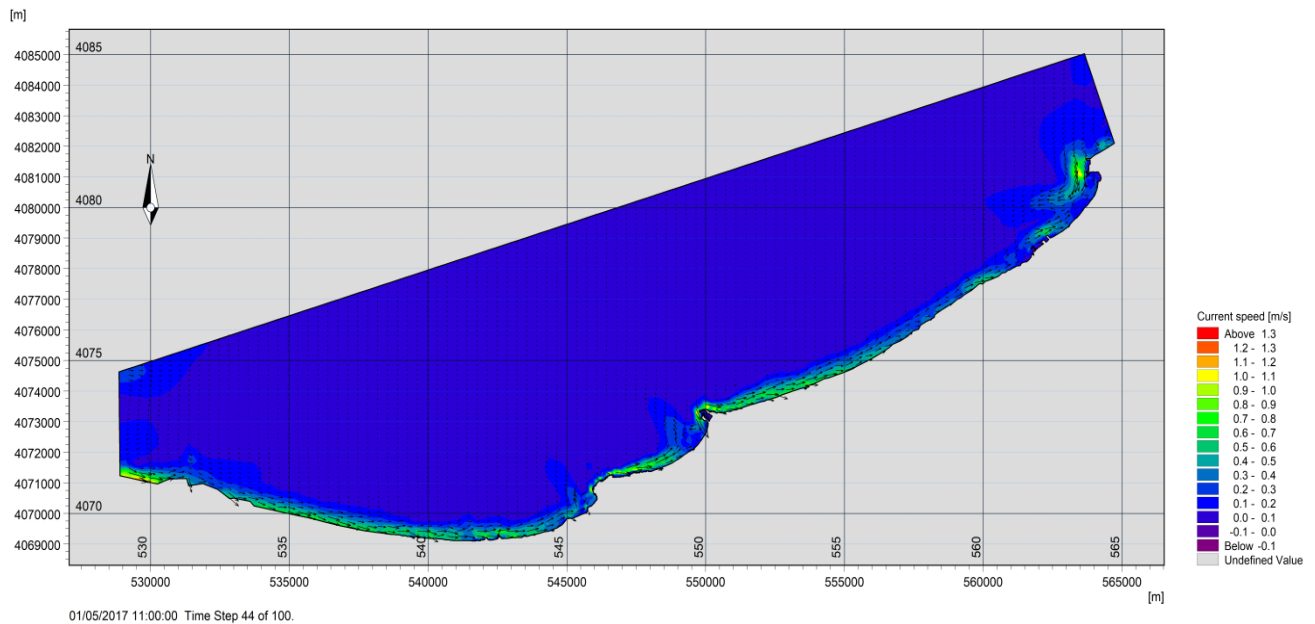


Figure IV. 23 : Champs des courant dans la baie de Zemmouri pour : MWD=315°.

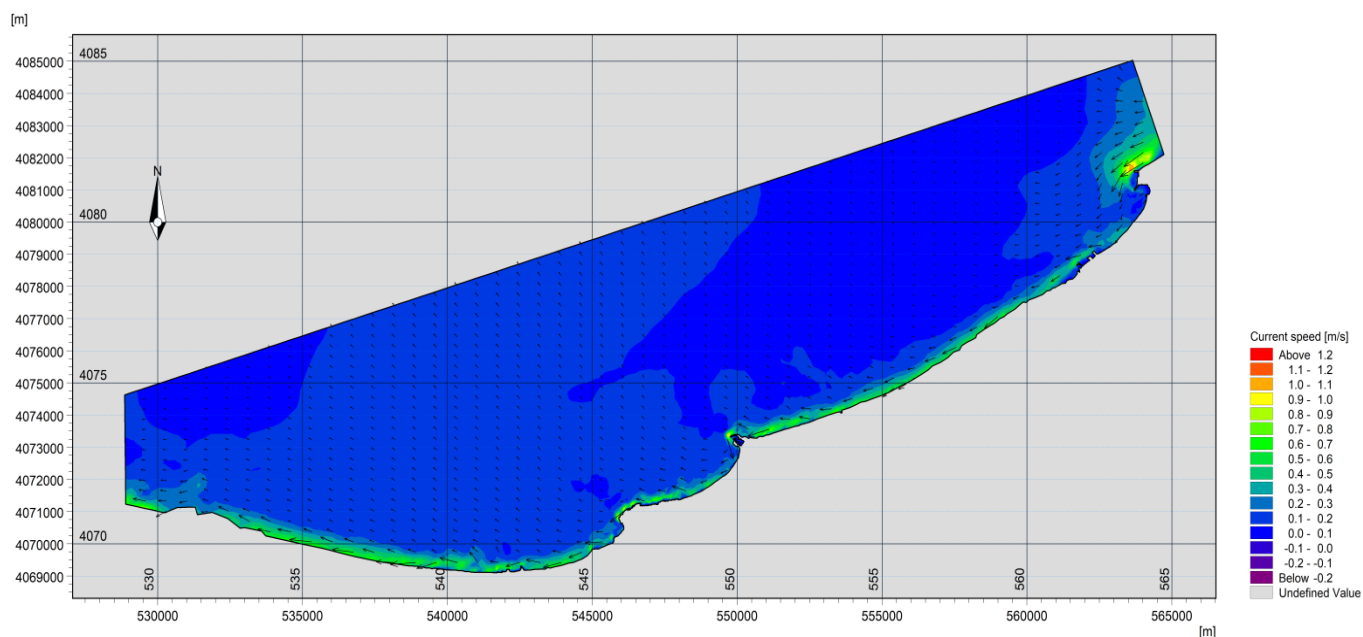


Figure IV. 24 : Champs des courants dans la baie de Zemmouri pour : MWD=360°.

#### IV.6 Modélisation du transport sédimentaire sous l'effet de houle et de courant

L'étude de l'évolution de la côte sableuse passe donc par celle des causes sous-jacentes qui affectent l'équilibre des sédiments du littoral en fonction des différentes périodes. Plus précisément, le problème posé est de déterminer le régime de houle et hydro-morphologique, les effets des vagues, des courants sur cette évolution et les causes de l'érosion dans le secteur d'étude. De là, nous comprendrons les règles de l'accrétion et de l'érosion dans la zone d'étude grâce à l'application de modèles mathématiques pour simuler ce processus.

Le modèle numérique nous permet d'illustrer les houles, le courant dû aux vagues et les modes de transport du littoral, ainsi que l'influence des ouvrages de protection et portuaires au

cours de la simulation. Le modèle morphodynamique repose sur un couplage des modèles de propagation de la houle et du modèle de circulation et du modèle de transport sédimentaire dans MIKE21.

Les forçages hydrodynamiques ont permis de structurer les formations superficielles du littoral algérois. Le transit littoral des sédiments dépend, pour une grande part, des directions et de l'obliquité des houles par rapport au rivage.

#### **IV.6.1 Résultats du modèle Mike 21 ST :**

##### **A. Baie de Bou-Ismaïl**

Pour comprendre les phénomènes naturels mis en cause dans la mobilité du trait de côte, on ne peut pas se contenter de suivre simplement ses déplacements au cours du temps. Le littoral étant un système ouvert, il convient d'appréhender son évolution à travers l'analyse de son bilan sédimentaire au sein de chaque cellule ou sous-cellule hydrosédimentaire. Une modélisation numérique du transport sédimentaire est appliquée pour la zone d'étude où les taux initiaux de sédimentation/érosion sont calculés à l'aide de l'équation de conservation de la masse sédimentaire.

Les résultats de la modélisation du transit littoral de la baie de Bou-Ismaïl seront présentés indépendamment pour chaque segment suivis par une synthèse de la dynamique littorale sur l'ensemble de l'unité sédimentaire (figure IV.25 à IV.27).

Les houles en provenance du secteur Nord-Est, Nord et Nord-Ouest engendrent une dérive littorale parallèle à la côte et orientée vers le Sud-Ouest, ces courants de dérive transportent le sable vers l'Ouest sur la plage Ouest de Sidi Fredj avec un taux de  $-1800 \text{ m}^3/\text{an}/\text{m}$  à  $-2350 \text{ m}^3/\text{an}/\text{m}$  qui provoque l'érosion de cette zone. On constate qu'il y a une tendance de perte de sédiments au voisinage d'oued de Mazafran vers le large engendré par des courants de retours avec un taux de  $-2350 \text{ m}^3/\text{an}/\text{m}$  suite à la houle Nord-Ouest.

Les houles en provenance du secteur Nord-Est, Nord engendrent une dérive littorale parallèle à la côte et orientée vers le Sud-Ouest et l'Ouest, ces courants de dérive transportent le sable vers l'Ouest sur la plage Ouest avec un débit  $-2200 \text{ m}^3/\text{an}/\text{m}$  pour la houle Nord- Est et de  $-2700 \text{ m}^3/\text{an}/\text{m}$  pour la houle Nord. Les houles en provenance du secteur Nord-ouest engendrent une dérive littorale parallèle à la côte et orientée vers l'Est avec un taux d'environ  $+1399 \text{ m}^3/\text{an}/\text{m}$ . La comparaison entre les différents débits engendrés par les houles des trois secteurs montre une prédominance du transport sédimentaire vers l'Ouest.

Au niveau de la zone de Sidi Fredj, le résultat de la carte obtenu montre qu'un transport longitudinal vers l'Est dans la zone de Moritti avec un débit de  $2488 \text{ m}^3/\text{an}/\text{m}$  ce qui provoque l'érosion de cette partie. On constate qu'il y a une tendance de perte de sédiments vers le large engendré par des courants de retours avec un taux de  $2240 \text{ m}^3/\text{an}/\text{m}$ . Les houles provenant des directions Nord-Est atteignent le site de façon plus ou moins frontale, engendrant la formation d'une dérive littorale dans la direction Est-Ouest, qui assure la dissémination des sédiments dans le même sens, engendrant l'ensablement du port. Cela pourrait être expliqué par la configuration géographique de la côte ainsi que la présence du port, qui protège la plage Est de

Sidi Fredj des houles du secteur Nord-Ouest qui sont significatives en fréquence et en amplitude.

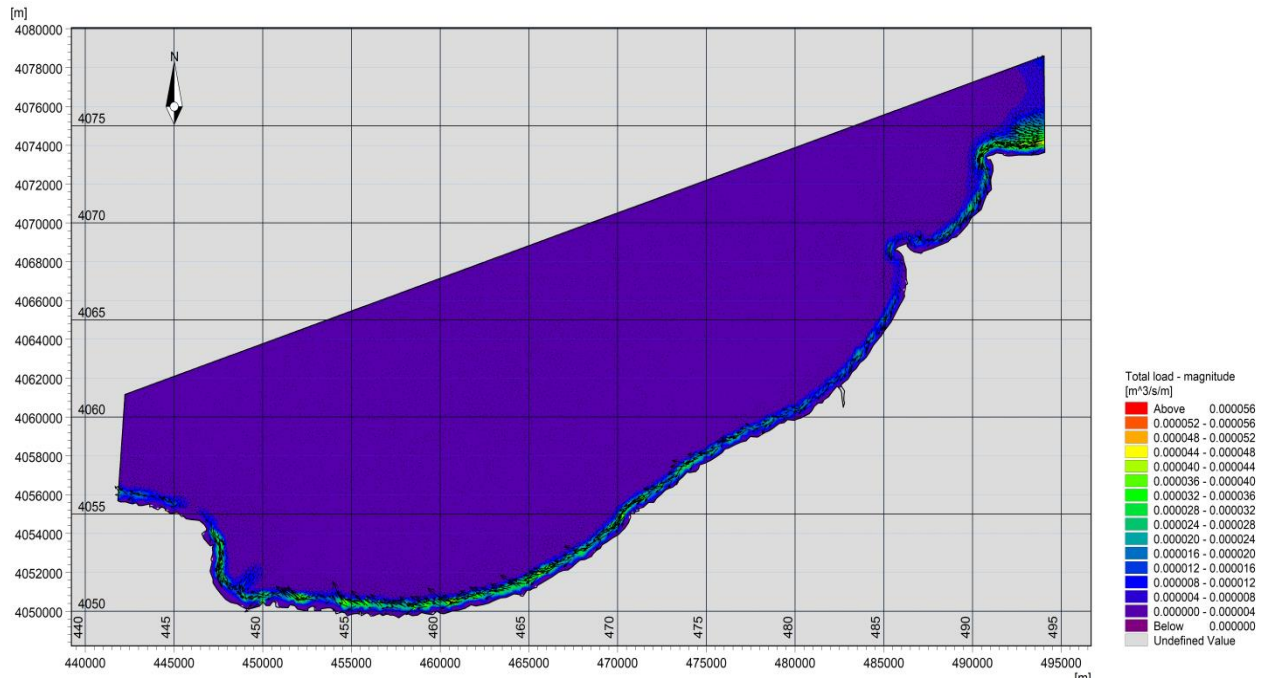


Figure IV. 25 : Dynamique sédimentaire sur la baie de Bou Ismail pour : MWD=45°.

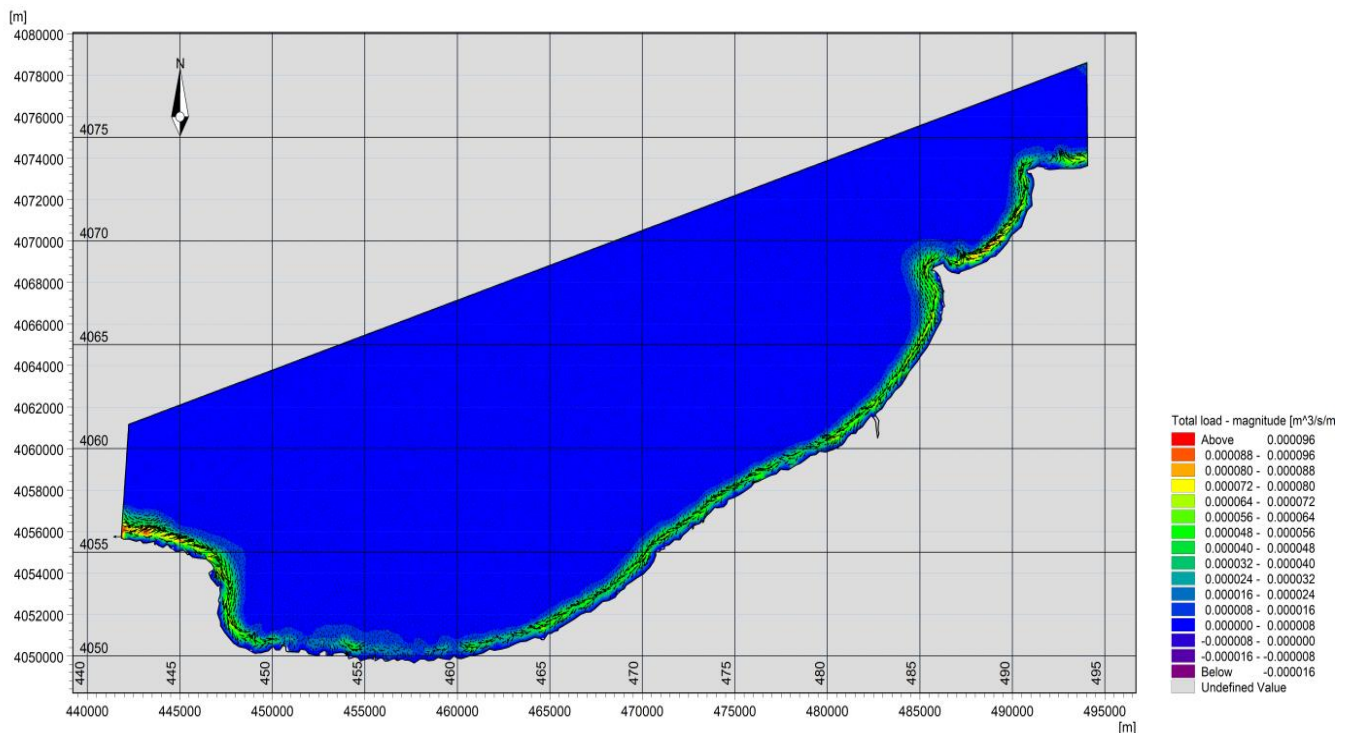
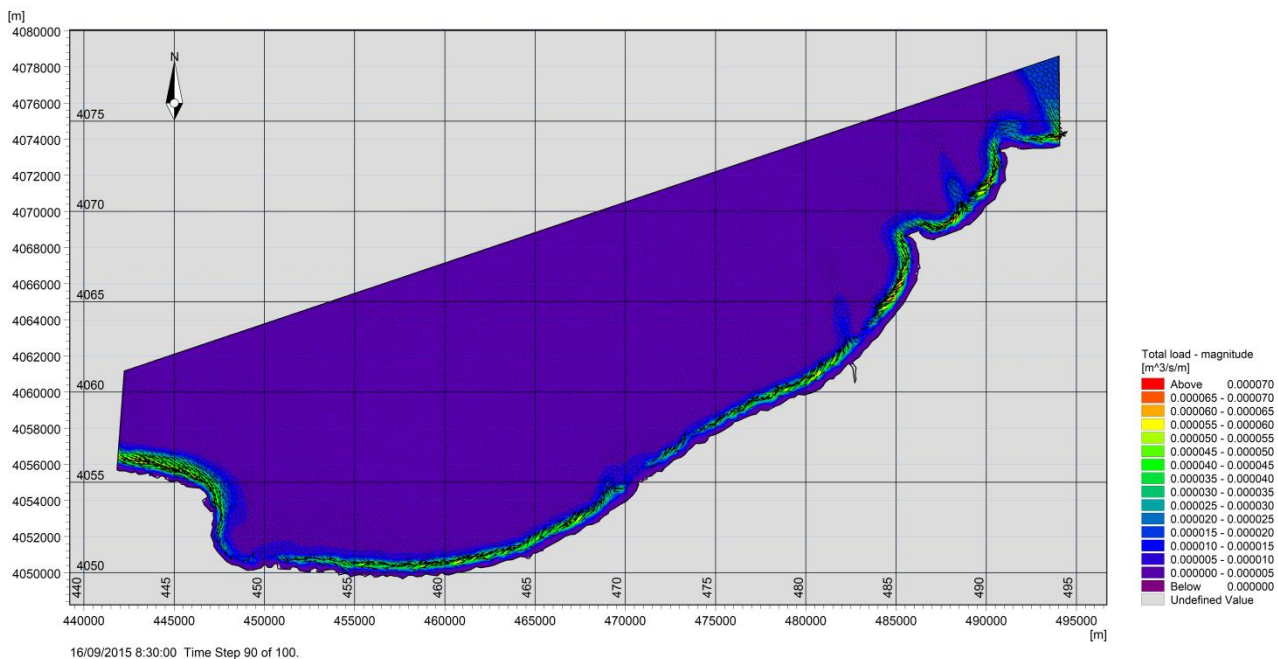


Figure IV. 26 : Dynamique sédimentaire dans la baie de Bou Ismail pour : MWD=360°.



**Figure IV. 27 :** Dynamique sédimentaire dans la baie de Bou Ismail pour : MWD=315°.

### B. La baie d'Alger

Pour l'analyse du transport sédimentaire, nous allons donc pour les deux sections axer l'analyse sur les houles provenant chacune d'un secteur différent autour de cette direction. Ainsi nous devrions retrouver les principales caractéristiques du transport sédimentaire.

Les figures présentées ci-après (figure IV.28 à IV.36) représentent une capacité de transport instantanée en  $m^3/s/m$  et sont exploitées pour comprendre qualitativement ce qui se passe au niveau du transport. Les résultats du transport cumulé sur une année seront synthétisés. L'échelle de couleur peut être légèrement modifiée d'une figure à l'autre pour illustrer de la meilleure manière de transport de sédiment. Sur la zone du Port d'Alger à l'Oued El-Harrach, le transport est assez uniforme et confirme ce qui a été observé en termes d'hydrodynamique.

Les houles en provenance du Nord-Ouest vont engendrer une dérive littorale vers l'Est au voisinage de la côte. Ces courants de dérives changent de leurs direction vers le large et donnent naissance à des courants de retours (figure IV.36), alors que les houles en provenance de Nord et Nord-Est vont plutôt engendrer un transport vers le Ouest par cette drive et un transport vers le large suite au courant de retours dirigés vers le large avec un débit varie entre  $500 m^3/an /m$  et  $1600 m^3/an /m$ . La résultante de cette dérive dépendra de l'intensité des houles respectives. On s'attend à ce qu'elle soit globalement orientée vers le Nord, étant donné la dominance des régimes de Nord-Est et de Nord.

Sur les plages de la partie Est de la baie d'Alger, à l'ombre du Cap Matifou, le transport s'effectue vers le Nord-Ouest à cause d'une recirculation des courants. Les résultats du transport sédimentaire sur la zone allant de la Perouse à l'Oued El-Harrache sont qualitativement conformes à l'analyse des écoulements menée précédemment et

confirment la dérive littorale parallèle à la côte sur cette zone. Sur cette zone, l'intensité de la dérive diminue entre le Nord et le Sud ce qui aurait tendance à favoriser une accumulation de sable dans certaines plages abritées, mais que dans le même temps les houles de Nord-Ouest engendrent un transport en direction du large. Le bilan sédimentaire est donc complexe, et résulte de la contribution de chaque houle.

Il existe également des gradients dans le transport brut le long du rivage sur l'ensemble du littoral de cette partie Est. Entre la Perouse et Bordj El Bahri, la capacité du transport brut est constante de l'ordre de  $-150$  à  $-1300$   $m^3/an/m$  vers le large engendré par les courants de retours. A partir de la plage de Bateau cassé jusqu'à la plage Pins Maritime, le transport brut augmente de  $-120$  à  $-2\ 000$   $m^3/an/m$  et cela dû à l'exposition de cette zone aux différentes houles. Pour toute variabilité naturelle de l'orientation du trait de côte, l'intensité du transport brut reste relativement stable.

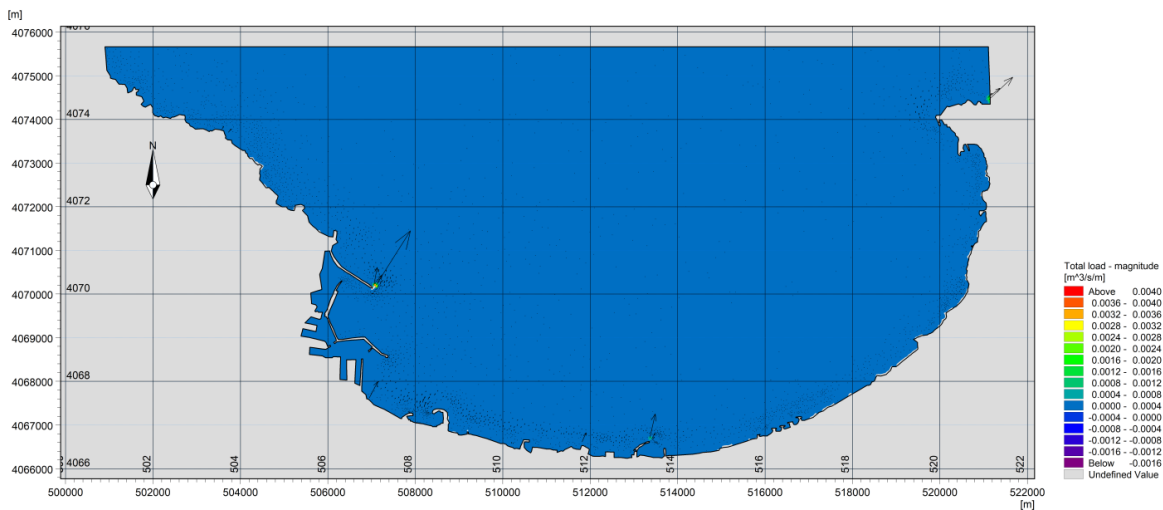


Figure IV. 28 : Dynamique sédimentaire sur la baie d'Alger pour :  $MWD=45^\circ$ .

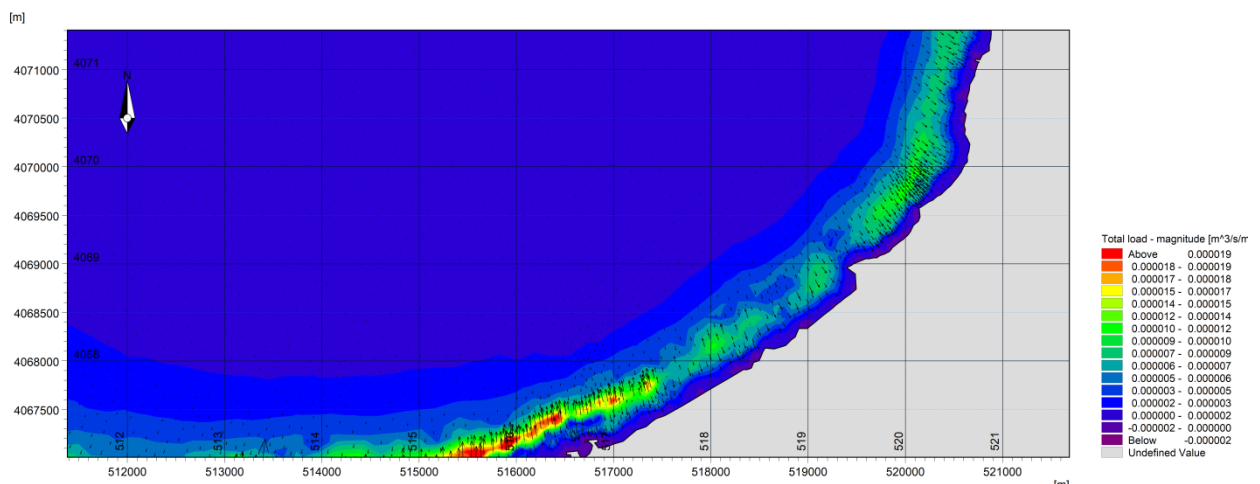


Figure IV. 29 : Dynamique sédimentaire sur la partie Est de la baie d'Alger pour :  $MWD=45^\circ$ .

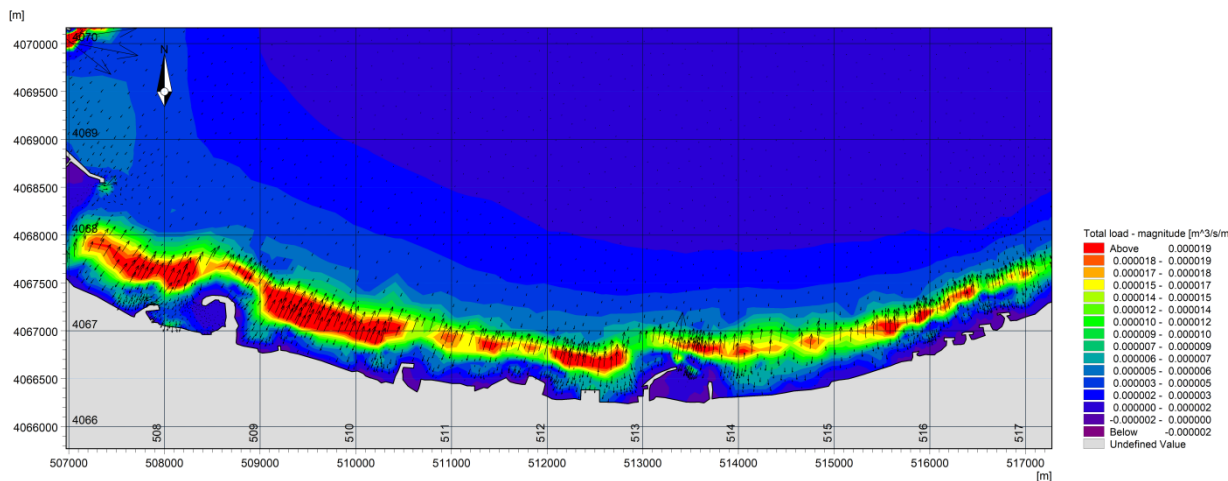


Figure IV. 30 : Dynamique sédimentaire sur la partie Ouest de la baie d'Alger pour : MWD=45°.

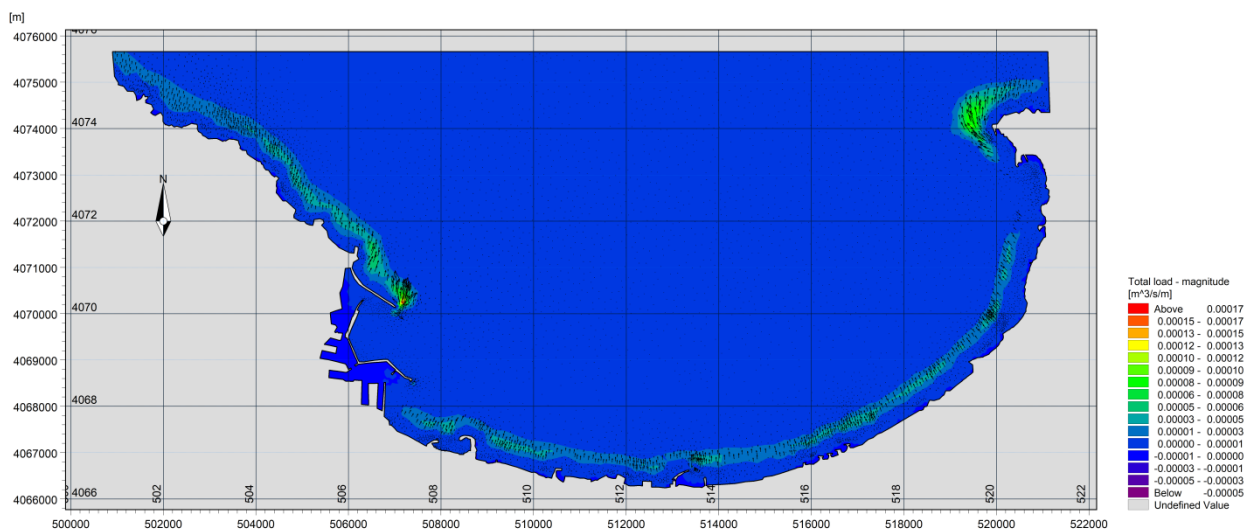


Figure IV. 31 : Dynamique sédimentaire sur la baie d'Alger pou ; MWD=360°.

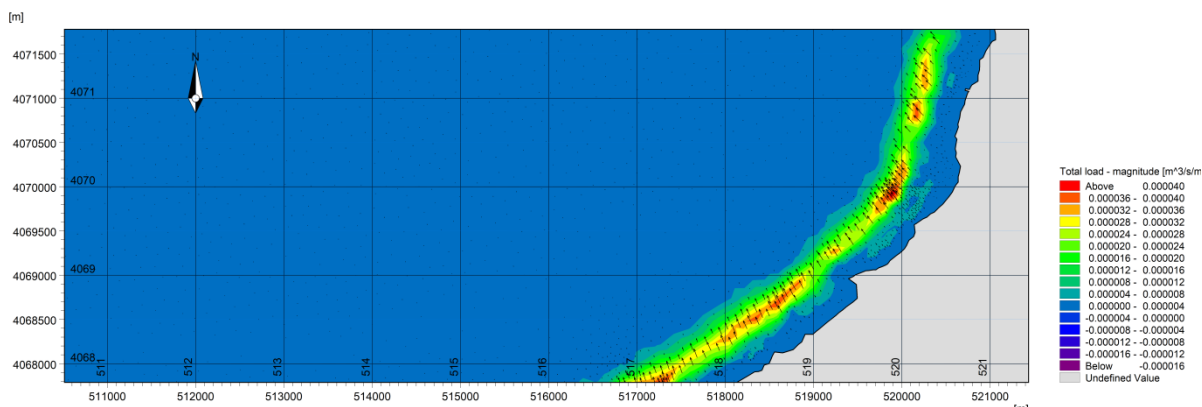
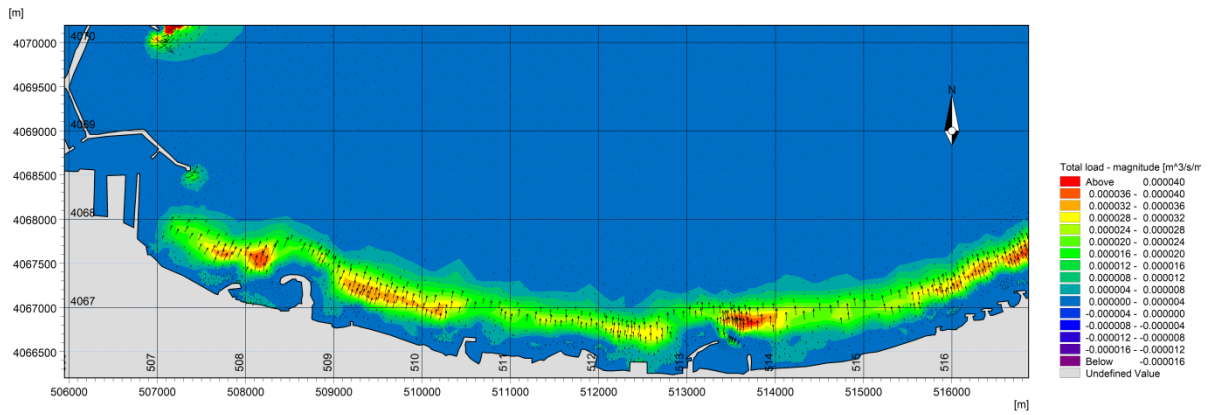
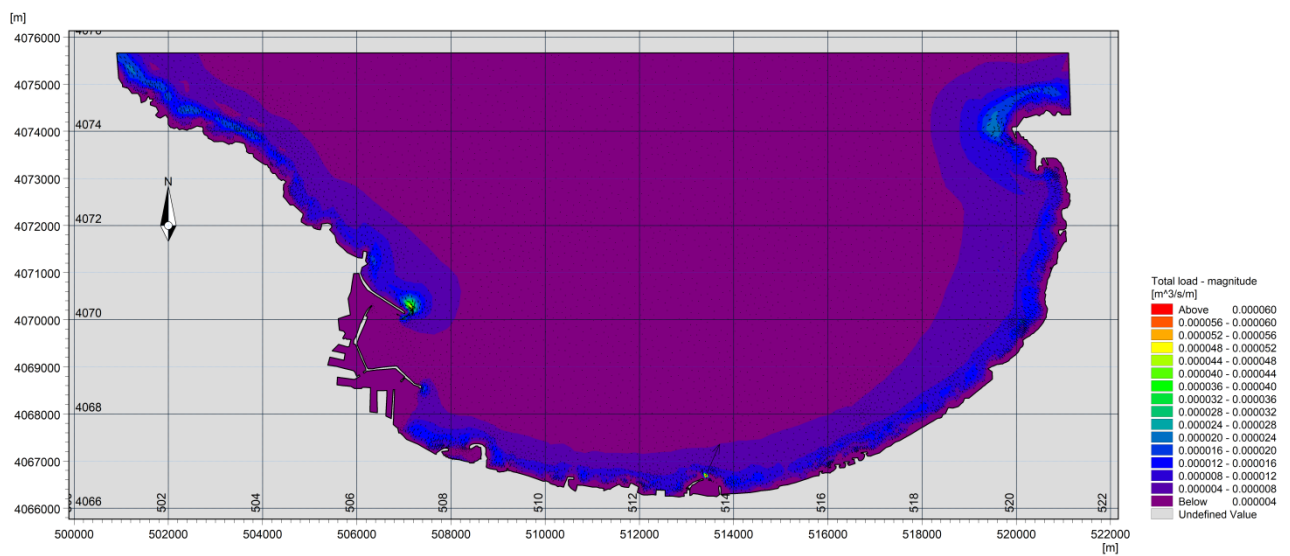


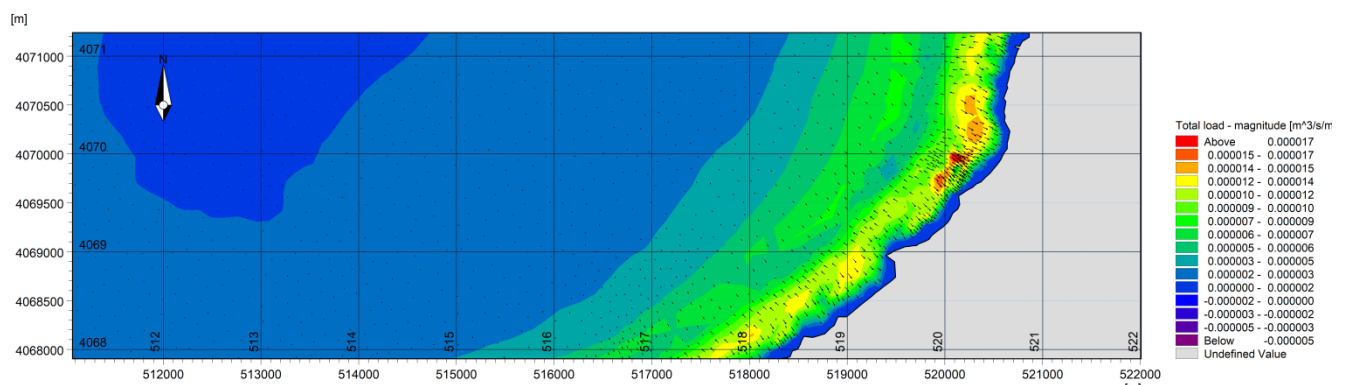
Figure IV. 32 : Dynamique sédimentaire sur la partie Est de la baie d'Alger pour : MWD=360°.



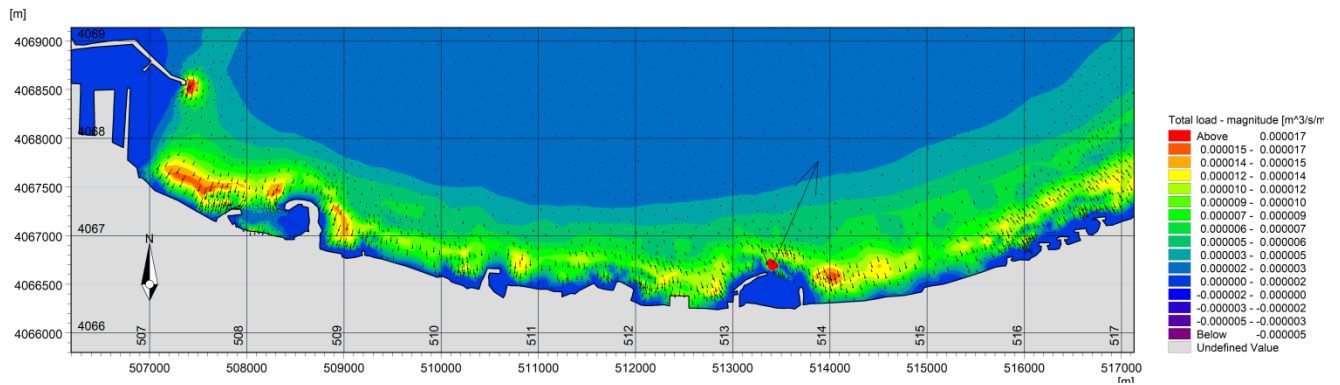
**Figure IV. 33 :** Dynamique sédimentaire sur la partie Ouest de la baie d'Alger pour :  $MWD=360^\circ$ .



**Figure IV. 34 :** Dynamique sédimentaire sur la baie d'Alger pour :  $MWD=315^\circ$ .



**Figure IV. 35 :** Dynamique sédimentaire sur la partie Est de la baie d'Alger pour :  $MWD=315^\circ$ .



**Figure IV. 36 :** Dynamique sédimentaire sur la partie Ouest de la baie d'Alger pour : MWD=315°.

### C. Baie de Zemmouri

Les transports des sédiments calculés dans la zone d'étude adoptent des unités de  $m^3/s/m$  sous l'effet des vagues, des courants de dérive, de retours et des vents d'Est. L'interprétation de ces transports est basée sur le changement de l'intensité du transport d'une maille à l'autre. Par exemple, une diminution des vecteurs de transport d'une maille à l'autre indique une zone de convergence ou de dépôt potentiel des sédiments à cet endroit alors qu'une augmentation des vecteurs adjacents indique une divergence ou un potentiel d'érosion à cet endroit.

De façon générale dans la baie de Zemmouri, une tendance de dérive littorale de l'Est vers l'Ouest semble persister pour les houles de 45°N et Ouest vers Est pour les houles de 315°N, par contre les houles en provenance de 360°N engendrent des transports sédimentaires qui convergent vers les deux directions selon la morphologie de zone au voisinage de la cote.

Les courants modélisés Sur la plage de Cap Djenet (Plage El Stara) génèrent une dérive littorale parallèle à la côte et orientée d'Est en Ouest pour les trois climats de houle (45°, 360° et 315°N). Ces courants de dérive favorisent un transport de sable de  $26 \cdot 10^{-6}$  et  $36 \cdot 10^{-6} m^3/s/m$  soit 808 et 1129  $m^3/an/m$ .

L'intensité de la dérive augmente entre la station électrique de Cap Djenet et le port de Zemmouri, ce qui tendrait à favoriser un déplacement de sable de -1120 et -1368  $m^3/an/m$ , mais en même temps la houle de Nord génère un transport vers l'Est de 345  $m^3/an/m$  moins important que celui généré par les houles de Nord.

Sur la zone comprise entre le rochet noir et le port de Zemmouri (baie de Zemmouri centre), le bilan sédimentaire est complexe, et résulte de la contribution de chaque houle. Les transits sédimentaires des trois directions sont piégés entre les deux extrémités et alimentent cette zone.

A l'extrémité Ouest de la baie, une divergence des écoulements a été mise en évidence : elle est causée par le déferlement des houles sur le platier rocheux. Cette divergence se retrouve dans le transport vers le Ouest et vers le Nord pour les deux directions de houle Est et Nord autour des pointes rocheuses, qui déclenche un transit sédimentaire vers la baie d'Alger et vers le large.

Dans la partie Nord Ain Taya, il est difficile à ce stade de déterminer si le transport résultant est orienté vers le Nord ou l'Ouest, étant donné sa variabilité : fonction de l'incidence des houles et la diffraction de cette dernière avec les ouvrages de protection, des sédiments sont piégés dans cette zone protégée qui favorise l'accumulation et formation d'une plage sableuse.

L'analyse qualitative du transport sédimentaire nous a permis de déterminer le cheminement de la dérive littorale le long de la zone entre Reghaia et le rochet noir. Elle s'effectue globalement de l'Est Vers l'Ouest pour la houle de Nord-Est avec un débit de  $1399 \text{ m}^3/\text{an}/\text{m}$ . Les houles de direction Nord-Ouest et Nord, le transport est orienté vers l'Est, provoquant le dépôt de sédiments le long des brise-lames de la région de Boumerdes avec un taux de  $622 \text{ m}^3/\text{an}/\text{m}$  et  $995 \text{ m}^3/\text{an}/\text{m}$ . Un courant de retours est dirigé vers le large qui aurait tendance à favoriser une perte de sable vers le large, et provoque un déficit sédimentaire de cette région.

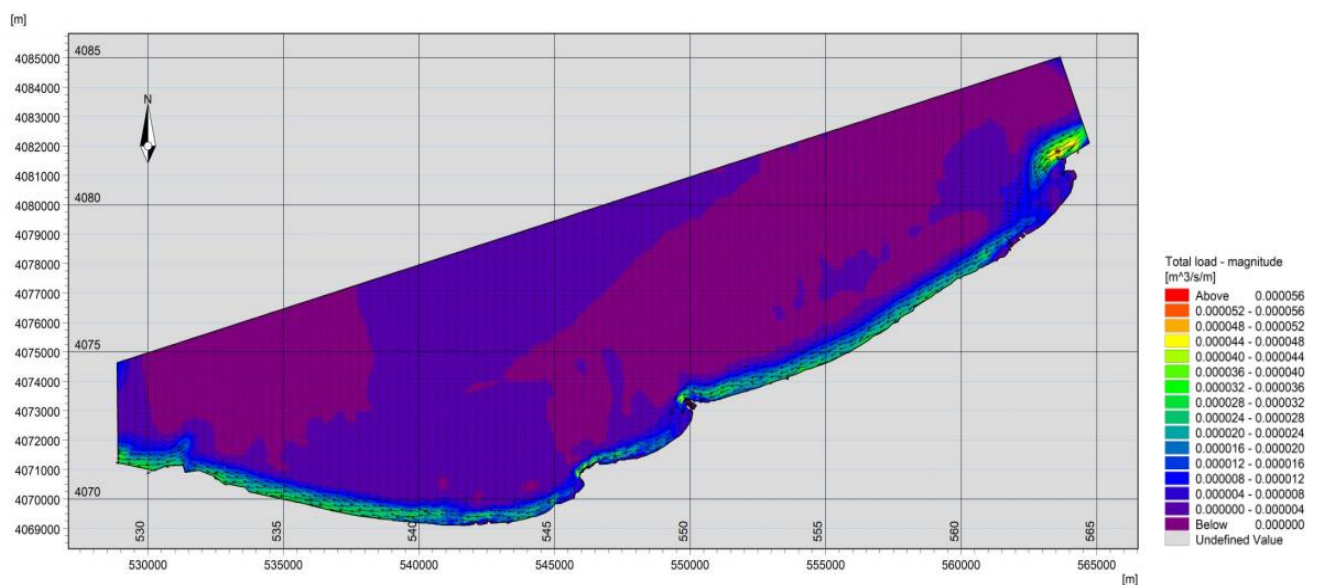


Figure IV. 37 : Dynamique sédimentaire dans la baie de Zemmouri pour : MWD=45°.

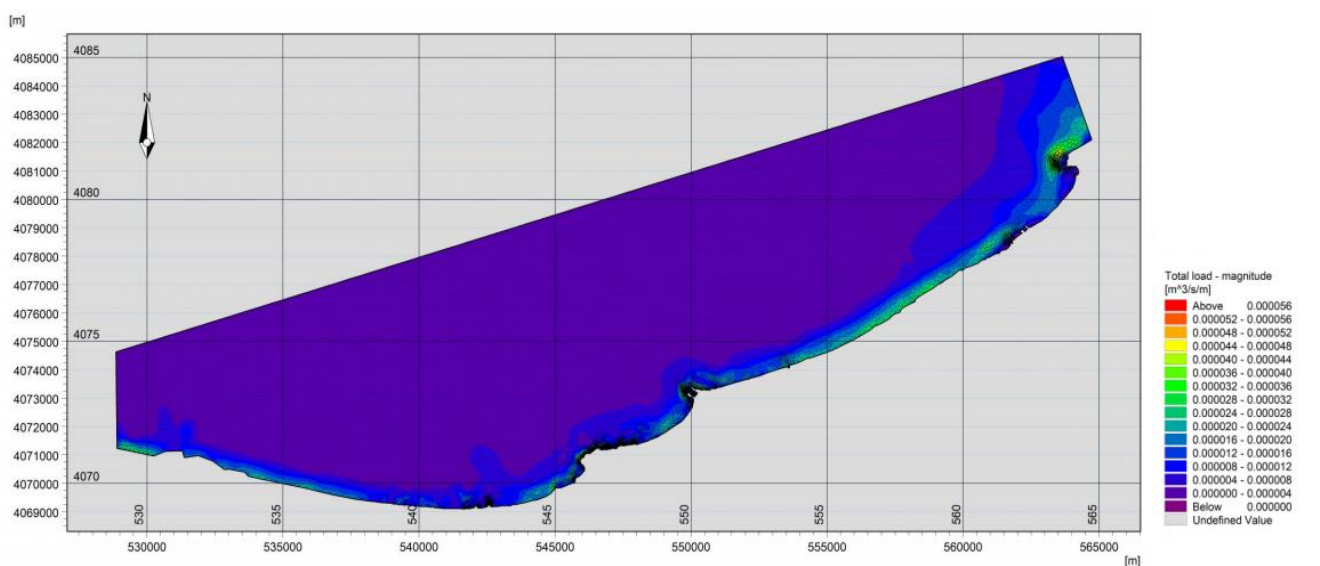
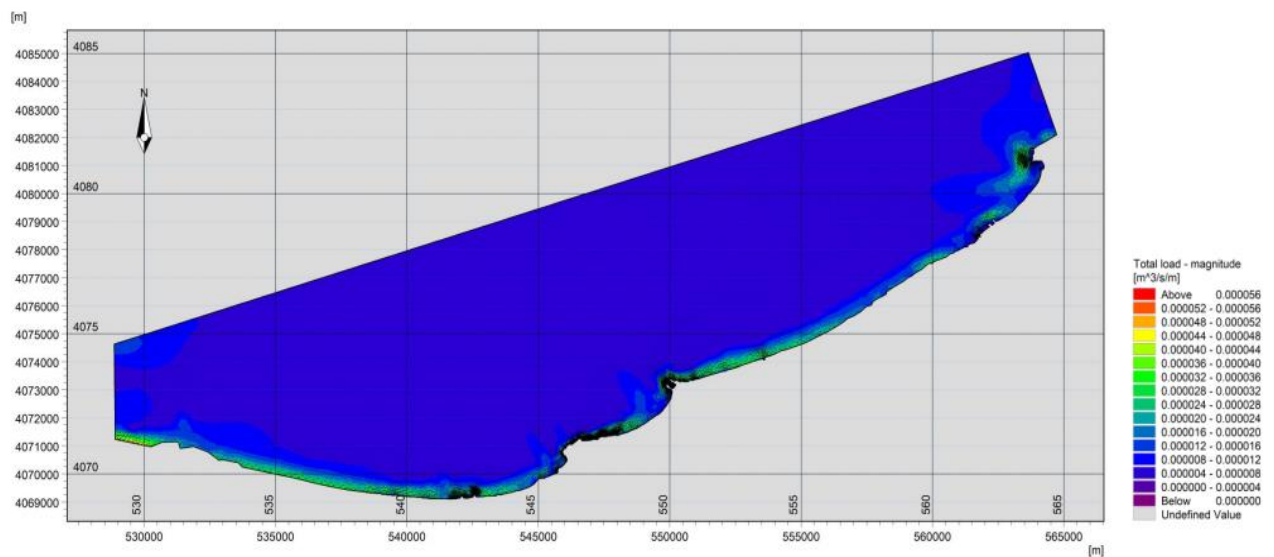


Figure IV. 38 : Dynamique sédimentaire dans la baie de Zemmouri pour : MWD=360°.



**Figure IV. 39 :** Dynamique sédimentaire dans la baie de Zemmouri : MWD=315°.

#### IV.7 Conclusion :

Le modèle MIKE21 2D est utilisé pour la modélisation de la transformation des vagues, des courants et la dynamique sédimentaire dans la côte Algéroise. Les principales conclusions que l'on peut tirer de l'étude sont les suivantes :

Dans la baie de Bou Ismail, les houles provenant de Nord-Est, Nord et Nord-Ouest génèrent des courants parallèles à la côte orientée d'Est en Ouest. Dans le cas où l'orientation du trait de côte change, cette circulation générale peut se modifier et favoriser des rip currents (courants de retour vers le large) de direction opposée. C'est le cas des rip-currents générés à l'Est de Sidi Fredj au niveau des plages du Sahel et de Moritti. L'orientation du trait de côte est donc un facteur important pour comprendre la dynamique sédimentaire.

Dans la baie d'Alger, les houles du Nord et du Nord-Est provoquent un transport vers l'Ouest à travers cette dérive et un transport vers le large en raison des courants de retour dirigés vers le large. Les houles du Nord-Ouest provoquent une dérive littorale vers l'Est.

Dans la baie de Zemmouri, le transport sédimentaire est dirigé vers l'Ouest dans la baie de Zemmouri Est et vers l'Est dans la baie de Zemmouri Ouest. Dans la partie centrale de la baie de Zemmouri, la dynamique sédimentaire est en équilibre entre le transport de sédiments de l'Ouest vers l'Est et vice versa.

# **Chapitre V : : Cinématique du trait de côte**

## **V.1. Introduction :**

L'analyse des changements côtiers a fait l'objet de nombreuses recherches à travers le monde (Abu Zed et al., 2018; Apostolopoulos et al., 2022; Luijendijk et al., 2018).

Le changement de la position du trait de côte a été évalué par des études dans différentes zones de la côte algérienne (AMIS, 2008 ; Ayadi et al., 2015 ; Kermani et al., 2016 ; Otmani et al., 2020, Sallaye 2021). Cependant, ces études restent peu nombreuses par rapport aux 1764km de linéaire côtier algérien. De plus, il est important d'étudier l'ensemble de la côte algéroise qui représente un écosystème fragile et constamment menacé de dégradation en raison de la concentration de la population, des activités économiques et des infrastructures le long de la bande côtière, afin de permettre aux décideurs et aux gestionnaires du littoral d'orienter la gestion et l'aménagement de ce littoral.

L'objectif de ce chapitre s'articule autour des points suivants :

- 1) déterminer la méthode optimale d'extraction du trait de côte ;
- 2) cartographier les taux de changement côtier le long de la côte sableuse Algéroise ;
- 3) analyser qualitativement et quantitativement les variations spatiales et temporelles à long et court terme et enfin
- 4) discuter des principaux facteurs influençant les taux de changement côtier qui devraient être pris en compte pour la gestion du littoral algérois.

## **V.2. Définitions du trait de côte :**

Dans un article publié dans le magazine Hydro International en 2001 sous le titre "Where is the shoreline ? La réponse n'est pas aussi simple qu'on pourrait le croire". M. Parker soulignait la délicatesse de la localisation et du positionnement d'une frontière entre terre et mer dans un espace aussi dynamique que le littoral (Ibrahima Faye, 2010; Parker, 2003).

Afin d'analyser la variabilité et les tendances du littoral, une définition fonctionnelle du "littoral" est nécessaire. En raison de la nature dynamique de cette frontière, la définition choisie doit considérer le littoral dans un sens temporel et spatial et doit prendre en compte la dépendance de cette variabilité à l'échelle de temps à laquelle elle est étudiée.

Pour des raisons pratiques, la définition spécifique choisie est généralement moins importante que la capacité à quantifier la façon dont un indicateur de rivage choisi se rapporte, dans un sens vertical/horizontal, à la limite physique terre-eau (Boak and Turner, 2005c). Le but est donc de développer une technique suffisamment efficace et reproductible pour permettre la détection du trait de côte choisi dans la source de données disponible.

### **V.3.1. Collecte et traitement des données :**

Des images satellitaires multidates (1984-2021) de Landsat5-TM, Landsat7-ETM, Landsat8-OLI et l'image Pléiades ont été utilisées pour extraire les lignes de rivage dans la zone d'étude (Tableau V.1).

Vingt-deux images satellitaires Landsat multitemporelles ont été téléchargées à partir du site Web de l'USGS (<https://earthexplorer.usgs.gov/>) pour couvrir l'ensemble de la zone d'étude. Les images téléchargées ont été corrigées géométriquement et orthorectifiées en utilisant une correction de terrain standard (niveau L1T).

Les images téléchargées étaient dans le système de projection UTM zone 31N et le datum WGS84. Elles sont traitées et on a vérifié que les images téléchargées sont exemptes de nuages dans la zone d'étude. Les images ont été utilisées à différentes périodes de l'année en raison de l'indisponibilité de certaines images sans nuage pendant les mois d'été. Les lignes côtières extraites pendant la saison d'été couvrent les années 1984, 1989, 1994, 1999, 2010, 2013 et 2015. Les lignes côtières extraites pendant la saison d'hiver sont 2007, 2020 et 2021.

**Tableau V. 1** : L'ensemble des satellitaires utilisées dans cette étude.

| Date       | Satellite | Sensor_ID        | Résolution spatiale (m) | Nombre d'images |
|------------|-----------|------------------|-------------------------|-----------------|
| 15/08/1984 | Landsat-5 | TM               | 30                      | 02              |
| 26/06/1989 | Landsat-5 | TM               | 30                      | 02              |
| 24/06/1994 | Landsat-5 | TM               | 30                      | 02              |
| 30/06/1999 | Landsat-7 | ETM <sup>+</sup> | 30                      | 02              |
| 19/01/2007 | Landsat-5 | TM               | 30                      | 02              |
| 19/05/2010 | Landsat-5 | TM               | 30                      | 02              |
| 15/08/2013 | Landsat-8 | OLI_TIRS         | 30                      | 02              |
| 11/09/2015 | Landsat-8 | OLI_TIRS         | 30                      | 02              |
| 06/08/2017 | Pléiades  | /                | 0.5                     | 01              |
| 23/06/2017 | Landsat-8 | OLI_TIRS         | 30                      | 02              |
| 24/12/2020 | Landsat-8 | OLI_TIRS         | 30                      | 02              |
| 18/02/2021 | Landsat-8 | OLI_TIRS         | 30                      | 02              |

### V.3.2. Outil de traitement :

#### ArcGIS :

ArcGIS est une plate-forme logicielle SIG développée par la société ESRI. Cette plate-forme correspond à l'intégration de deux produits distincts plus anciens (ArcInfo et Arcview) et exploite, d'une part, le potentiel de la nouvelle puissance de calcul disponible sur les PC à la fin des années 1990 et, d'autre part, répond à de nouveaux besoins tels que la gestion de données SIG en réseau sur Internet. Ainsi, en 1999, ESRI a produit son premier produit ArcGIS

(ArcGIS8.x), suivi par ArcGIS9.x en 2004 et la dernière version est ArcGIS10.x en 2010 (Chaaban, 2011).

### **Systeme numérique d'analyse du littoral (DSAS) :**

Un progiciel appelé Digital Shoreline Analysis System (DSAS) a été utilisé afin de mesurer les taux de changement du littoral en comparant les rivages vectorisés à différentes dates (Anfuso et al., 2016). DSAS est un outil complémentaire du logiciel ArcGIS, développé par l'USGS. Le logiciel DSAS crée des lignes de transect perpendiculaires au littoral en référence à une ligne de base spécifique définie par l'utilisateur.

L'utilisateur détermine également l'espacement des lignes de transect sur le rivage (Valderrama-Landeros and Flores-de-Santiago, 2019). Le déplacement du de trait de côte vers la mer ou vers la terre, par rapport à la ligne de base, est caractérisé comme une accumulation ou une érosion à chaque transect, respectivement, et les valeurs statistiques sont considérées comme positives pour l'accumulation et négatives pour l'érosion.

Le logiciel calcule diverses valeurs statistiques afin de mesurer le changement de position du rivage (Anfuso et al., 2016). Les principales valeurs sont le taux de point final (EPR) qui mesure le taux de changement de trait de côte entre deux rivages successifs. Le taux de régression linéaire (LRR) inclut toutes les lignes de rivage et peut être déterminé en ajustant une ligne de régression des moindres carrés à tous les points de rivage d'un transect et le mouvement net de rivage (NSM) qui calcule la distance totale entre les rivages successifs. La méthode spécifique de détection des changements de littoral a été utilisée dans le passé avec différents types de données de télédétection.

Le changement du trait de côte est calculé par l'outil DSAS, version 5.0 de l'extension Arc GIS. DSAS utilise plusieurs techniques statistiques telles que le LRR et l'EPR. L'EPR est calculé comme la distance entre le trait de côte le plus ancien et le plus jeune divisée par le temps entre le plus ancien et le plus jeune (Dolan et al., 1991; Himmelstoss et al., 2018). La formule permet de calculer l'EPR comme suit (éq V.1) :

$$EPR = \frac{d_2 - d_1}{t_2 - t_1} \quad (\text{éq V.1})$$

Où :  $d_2$  et  $d_1$  : distance séparant le littoral et la ligne de base.  $t_2$  et  $t_1$  : les dates des deux positions du rivage.

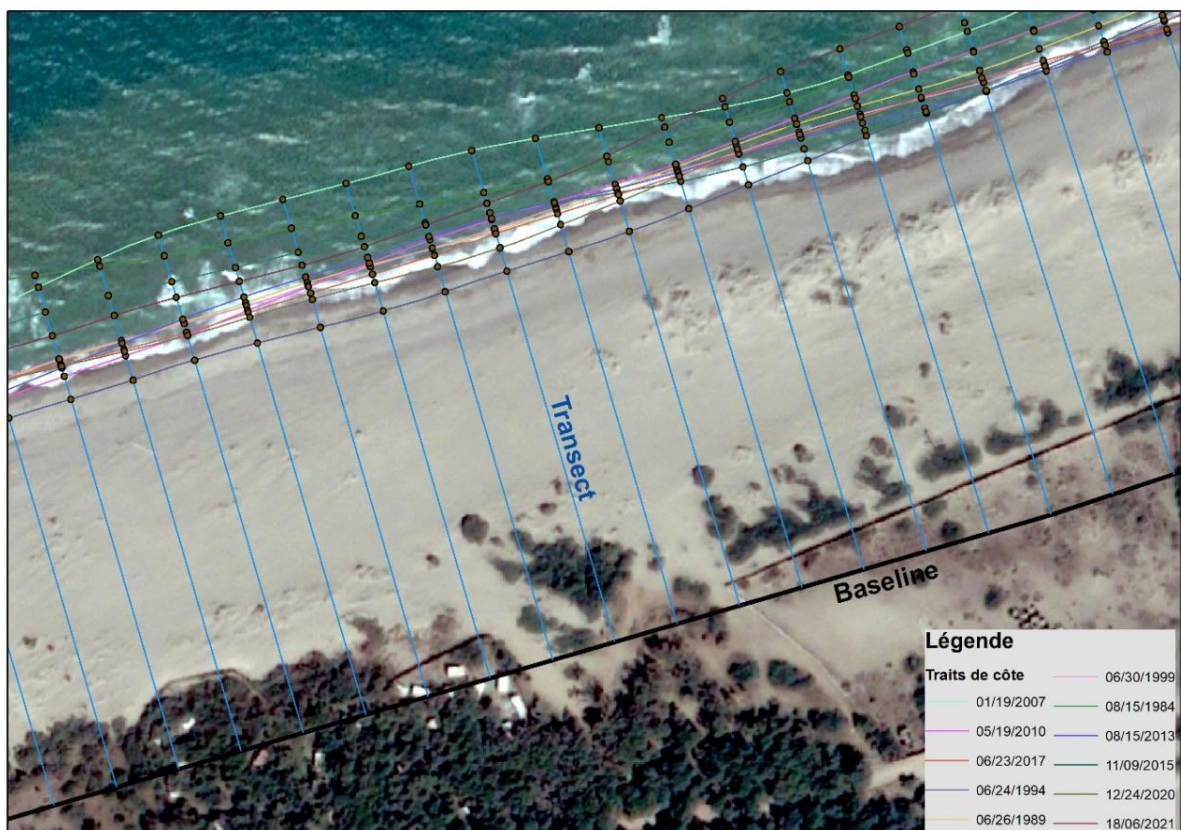
Nous avons utilisé la méthode EPR pour l'analyse des changements du trait de côte à court terme. Selon (Apostolopoulos et al., 2022), la méthode EPR est la plus utilisée par de chercheurs.

Les principaux avantages de la EPR sont la simplicité de la méthode (facilité de calcul) et les exigences minimales en matière d'entrée (seulement deux notations) (Crowell et al., 2018; Nassar et al., 2022).

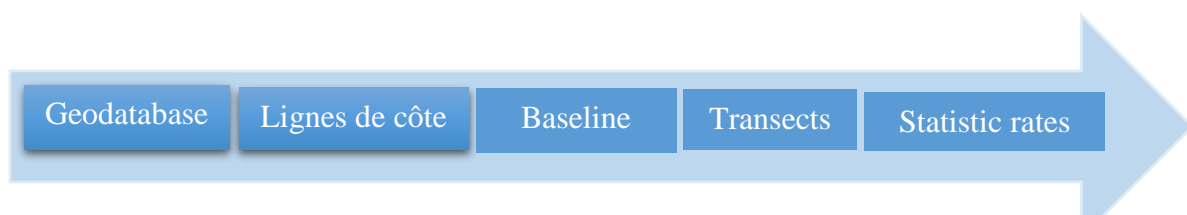
En revanche, la LRR a été utilisée pour calculer les taux de changement du littoral à long terme : l'avantage de cette technique est qu'elle intègre tous les littoraux extraits des images Landsat.

Il a été démontré que la méthode de régression (LRR) joue un rôle efficace pour minimiser l'incertitude potentielle et la variabilité à court terme (Douglas and Crowell, 2000; Maiti and Bhattacharya, 2009). Le programme DSAS a généré 3440 transects espacés de 25m et perpendiculaires à la ligne de base.

Dans l'étude actuelle, DSAS utilise les traits de côte extraits en référence à une ligne de base projetée sur le même système de référence. Les rivages couvrent les années suivantes : 1984, 1989, 1994, 1999, 2007, 2010, 2013 et 2015, 2017, 2020 et 2021. Pour chaque vecteur de rivage, le logiciel nécessite que la date soit prédéfinie au format année/mois/jour. Le logiciel crée des transects qui croisent les traits de côte multitudes à des points spécifiques, qui sont utilisés pour les calculs des LRR. Le calcul de l'LRR est présenté à la figure V.1, tandis que l'organigramme général du DSAS est présenté à la figure V.2.



**Figure V. 1** : Un exemple de calcul du taux de régression linéaire (LRR) en utilisant les rivages de 1984 et 2021 dans la zone d'étude.



**Figure V. 2** : Organigramme de l'algorithme du Digital Shoreline Analysis System (DSAS v.5.0).

#### V.3.4. L'extraction du trait de côte :

Le choix de la méthode d'extraction du trait de côte est une étape importante car elle joue un rôle majeur dans l'incertitude du trait de côte extrait.

Les méthodes d'extraction du trait de côte à partir d'images de télédétection peuvent être divisées en deux catégories : la méthode manuelle (Künzer et al., 2014) et la méthode automatique (Li and Gong, 2016).

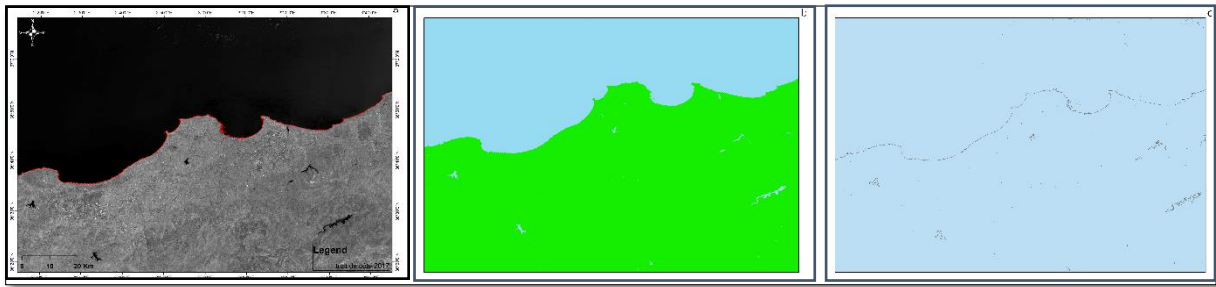
- La méthode manuelle présente les avantages d'une grande précision d'interprétation et d'une extraction continue du trait de côte mais elle est sensible aux facteurs subjectifs, l'efficacité est très faible et le temps manuel est long. La méthode automatique par ordinateur est devenue le principal axe de nombreux chercheurs dans le monde entier en raison de sa grande efficacité et de sa réutilisabilité (Liu et al., 2019). Les méthodes manuelles comprennent principalement deux techniques (méthodes) : **(a)** la numérisation à l'écran **(b)** les mesures de terrain du système de positionnement global différentiel (DGPS).
- Les méthodes automatiques consistent à utiliser des algorithmes mathématiques et des indices à partir d'images satellites pour séparer la terre de l'eau. L'utilisation des algorithmes et des indices se fait à l'aide de logiciels appropriés tels que QGIS ArcGIS, ENVI, ERDAS Imagine, etc.

Dans ce travail, trois techniques d'extraction automatique du trait de côte ont été testées pour l'image multispectrale Landsat-8 OLI de 2017. Chaque technique a été comparée au trait de côte numérisé à partir de l'image haute résolution de 2017 afin de sélectionner la méthode optimale présentant le moins d'erreur. L'outil Arc GIS et l'extension DSASv5 ont été utilisés pour les trois techniques.

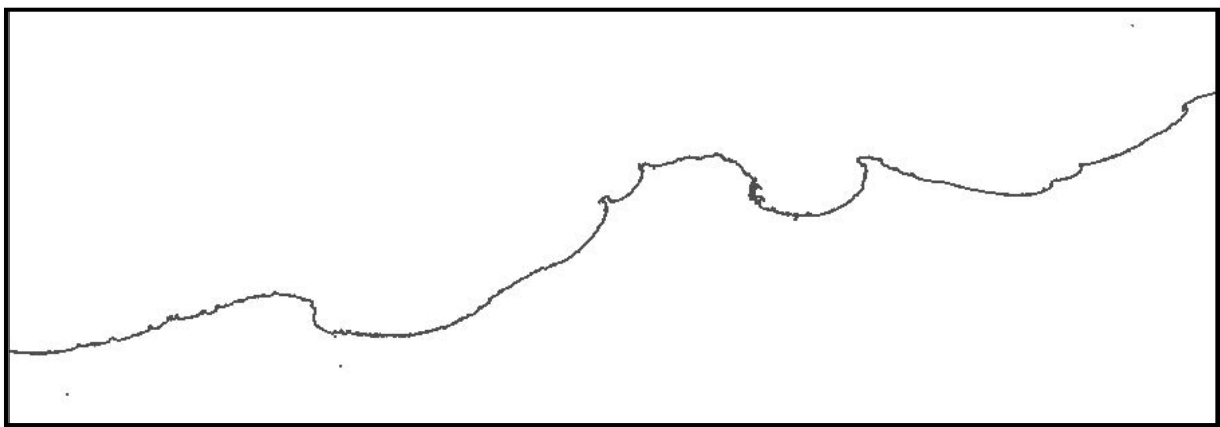
**Méthode 01 :** La première technique consiste à utiliser la bande du proche infrarouge (bande 5) pour séparer l'eau de la terre. La délimitation du littoral par des techniques de télédétection repose sur le comportement spectral varié ou la réponse spectrale de l'eau et d'autres surfaces terrestres à différentes longueurs d'onde. Généralement, les masses d'eau absorbent la majeure partie du rayonnement dans les régions du spectre proche infrarouge et infrarouge moyen. Par conséquent, la réflectance de l'eau est presque égale à zéro dans ces longueurs d'onde.

Pendant ce temps, la réflectance de diverses couvertures terrestres dans les deux régions est supérieure à celle de l'eau (Masria et al., 2015). Cette méthode a été réalisée en trois étapes en utilisant l'outil ArcGIS10.4 et DSASv5:

(1) Identifier les valeurs des pixels de l'image de la bande 5 en essayant d'extraire la valeur du trait de côte qui sépare la terre de l'eau (dans notre cas, la valeur du pixel 9000), ensuite dans l'icône Arc Toolbox puis cliquer « raster calculator » écrire la formule suivante :  $\text{con}(b5 \geq 9000, 1, 0)$  enfin cliquer sur ok . (2) Convertir le raster en polygone. (3) Convertir le polygone en ligne puis extraire le trait de côte.



**Figure V. 3 :** Les étapes d'extraction du trait de côte pour l'année 2017. a) bande 5 de l'image Landsat. b) l'image binaire résultant de la condition. c) l'image polygonale résultant de la conversion d'une image binaire.



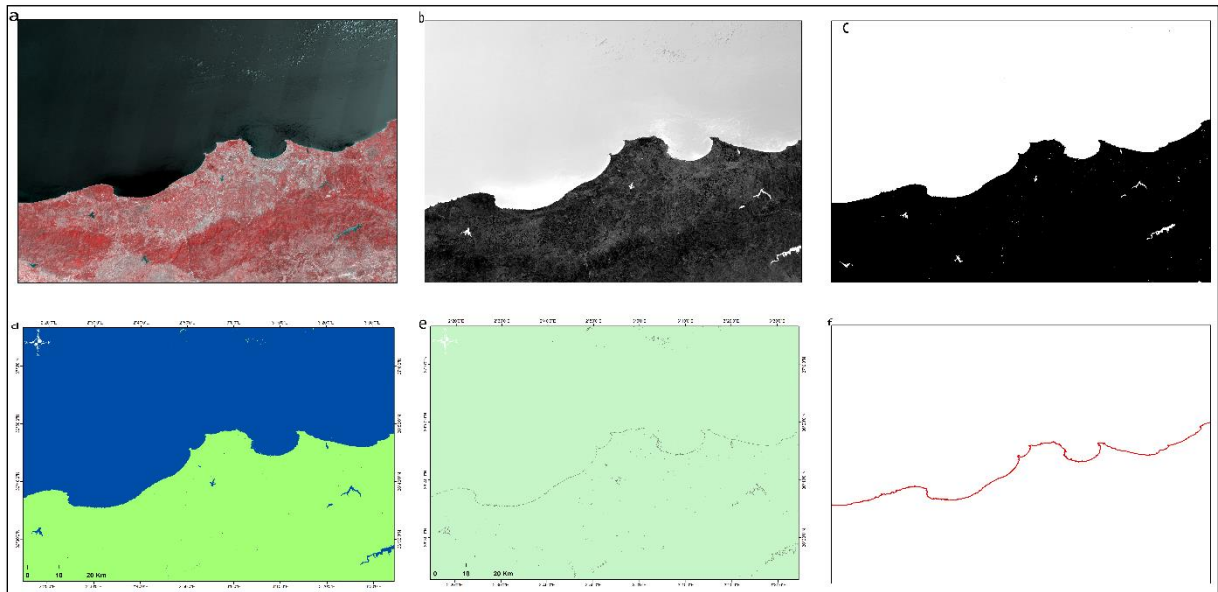
**Figure V. 4 :** Le trait de côte de 2017 extrait par la technique de la bande proche infrarouge.

**Méthode 02 :** la deuxième méthode utilisée est Normalized Difference Water Index (NDWI). Cette méthode repose sur l'utilisation des bandes de longueur d'onde visibles et proches infrarouges (NIR) des capteurs Landsat-8 OLI pour séparer la terre et l'eau (Abu Zed et al., 2018), le NDWI est déterminé comme suit :

$$NDWI = \frac{(Vert - NIR)}{(Vert + NIR)} \quad (\text{éq V.2}) \quad (\text{McFeeters, 1996}).$$

Dans notre cas, verte c'est la bande 3 et NIR c'est la bande 5.

Cet indice est conçu pour maximiser la réflectance de l'eau en utilisant la longueur d'onde verte, minimiser la faible réflectance du NIR par caractéristique de l'eau et prendre en compte la réflectance élevée du NIR par la végétation et les caractéristiques du sol. En conséquence, les caractéristiques de l'eau ont des valeurs positives et améliorées, tandis que la végétation et le sol ont généralement des valeurs nulles ou négatives (Alesheikh et al., 2004) .



**Figure V. 5 :** a) représente les étapes d'extraction du trait de côte à l'aide du NDWI pour l'image satellite originale de 2017. b) montre l'image satellite après application de l'équation du module NDWI. c) l'image binaire utilisée pour extraire le trait de côte. d) l'image raster produite. e) le polygone extrait du raster. f) le trait de côte vectorisé final.

**Méthode 03 :** la troisième méthode combinait Normalised Difference Vegetation Index et Tasseled Cap Transformation (NDVI -TCT). Cette méthode est résumée par les étapes suivantes :

Les limites de la zone d'intérêt sont établies en recadrant les images Landsat8. L'étape suivante est la détermination de l'Indice de Végétation Différencié Normalisé (NDVI), en utilisant une image composite de la bande rouge et du proche infrarouge pour déterminer le niveau de verdure et la classification des zones de végétation (figure III.6a). Ensuite, à l'aide de Tasseled Cap, le canal des bandes est converti en un nouvel ensemble de bandes faciles à interpréter (luminosité figure III.6b, verdure figure III.6c, humidité figure III.6d). L'étape suivante consiste à utiliser les valeurs de NDVI, de luminosité, de verdure et d'humidité par la méthode IsoCluster (méthode de classification non supervisée) pour créer un ensemble de données à 10 classes (figure III.6e). Ensuite, les 10 classes ont été recalculées en deux classes, à savoir la classe terre avec la valeur 0 et la classe mer avec la valeur 10 (figure III.6f). Enfin la délimitation du trait de côte, qui consiste à créer un trait de côte à partir de deux classes de données en utilisant le filtre majoritaire, les commandes contours et ligne lisse (Daniels, 2012).

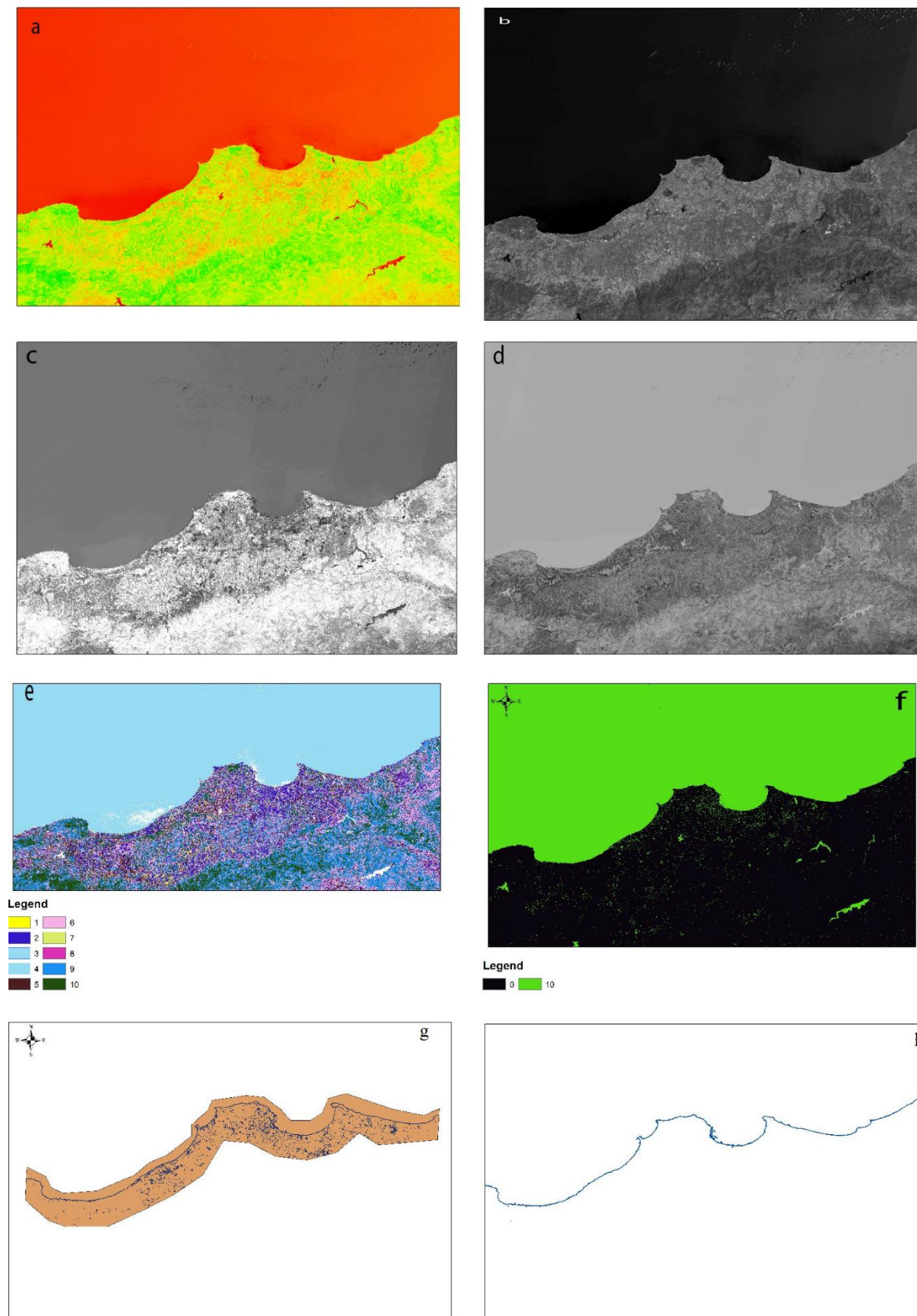


Figure V. 6 : Les étapes d'extraction du trait de côte 2017 par la technique NDVI-TCT.

### V.3.5 Evaluation de la précision :

La procédure de validation consiste à comparer le trait de côte numérisé à haute résolution en 2017 et le trait de côte extrait de l'image en 2017 pour trois baies : Baie de Bou Ismail sur 623 transects, Baie d'Alger sur 655 transects et Baie de Zemmouri sur 1049 transects. L'intervalle des transects est de 25 m pour les trois baies. Cet intervalle (25 m) est plus que suffisant, car il n'y a pas d'influence significative dans les résultats (Apostolopoulos et al., 2020).

Deux mesures statistiques, le coefficient de régression ( $R^2$ ) et l'erreur quadratique moyenne normalisée (NRMSE) ont été proposées pour évaluer la précision d'une part et choisir la méthode optimale parmi les trois méthodes ci-dessus d'autre part.

La corrélation élevée indique que la méthode d'extraction des lignes de côte à partir de l'image Landsat est efficace pour obtenir des taux valides de changement de ligne de côte et que ces taux sont comparables à ceux numérisés à partir de l'image à haute résolution.

L'erreur quadratique moyenne normalisée (NRMSE) a été choisie pour déterminer la méthode de moindre erreur pour la détection du trait de côte. NRMSE est calculée par l'équation suivante :

$$NRMSE = \frac{RMSE}{L_n} \quad (\text{éq V.3})$$

Où  $L_n$  est la moyenne des longueurs des transects du littoral numérisé. RMSE est l'erreur quadratique moyenne (eq V.4)

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (L_{n,i} - L_{ex,i})^2}{n}} \quad (\text{éq V.4}) \quad (\text{Willmott, 1981})$$

Où  $n$  est le nombre de transects ;  $L_{n,i}$  est la longueur du transect de la ligne de base à la ligne de rivage numérisée au transect numéro  $i$  ;  $L_{ex,i}$  est la longueur du transect de la ligne de base à la ligne de rivage extraite au transect numéro  $i$ .

L'analyse des résultats de  $R^2$  de la méthode TC-NDVI montrent que  $R^2$  est de 0.85 (figure V.7-a1) dans la baie de Bou Ismail, 0.6 dans la baie d'Alger (figure V.8-a1) et 0.82 dans la baie de Zemmouri (Figure V.9-a1).

L'extraction du trait de côte par la méthode NDWI, montrent que  $R^2$  est de 0.48, 0.43 et 0.48 pour la baie de Bou Ismail, la baie d'Alger et la baie de Zemmouri successivement (Figure V.7-b1 à V.9-b1).

L'extraction du trait de côte par la méthode proche infrarouge, révèlent que  $R^2$  est de 0.5, 0.57 et 0.67 pour la baie de Bou Ismail, la baie d'Alger et la baie de Zemmouri respectivement (Figure V.7-c1 à V.9-c1).

Les résultats ci-dessus signifient une forte corrélation entre le trait de côte numérisé à partir de l'image à haute résolution de 2017 et le trait de côte détecté à partir de l'image Landsat de 2017 par la méthode TCT-NDVI.

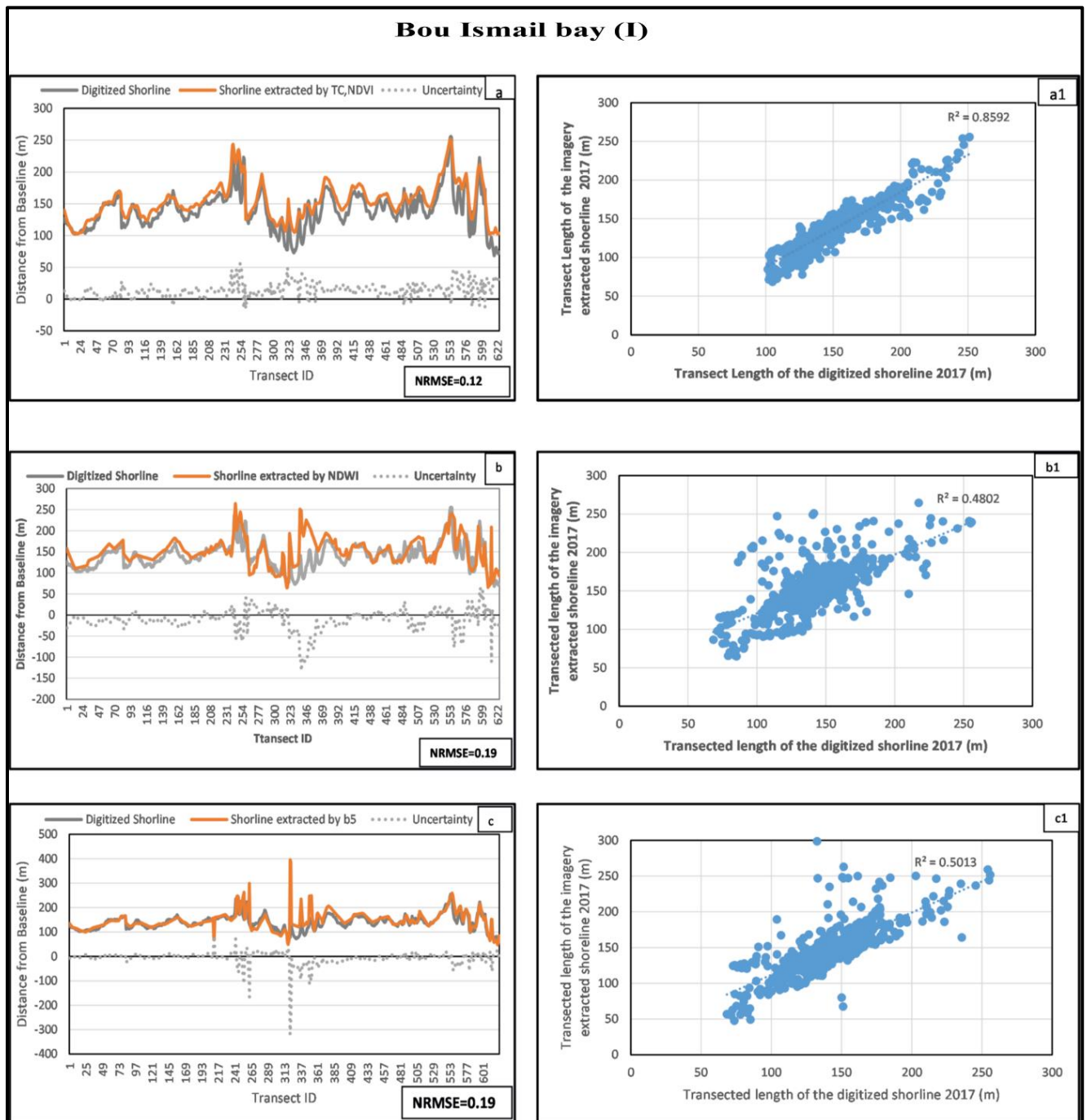
L'extraction du trait de côte par la méthode TCT-NDVI montre que NRMSE est de 0.12 dans la baie de Bou Ismail, 0.29 dans la baie d'Alger et 0.10 dans la baie de Zemmouri (Figures V7-a1 à V9-a1).

L'extraction du trait de côte par la méthode NDWI, NRMSE est de 0.19 dans la baie de Bou Ismail, 0.24 dans la baie de d'Alger et 0.10 dans la baie de Zemmouri (Figures V.7-b<sub>1</sub> à V.9b<sub>1</sub>).

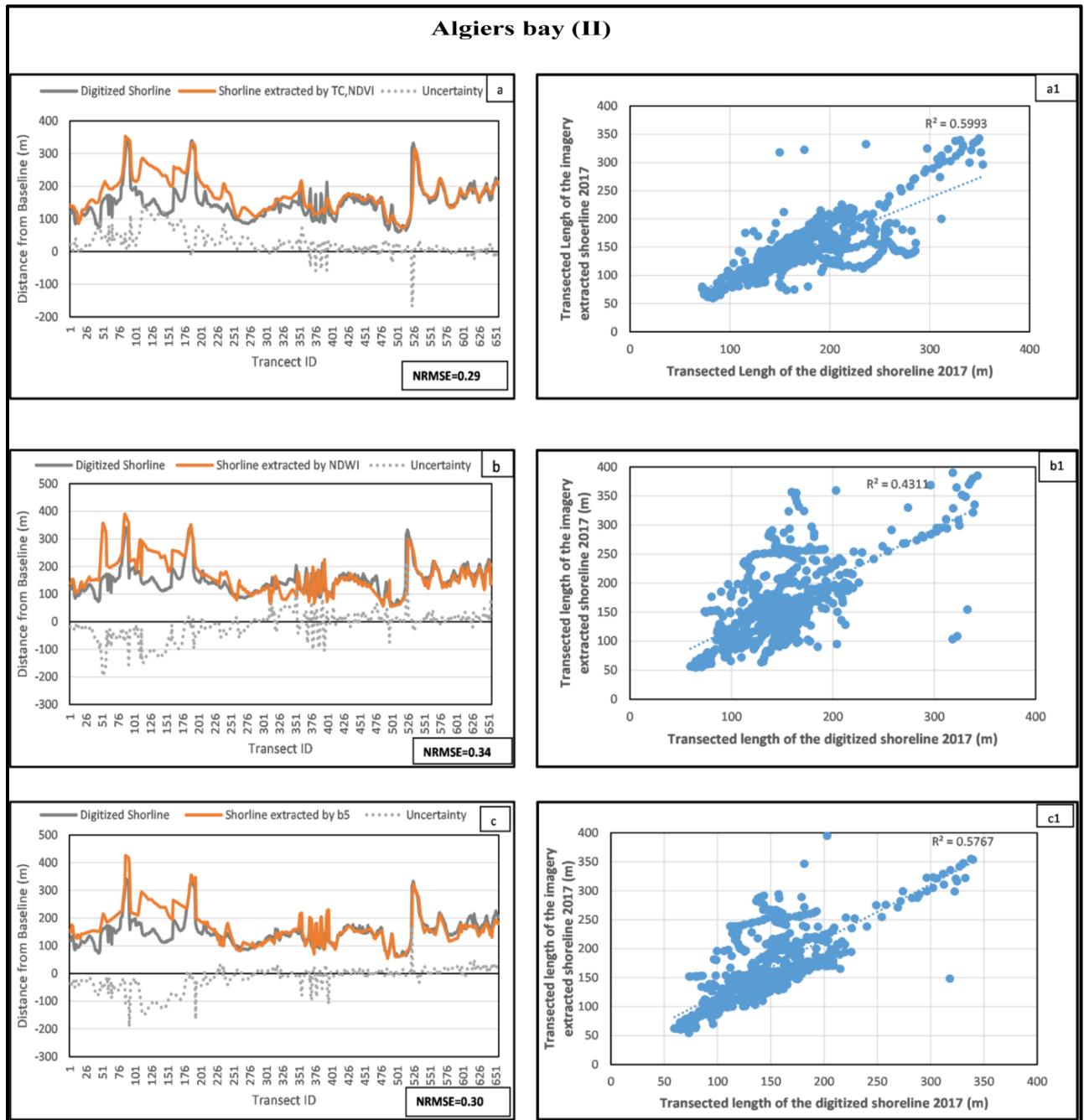
L'extraction du trait de côte par la méthode b<sub>5</sub> révèle que NRMSE est de 0.19 dans la baie de Bou Ismail, 0.30 dans la baie d'Alger et 0.19 dans la baie de Zemmouri (Figures V.7c<sub>1</sub> à V.9c<sub>1</sub>).

On constate que l'utilisation de la méthode TCT-NDVI pour l'extraction du trait de côte montre un NRMSE plus faible dans la baie de Bou Ismail, la baie d'Alger et la baie de Zemmouri par rapport à la méthode NDWI et à la méthode de la bande proche infrarouge.

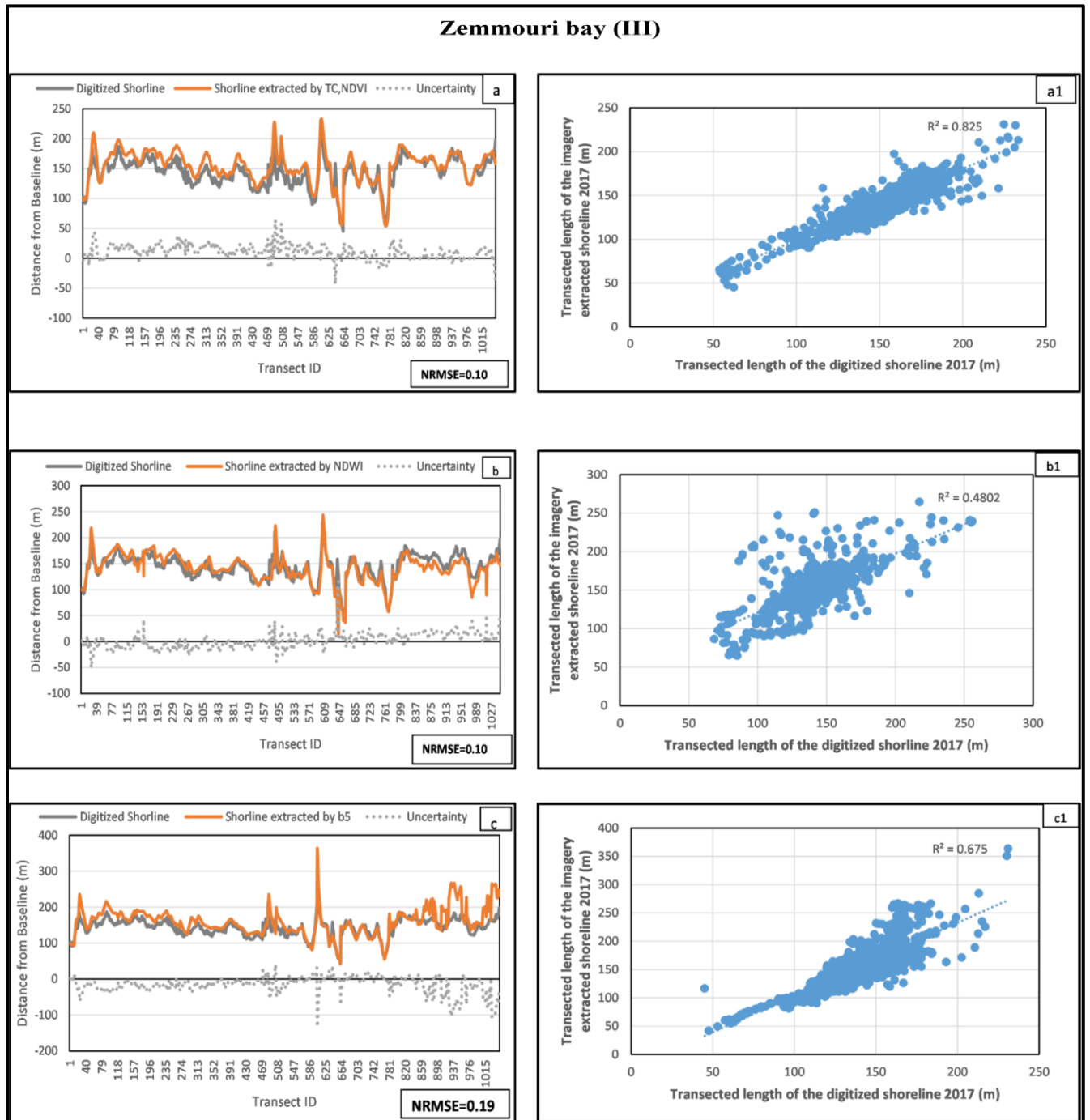
Après toutes ces considérations, la méthode TCT-NDVI a été choisie pour l'extraction des traits de côte Algéroise entre 1984 et 2021.



**Figure V. 7 :** Procédure de validation entre le littoral numérisé à partir de l'image satellite Pléiades à haute résolution (0.5 m) de 2017 et le littoral détecté par imagerie en 2017 ; (a, a<sub>1</sub>) NRMSE et R<sub>2</sub> de NDVI-Tasseled Cap ; (b, b<sub>1</sub>) NRMSE et R<sup>2</sup> de NDWI ; (c, c<sub>1</sub>) NRMSE et R<sup>2</sup> de bande 5 pour la baie de Bou Ismail.



**Figure V. 8** : Procédure de validation entre le trait de côte numérisé à partir de l'image satellite Pléiades à haute résolution (0.5 m) de 2017 et le trait de côte détecté par imagerie en 2017 ; (a, a<sub>1</sub>) NRMSE et R<sup>2</sup> de NDVI-Tasseled Cap ; (b, b<sub>1</sub>) NRMSE et R<sup>2</sup> de NDWI ; (c, c<sub>1</sub>) NRMSE et R<sup>2</sup> de bande 5 pour la baie d'Alger.



**Figure V. 9** : Procédure de validation entre le littoral numérisé à partir de l'image satellite Péliades à haute résolution (0.5 m) de 2017 et le littoral détecté par imagerie en 2017 ; (a, a<sub>1</sub>) NRMSE et  $R^2$  de NDVI-Tasseled Cap ; (b, b<sub>1</sub>) NRMSE et  $R^2$  de NDWI ; (c, c<sub>1</sub>) NRMSE et  $R^2$  de bande 5 pour la baie de Zemmouri.

### V.3.6 Estimation des erreurs :

La valeur de l'estimation de l'incertitude (erreur) de chaque trait de côte est un élément vital pour vérifier la précision et la signification des résultats (Hapke et al., 2006). Il existe deux types d'incertitude : l'incertitude positionnelle et l'incertitude de mesure (Fletcher et al., 2003; Genz et al., 2007; Kankara, 2015; Morton and Miller, 2005).

Les incertitudes positionnelles sont liées aux saisons (Es) (Fletcher et al., 2012) et à la fluctuation des marées (Etd) (Ayadi et al., 2016 ; Fletcher et al., 2012). Les incertitudes de mesure sont liées à des erreurs telles que l'erreur de numérisation (Ed) (Apeaning Addo et al., 2012; Rajasree et al., 2016), l'erreur de rectification (Er) et l'erreur de pixel (Ep) (Kankara et al., 2015 ; Morton et Miller, 2005).

Dans la présente étude, les images satellites ont déjà été orthorectifiées et traitées au niveau L1T. En outre, toutes les images sélectionnées ont une résolution spatiale uniforme (~30 m). Par conséquent, toutes ces erreurs (Er, Ep) peuvent être négligées (Mishra et al., 2019; Santos et al., 2021).

L'incertitude totale (Et) du trait de côte a été calculée avec l'équation (éqV.5) pour chaque période de temps, et les résultats sont présentés dans (Tableau.2).

$$Et(m) = \sqrt{Ep^2 + Er^2 + Etd^2 + Es^2 + Em^2} \text{ (éq V.5) (Fletcher et al., 2003)}$$

Il est important de souligner que l'erreur saisonnière a été prise en compte dans les calculs de l'incertitude totale pour les périodes (2007-2013, 2007-2013 et 2013-2021) car les images (2007, 2013 et 2021) sont sélectionnées à des saisons différentes. En revanche, pour les périodes (1984-1989, 1989-1994, 1994-1999), l'erreur saisonnière est négligée car ce sont les images qui ont été sélectionnées pendant la période estivale. Tableau V. 2 :

#### Estimation des erreurs de position et de mesure pour chaque source de données.

| Erreurs estimées             | 1984 | 1989 | 1994 | 1999 | 2007 | 2010 | 2013 | 2015 | 2017 | 2020 | 2021 | Remarques                    |
|------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------------------------------|
| l'erreur saisonnière (es)    | 5    | 5    | 5    | 5    | 5    | 5    | 5    | 5    | 5    | 5    | 5    |                              |
| Fluctuation de la marée (Et) | 0.5  | 0.5  | 0.5  | 0.5  | 0.5  | 0.5  | 0.5  | 0.5  | 0.5  | 0.5  | 0.5  |                              |
| Erreur de géoréférencement   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | Toutes les images ont été    |
| Erreur Digitalisation (Ed)   | 3    | 3    | 3    | 3    | 3    | 3    | 3    | 3    | 3    | 3    | 3    |                              |
| Erreur de pixel - Ep (m)     | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | Résolution spatiale uniforme |
| Erreur totale (Et)           | 5.85 | 5.85 | 5.85 | 5.85 | 5.85 | 5.85 | 5.85 | 5.85 | 5.85 | 5.85 | 5.85 |                              |

En utilisant l'outil DSAS, les incertitudes du taux de changement annuel en m/an sont les intervalles de confiance à 95% (EPRunc 95% et LCI 95%). L'incertitude associée au calcul de l'EPR et du LRR est automatiquement calculée dans l'application de DSAS v5. L'incertitude (EPRunc 95%) est indiquée dans le tableau 3 et (LCI 95%) dans le tableau 4.

Les taux de changement du trait de côte obtenus par la méthode statistique LRR sont cartographiés dans les Figures V.10-V.12.

La classification des taux de changement du trait de côte en 08 classes fournit un intervalle au milieu comme une tendance stable (entre -0.5 et +0.5m/an (Esteves and Finkl, 1998), les valeurs inférieures à -0.5 m/an signifient une érosion tandis que les valeurs supérieures à 0.5 m/an indiquent une accrétion. Un gradient de couleur est appliqué pour représenter chaque classe dans les figures V10-12. En outre, le pourcentage de plages mesurées comme s'érodant à des taux supérieurs à -1m/an et -3m/an est présenté dans le tableau V3. Le tableau V3 présente également les taux moyens de changement du littoral dans chaque section du littoral, le pourcentage d'érosion, l'érosion maximale et l'accrétion maximale.

### **V.4. Les résultats :**

#### **V.4.1 Evolution du littoral à long terme :**

L'analyse de l'évolution à long terme du littoral algérois indique que plus de 50% des transects montrent un littoral stable, alors que 33,28% sont en état d'accrétion avec un taux supérieur à 0.5m/an. On note que 16.36% des transects sont en érosion, 11.33% s'érodent à des taux supérieurs à -1m/an et 4.91% s'érodent à des taux supérieurs à -3 m/an (Tableau V3).

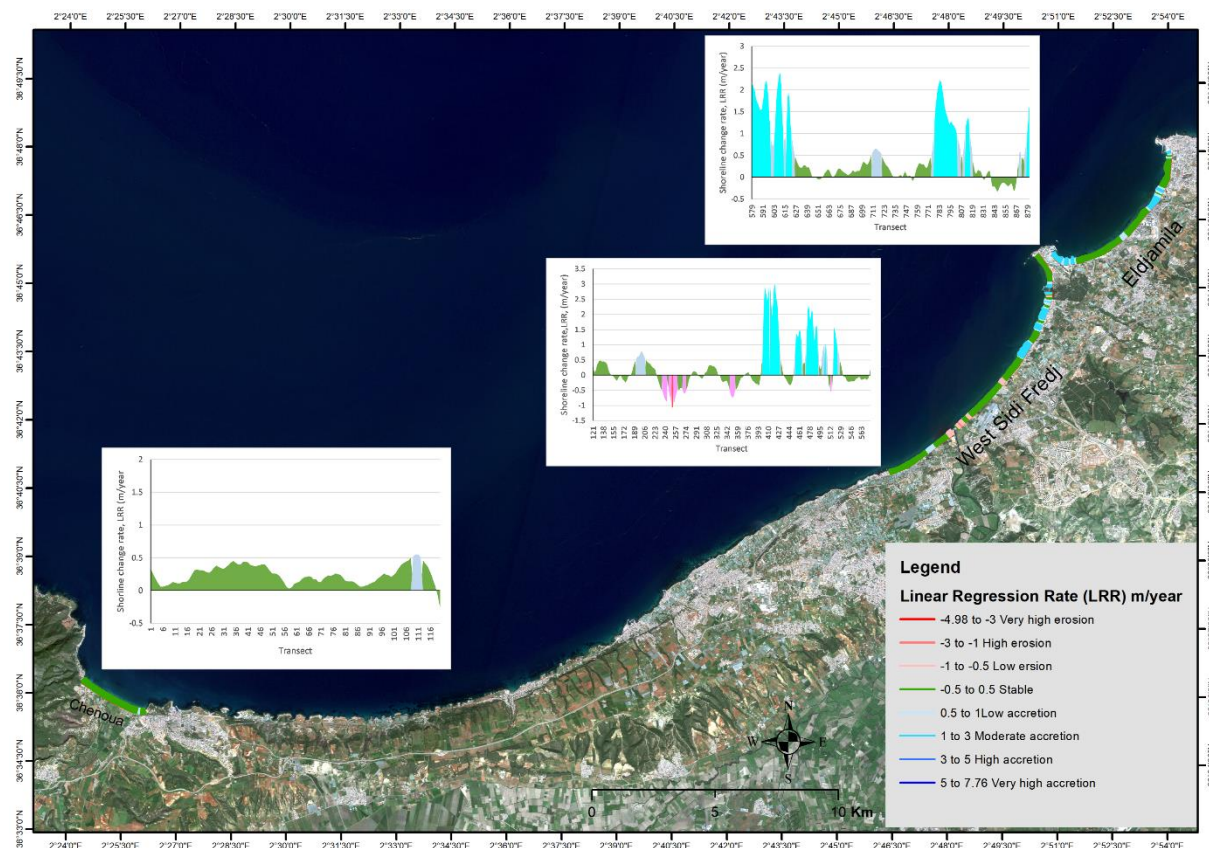
Les taux d'évolution du littoral sur le long terme montrent que les zones (I, II et III) présentent une variabilité importante des tendances d'évolution du littoral. Plus de 70% des plages de la baie de Bou Ismail sont stables avec un taux moyen de changement du trait de côte de 0,35m/an (c'est-à-dire entre -0.5m/an et +0.5m/an), alors que les plages de la baie d'Alger ont une tendance à l'accrétion avec un taux moyen de changement du trait de côte de 1.24m/an. Alors qu'environ 28% des plages de la baie de Zemmouri s'érodent à des taux supérieurs à -0.5 m/an.

A long terme, le taux net de changement de la ligne de rivage dans la baie de Bou Ismail, en moyenne sur 881 transects, était de 0.35 m/an dans la baie de Bou Ismail, allant de -1.07 à 3.0 m/an. Seuls 4 % des transects dans la baie de Bou Ismail ont subi une érosion à long terme et aucune des côtes n'avait un taux d'érosion supérieur à -3 m/an (tableau V3).

Les résultats des taux de changement du littoral des sections de la baie de Bou Ismail montrent que 96% des transects de la plage de Chenoua sont stables, suivis par 68% à Sidi Fredj ouest et 63% à El Djamila. Seuls 9 % des transects de la plage de Sidi Fredj Ouest sont érodés à des taux supérieurs à 0.5 m/an. L'érosion est nulle sur tous les rivages de Chenoua et de Sidi Fredj.

Les tronçons côtiers présentant une récession sont situés au niveau de la plage Khelloufi 1, Centre Familiale et Plage Familiale avec, des valeurs maximales de -1.06 m/an et -

1.08 m/an, -0.52m/an respectivement .Tandis que les zones d'accrétion sont observées au niveaux des plages de Complexe touristique, Palm-beach, la plage El Riadh et la plage Dauphin, avec des taux maximum respectivement de 2.68 m/an, 1.02 m/an, 2.35 m/an, et 1.68 m/an.



**Figure V. 10 :** Taux de changement du trait de côte des plages de la baie de Bou Ismail de 1984 à 2021 calculé par la méthode du Taux de Régression Linéaire (LRR).

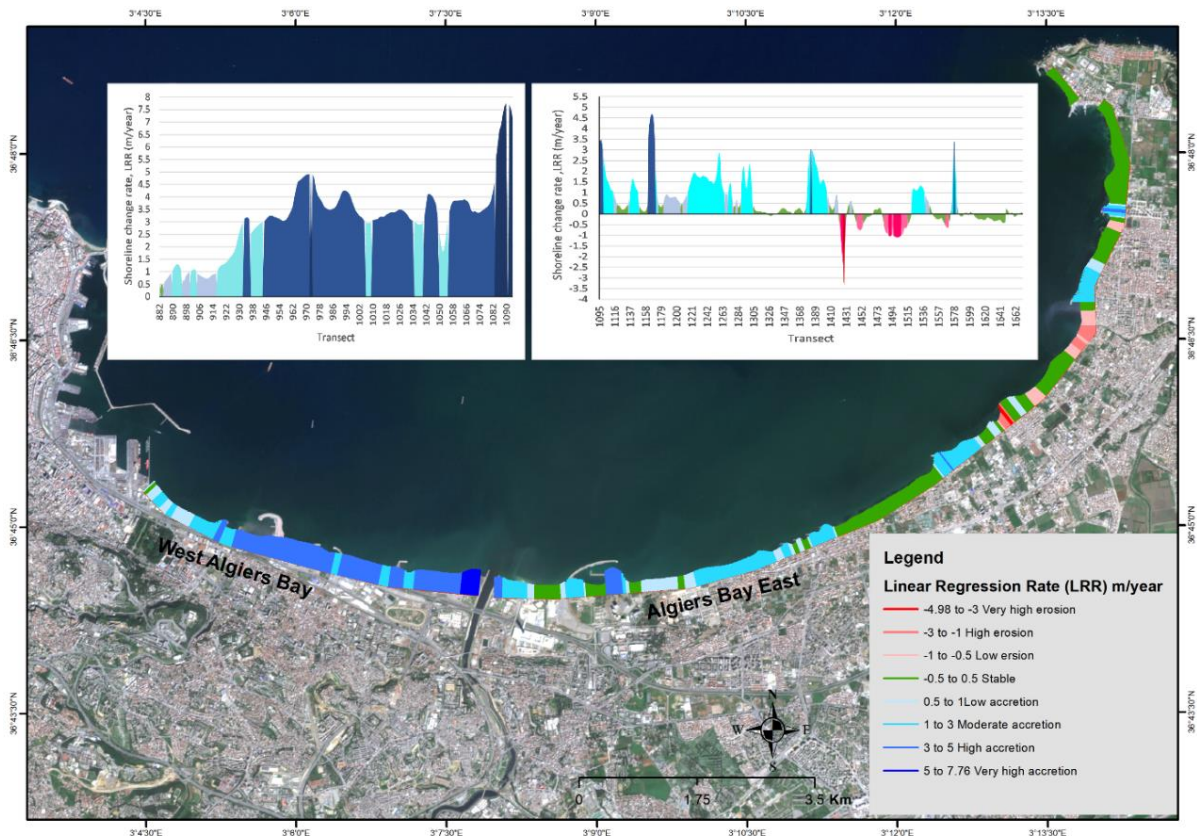
Le littoral de la baie d'Alger s'étend sur environ 20 km entre le Cap Matifou à l'est et la Pointe Pescade à l'ouest (Fig. V.11). Les taux de changement du littoral varient de -3.36 à 7.76 m/an (Tableau V3) et seuls 7.07% des transects étaient en érosion, soit 2% de plus de -1 m/an.

Le résultat indique que l'accrétion est caractéristique des plages d'Alger Ouest, plus de 99 % en situation d'accrétion à un taux d'accrétion moyen de 3.1m/an. La plus forte accrétion a été enregistrée (7.76m/an) près de l'embouchure de la rivière d'El Harrach. Les plages d'Alger-Est présentent une grande variété de la tendance d'évolution du littoral ; le taux de cette évolution varie de -3.36m/an à 4.66m/an. Les plages situées au niveau de l'installation des ouvrages de protection présentent une accrétion importante. Dans la baie d'Alger Est (fig. V11.), il y a aussi quelques plages où une érosion importante a été observée aux transects (1423 à 1431, 1446 à 1464, 1473 à 1515 et 1566 à 1575), avec un taux de recul maximal de -3.36m/an.

à 2021 calculé par la méthode du Taux de Régression Linéaire (LRR).

Les secteurs qui ont enregistré un recul plus ou moins marqué durant cette période sont localisés au fond de la baie (plage Bateau Cassé, Coco Plage et Alger plage) avec des taux de -0.76, -1.01 et -0.55 respectivement. L'avancée la plus marquée du rivage est observée sur la

partie Ouest de la baie au niveau des plages (Plage la Sablette, Plage Paquet Blanc) avec des taux d'accrétion de 4.92 et 7.76 (Figure V.11). Cependant ces engraissement de la côte sont dus soit à un remblaiement de la côte (plage la sablette et embouchure de oued el Harrach) ou à un rechargement artificiel des plages (plage lido et fort turc).



**Figure V. 11 :** Taux de changement du trait de côte des plages de la baie d'Alger de 1984

Les changements à long terme du littoral de la baie de Zemmouri montrent que 27.77% des transects ont été érodés, tandis que 30.31% des transects sont en situation d'accrétion et 41.92% des transects sont stables, c'est-à-dire qu'ils varient à des taux de -0.5m/an à 0,5m/an.

Il faut noter que sur les 1768 transects analysés, plus de 20% des transects se sont érodés à des taux supérieurs à -1m/an et plus de 9% se sont érodés plus vite que -3m/an à long terme (tableau V3).

A long terme, sur 996 transects analysés, le taux moyen de changement dans la section Zemmouri Ouest était de 0.4 m/an, 40.06% des transects étaient en situation d'accrétion et 54.32% des transects étaient stables. Plus de 5.60% des transects étaient en érosion mais aucune des côtes n'avait un taux d'érosion supérieur à -1 m/an (Tableau V3). Les plages stables dans cette section sont les suivantes : Kef El Arar, Surcouf, Deca Plage, Sidi El Khither, Ben Abde Allah El Mamarine, Jardin El Nacer, Plage El Azrek. Les plages Mouilha et la partie Est de la plage Zerzouria sont touchés par l'érosion à des taux maximale de -0.86 m/an et -0.79 m/an successivement. L'accrétion la plus importante de la côte, au cours de ces 37 années, est observée au niveau des plages de Corso, El Kadous, Bouzegza, Naoures, Plage Dauphin, El

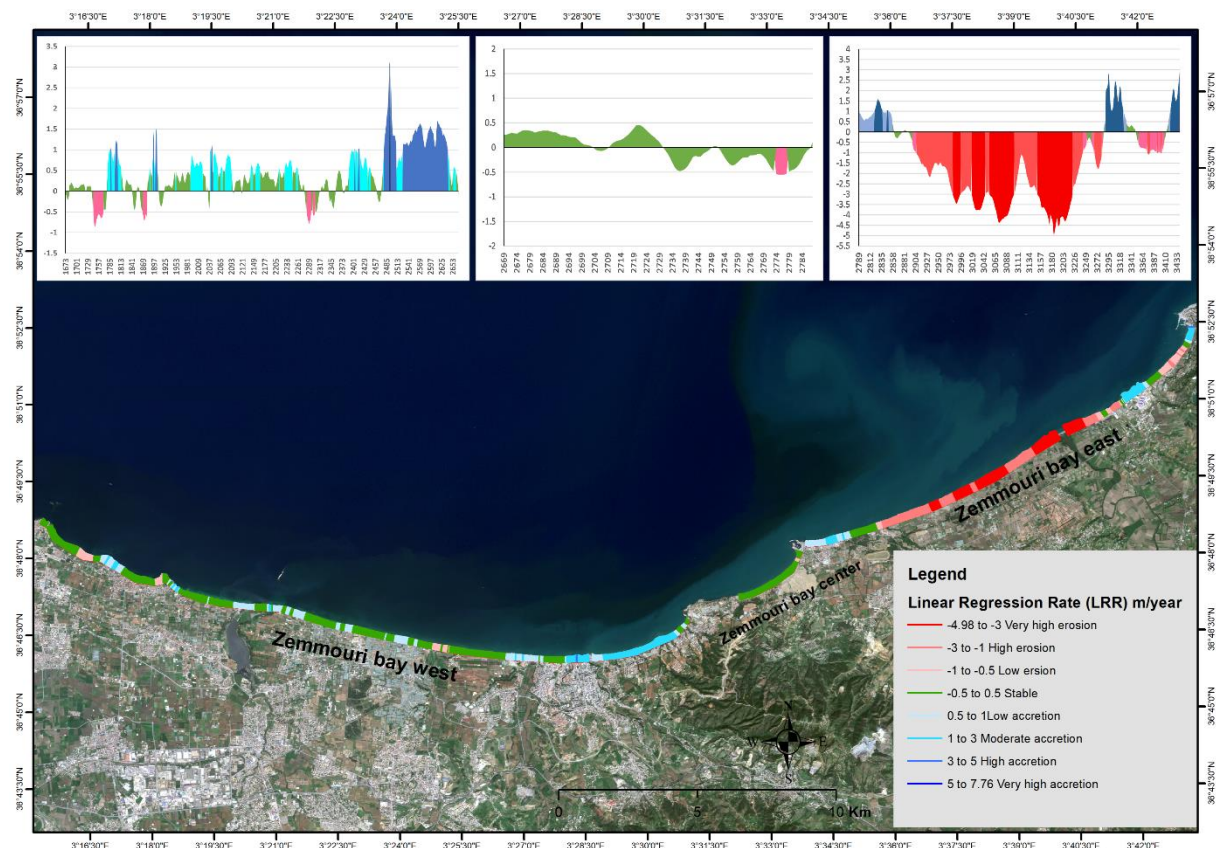
Djawhara, El Yassamine avec des taux d'LRR<sub>max</sub> respectivement de 1.03 m/an, 0.86 m/an, 0.76 m/an, 3.12 m/an, 2.8 m/an, 1.7 m/an et 0.58 m/an.

Sur les 120 transects analysés dans la section Zemmouri Centre, la stabilité du littoral est observée dans la majorité des transects analysés (plus de 96 % dans un état stable) et pas plus de 4% des transects sont érodés avec un taux maximum de -0,55 m/an. Aucune accrétion n'a été enregistrée sur cette section.

La section Zemmouri orientale est une plage longue, droite et ouverte, sur 652 transects, plus de 65% des transects sont érodés pendant cette période, 30% des transects s'érodent plus vite que -1m/an et 26% s'érodent plus vite que -3m/an (tableau V3). La côte de Zemmouri montre généralement une récession particulièrement sévère (Fig. V.12.), avec un taux de récession moyen de -2.27 m/an. Cependant, des zones importantes ont été enregistrées avec un taux d'accrétion moyen de 1,04 m/an.

L'érosion moyenne maximale (érosion forte à très forte) est enregistrée sur les plages de Mandoura, Foret sahel, El Shweisha, Hadj Ahmed, Mandoura, El Hamdanya, avec des valeurs d'LRR varie de -1.01 m/an à - 4.98 m/an.

Les plages qui ont enregistré une accrétion sur la partie Est de la baie sont la plage El Takhayum, El Kuthban Elramlia, Sable D'or Oued Elgharaf et Plage Stara où le taux d'évolution d'LRR enregistré oscille entre +0.7 m/an et +3,28 m/an.



**Figure V. 12 :** Taux de changement du trait de côte des plages de la baie de Zemmouri de 1984 à 2021, calculé par la méthode du Taux de Régression Linéaire (LRR).

**Tableau V. 3 :** Résumé des taux d'évolution du trait de côte à long terme calculés pour différentes zones.

| La zone                   | LCI95 | Nombre de transects | Taux moyen du changement du trait de côte (m/an) | Erosion (%°) | Accretion (%) | stable (%) | Pourcentage d'érosion (%) |                 | Taux maximal (m/an) |           |
|---------------------------|-------|---------------------|--|--------------|---------------|------------|---------------------------|-----------------|---------------------|-----------|
|                           |       |                     |  |              |               |            | Plus de -1 m/an           | Plus de -3 m/an | Erosion             | Accrétion |
| <b>Baie de Bou Ismail</b> |       |                     |  |              |               |            |                           |                 |                     |           |
| Chenoua                   | 0.34  | 120                 | 0.24   | 0            | 3.33          | 96         | 0                         | 0               | -0.26               | 0.55      |
| Ouest Sidi Fredj          | 0.22  | 458                 | 0.26   | 9.29         | 21.9          | 68         | <1                        | 0               | -1.07               | 3         |
| El Djamila                | 0.23  | 303                 | 0.53   | 0            | 36.96         | 63         | 0                         | 0               | -0.32               | 2.35      |
| Total                     | 0.14  | 881                 | 0.35   | 4.76         | 25.19         | 70         | <1                        | 0               | -1.07               | 3         |
| <b>Baie d'Alger</b>       |       |                     |  |              |               |            |                           |                 |                     |           |
| Algiers bay West          | 0.7   | 213                 | 3.1  | 0            | 99.06         | 1          | 0                         | 0               | No erosion          | 7.76      |
| Algiers bay Est           | 0.19  | 578                 | 0.55   | 9.68         | 41.39         | 49         | 3                         | <1              | -3.36               | 4.66      |
| Total                     | 0.33  | 791                 | 1.24   | 7.07         | 56.63         | 37         | 2                         | <1              | -3.36               | 7.76      |
| <b>Baie de Zemmouri</b>   |       |                     |  |              |               |            |                           |                 |                     |           |
| Zemmouri Bay West         | 0.15  | 996                 | 0.44   | 5.62         | 40.06         | 54.32      | 0                         | 0               | -0.86               | 3.12      |
| Zemmouri bay Centre       | 0.37  | 120                 | -0.01  | 4.16         | 0             | 96         | 0                         | 0               | -0.55               | 0.46      |
| Zemmouri bay Est          | 0.21  | 652                 | -1.37  | 65.96        | 21.01         | 13         | 30                        | 26              | -4.98               | 3.28      |
| Total                     | 0.13  | 1768                | -0.26  | 27.77        | 30.31         | 41.92      | 20.68                     | 9.44            | -4.98               | 3.38      |
| <b>Total</b>              |       |                     |  |              |               |            |                           |                 |                     |           |
| Côte Algéroise            | 0.09  | 3440                | 0.24   | 16.36        | 33.28         | 50.36      | 11.33                     | 4.91            | -4.72               | 7.09      |

#### V.4.2 Changement à court terme du littoral :

Les mesures de l'EPR appliquées à chaque zone côtière reflètent le taux d'érosion et d'accrétion dans la zone correspondante. Dans cette analyse, les changements du trait de côte par an sont estimés zone par zone pour chaque période. Selon les résultats du DSAS, l'EPR a été déterminé en traçant les positions des intersections du trait de côte (distance par rapport à la ligne de base) en fonction du temps (années). L'EPR a été quantifié pour les régions côtières représentant les zones d'étude.

Les variations à court terme du trait de côte de la zone d'étude sont présentées dans la Figure. V.13 ; elles illustrent l'évolution du trait de côte entre le Cap Djenet à l'Est et le Cap Chenoua à l'Ouest, pour six périodes différentes avec un intervalle de 5-8 ans (1984-1989, 1989-1994, 1994-1999, 1999-2007, 2007-2013, 2013-2021). Ces intervalles ont également été choisis

en fonction de la disponibilité d'images Landsat sans nuage pendant la période d'étude. La méthode statistique EPR est utilisée ; les résultats sont présentés pour les zones d'étude dans la Fig. V13 et le Tableau V4.

Les taux moyens EPR pour les trois zones d'étude montrent une similarité le long des différentes périodes étudiées, c'est-à-dire que lorsque l'érosion a été enregistrée dans une zone, les autres zones ont également connu une érosion, sauf pendant la période 1994-1999, où la zone I a été enregistrée en accrétion et les deux autres zones (II, III) en érosion (fig. 7, tableau V4).

**Les résultats de la période 1984-1989 :** les résultats montrent que tous les rivages ont une tendance à l'érosion, les valeurs moyennes de l'EPR pour les zones I, II et III sont successivement -0.55 m/an, -1.85 m/an et -3.48 m/an. Les résultats montrent que 85.91% des transects ont enregistré de l'érosion dans la zone III, 78.42% dans la zone II et 56.93% dans la zone I.

La zone I (la baie de Bou Ismail), les tronçons côtiers présentant une accrétion sont situés au niveau de la plage Est et Ouest de Sidi Fredj et CRF Douaouda et méditerranée avec, un taux moyen d'EPR de 1.69 m/an.

La zone II (baie d'Alger), les zones d'accrétion sont observées au niveau des plages de Les Ondines, Tamenfoust Est Nord, Tamenfoust Ouest avec un taux moyens d'EPR de 2.41 m/an.

La zone III (baie de Zemmouri), les zones d'accrétion sont observées au niveau des plages El Yassamine, Mandoura, El Hamdanya, Oued Elgharaf et El Stara, avec une valeur moyenne d'EPR de 3.85m/an.

**Période 1989-1994 :** Pendant cette période, les littoraux montrent une tendance à l'accrétion et ont une valeur moyenne d'EPR positive (tableau 4). Ainsi, plus de 77 % des transects présentent une accrétion dans la zone II, environ 69 % des transects pour la zone III et moins de 54 % des transects pour la zone I.

Durant cette période l'évolution de la ligne du rivage de la baie de Bou Ismail oscille entre avancée-recul et avancée-recul. La partie la plus marquée par l'érosion est localisée à l'est de l'embouchure d'Oued Mazafran (Kheloufi I, Kheloufi II, Champ de Tie et Plage Familiale), avec un taux moyen d'EPR de -1.85 m/an. L'accrétion maximale est enregistrée au niveau du transect 509 localisé au niveau de la plage de Palm Beach avec un taux d'EPR de 5.61 m/an, les accumulations en sédiments sont localisées aussi au niveau de la plage Sheraton et Club des Pins.

Les plages de la baie montrent une avancée du trait de côte à l'exception des plages situées dans la partie Est de la baie d'Alger (Les Ondines Sud, Les Ondines Nord, Alger Plage et Bateau Cassé) avec un taux d'EPR variant de -0.5 m/an à -4.29 m/an.

Dans la baie de Zemmouri, la tendance à l'accrétion est presque généralisée sur toute la côte, à l'exception des tronçons côtiers entre le port de Zemmouri et l'Oued Isser (où des taux moyens d'EPR de -4.43 m/an.

**Période 1994-1999 :** les résultats indiquent que presque la moitié des transects de la zone I ont enregistré une érosion et l'autre moitié une accrétion, le taux moyen d'EPR est de 0.05m/an. La majorité des transects des zones II et III ont enregistré une érosion (92.3% des transects pour la zone II et 83.34% pour la zone III), le taux moyen d'EPR est de -2.72m/an et -3m/an pour les zones II et III, respectivement.

Les tronçons côtiers présentant une récession dans la baie de Bou Ismail sont situés au niveau des plages chenoua, Colonel Abbas Est, Colonel Abbas Est, Kheloufi II, Complexe touristique, centre Familiale, Moretti, Sheraton, La Fontaine, Jeunesse et Méditerranée. Le taux d'érosion moyen d'EPR est de -1.4 m/an. Tandis que les zones d'accrétion sont observées au niveaux de la plage Touring Plage, Kheloufi I, Plage Familiale, Champ de Tie , Azur Plage, Sidi Fredj Est, El Riadh, Azur Plage et Club des Pins avec, des valeurs maximales d'EPR de 2.07 m/an et 4.63 m/an, 4.39 m/an, 5.7m/an et 2.68, m/an respectivement.

Les plages de la baie d'Alger subissent une érosion, à l'exception de la plage d'Ondines Nord, qui est dans un état avancé avec une valeur maximale de l'EPR de 1.01 m/an.

Les résultats statistiques de changement de trait de côte (Figure V.13) montrent une accélération du phénomène d'érosion sur presque la totalité de la côte de la baie de Zemmouri à l'exception des plages Rocher Pourri, El Djawhara et Sghiret qui ont enregistré des accrétions du trait de côte à des taux moyen d'EPR de 1.9 m/an. Le taux moyen d'EPR enregistrés à un taux moyen de -4.18 m/an.

**Période 1999-2007 :** les résultats montrent que l'accrétion a été dominée dans tous les littoraux, avec plus de 90 % des transects positifs dans la zone II, suivis par 78.24 % dans la zone III et 63.19% dans la zone I. Les taux moyens d'EPR sont de 2.33m/an, 3.11m/an et 2.83m/an pour les zones I, II et III respectivement.

Les plages de la baie de Bou Ismail en situation d'accrétion sont localisées principalement au niveau des plages de Chenoua, des plages allant de la plage de familiale jusqu'à l'embouchure d'Oued Mazafran, les plages à l'Ouest de la baie d'El Djamila et la plage complexe touristique. La partie la plus marquée par l'érosion est localisée à l'Ouest de Sidi Fredj et à l'est de la baie d'El Djamila. Les taux d'EPR maximum enregistrés oscillent entre -6.32 m/an à plage Sidi Fredj Ouest et -4.3 m/an au niveau de la plage Sable d'Or de Zeralda.

Les plages de la baie d'Alger dominée par l'accrétion à l'exception des plages localisées au niveau Tamenfoust Est et Ouest et les Ondines Nord avec des valeurs maximales d'EPR de -1.8 m/an et -3.19 m/an et -2.34m/an respectivement.

Les plages des secteurs Zemmouri Ouest et Zemmouri Centre ont montré des zones d'accrétion au cours de la période 1999-2007. Tandis que les zones d'érosion sont observées au niveau de la section Zemmouri Est (Hadj Ahmed, Mendoura, Dar el Mendil, Oued Elgharaf).

**Période 2007-2013 :** Les résultats de l'évolution du littoral au cours de la période 2007-2013 ont complètement changé par rapport à la période précédente (1999-2007). Tous les littoraux ont été dominés par une forte érosion, avec des taux d'EPR moyens de -3.83 pour la

zone I, -2.38m/an pour la zone II et -3.83m/an pour la zone III. Plus de 91% des transects ont été érodés à partir des zones II et III et environ 78.67% à partir de la zone I.

Durant cette période, l'évolution de la ligne du rivage de la baie de Bou Ismail est marquée par une érosion intense sur toutes les plages. Le taux moyen d'érosion est de -4.98 m/an, à l'exception de quelques tronçons au niveau des plages de Sidi Fredj Ouest, de la Thalassothérapie, de Dauphin et de la Méditerranée, avec des taux moyen d'EPR de 3.3 m/an, 1.29 m/an, 2.15 m/an et 2.6 m/an respectivement.

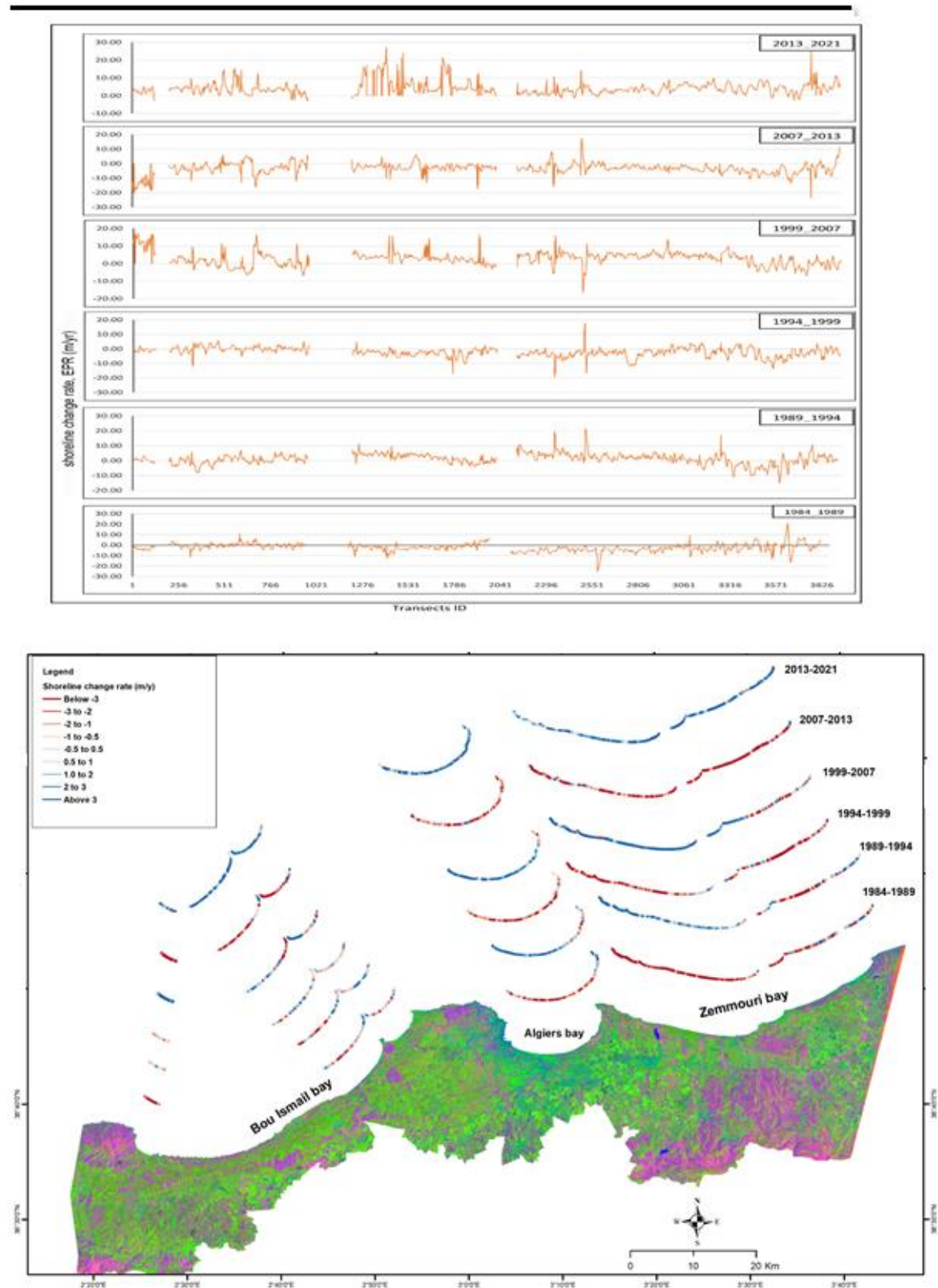
L'ensemble des transects de la baie d'Alger montrent une position de recul très avancée du trait de côte tout au long de la baie d'Alger, à l'exception de la plage les Pins Maritimes qui a un taux moyen d'EPR de 2.32 m/an.

L'ensemble des transects de la baie de Zemmouri montrent une position recul très avancée du trait de côte tout au long de la baie à l'exception de quelques transects (les plages de Kaf El Aarar, El-Kadous, Reghaia plage et Stara).

**Période 2013-2021 :** Au cours de cette période 2013, une accrétion rapide a été enregistrée sur toutes les côtes de la zone d'étude. Ainsi, plus de 97% des transects ont enregistré une accrétion dans la zone II, environ 95.01% et 94.68 dans la zone I et la zone III, respectivement.

Les secteurs en situation érosive de littoral de la baie de Bou Ismail (4.99 % du littoral) se situent principalement sur la plage Méditerranée (transects 868 à 881), de la plage de Dauphin (789 à 795 et 804 à 809). Le taux d'érosion maximal enregistré est de -2.89 m/an.

Pour la baie de Zemmouri, on trouve quelques transects érodés à un taux d'EPR variant de -0.69 m/an à -2.6 m/an.



**Figure V. 13 :** Représentation graphique de la modification à court terme du trait de côte le long de la côte Algéroise par la méthode EPR.

**Tableau V. 4 :** Résumé des taux d'évolution du trait de côte à court terme calculés pour différentes zones.

| Intervalle annuelle | ECI  | Zone  | EPR moyen | EPR min (m/an) | EPR max (m/an) | % du nombre total de transects ayant enregistré une accréation | % du nombre total de transects ayant enregistré une érosion |
|---------------------|------|-------|-----------|----------------|----------------|--|---|
| 1984-1989           | 0.86 | I     | -0.55     | -11.83         | 10.93          | 43.07%   | 56.93%  |
|                     |      | II    | -1.85     | -13.16         | 6.43           | 21.58%   | 78.42%  |
|                     |      | III   | -3.48     | -25.41         | 21.03          | 14.09%   | 85.91%  |
|                     |      | Total | -2.32     | -25.41         | 21.03          | 23.53%   | 76.47%  |
| 1989-1994           | 0.86 | I     | 0.2       | -8.05          | 6.81           | 54.14%   | 45.86%  |
|                     |      | II    | 2.17      | -4.29          | 11.21          | 77.15%   | 22.85%  |
|                     |      | III   | 1.21      | -15.03         | 21.38          | 69.01%   | 30.99%  |
|                     |      | Total | 1.17      | -15.03         | 21.38          | 67.01%   | 32.99%  |
| 1994-1999           | 0.86 | I     | 0.05      | -11.84         | 5.7            | 50.62%   | 49.38%  |
|                     |      | II    | -2.79     | -17.18         | 4.86           | 7.7%   | 92.3%   |
|                     |      | III   | -3        | -19.54         | 17.95          | 16.66%   | 83.34%  |
|                     |      | Total | -2.16     | -19.54         | 17.95          | 23.39%   | 76.61%  |
| 1999-2007           | 0.42 | I     | 2.33      | -6.74          | 17.34          | 63.19%   | 36.81%  |
|                     |      | II    | 3.11      | -3.19          | 16.46          | 90.01%   | 9.99%   |
|                     |      | III   | 2.83      | -16.4          | 16.01          | 78.67%   | 21.33%  |
|                     |      | Total | 2.76      | -16.4          | 17.34          | 77.24%   | 22.76%  |
| 2007-2013           | 1.37 | I     | -3.83     | -20.86         | 6.08           | 21.33%   | 78.67%  |
|                     |      | II    | -2.38     | -17.56         | 6.16           | 8.26%  | 91.74%  |
|                     |      | III   | -3.48     | -23.56         | 17.3           | 8.62%  | 91.38%  |
|                     |      | Total | -3.32     | -23.56         | 17.3           | 11.8%  | 88.2%   |
| 2013-2021           | 1.03 | I     | 3.61      | -3.11          | 15.46          | 95.01%   | 4.99%   |
|                     |      | II    | 6.38      | -1.64          | 27.22          | 97.67%   | 2.33%   |
|                     |      | III   | 3.68      | -2.6           | 25.72          | 94.68%   | 5.32%   |
|                     |      | Total | 4.21      | -3.11          | 27.22          | 95.38%   | 4.62%   |

## **V.5. Discussions :**

Cette étude présente une analyse systématique des mouvements de changement côtier à long et à court terme le long du littoral Algérois pendant la période 1984-2021. L'imagerie satellitaire d'observation de la terre multitemporelle et les systèmes d'information géographique sont utilisés pour identifier les tendances des taux de changement du littoral ainsi que les zones où ces changements se produisent.

L'évaluation de l'évolution du littoral à long et à court terme basée de données de télédétection révèle une variabilité temporelle considérable dans la position des traits de côte le long de la côte Algéroise au cours des 37 dernières années. En particulier, l'analyse à court terme donne un aperçu du comportement des changements des traits de côte et met en évidence la nature cyclique de l'érosion et de l'accrétion à court terme (Fig.V14).

A long terme, L'évolution globale du littoral Algérois montre que le taux d'évolution du littoral varie de -4.72 à 7.09 m/an le long des 3440 transects, dont 16.36% des plages ont été érodées, 50.36% sont stables et 33.28% sont en situation d'accrétion (Tableau V3). Le taux d'accrétion à long terme le plus élevé est associé aux ouvrages de protection. En outre, les résultats obtenus à court terme le long de la côte Algéroise montrent une oscillation du trait de côte entre recul et avancée durant les périodes analysées (fig. V13). L'érosion a dominé dans les périodes 1984-1989, 1994-1999, 2007-2013, alors que l'accrétion a été enregistrée dans les périodes 1989-1994, 1999-2007, 2013-2021. Ainsi, la période la plus érodée a été entre 2007-2013 et l'accrétion a été enregistrée pour toutes les zones d'étude dans la période récente (2013-2021) comme le montrent la figure V13 et le tableau V4.

### **1. Modifications du littoral dues à des causes naturelles :**

#### **Vagues, courants et le transport sédimentaire :**

Les vagues et les courants sont les principales forces qui se déplacent les sédiments dans la zone littorale et les variations annuelles de la hauteur des vagues sont responsables de l'érosion et de l'accrétion des plages.

A l'Est de Sidi Fredj, la plage du Sahel est affectée par des houles de Nord qui atteignent la côte à des hauteurs comprises entre 2 et 3 m, favorisant les courants d'arrachement et entraînant un transport sédimentaire longshore estimé à 2240 m<sup>3</sup>/an/m vers le large, provoquant l'érosion de la plage. A proximité de l'oued Mazafran, la houle de Nord-Ouest provoque des courants d'arrachement qui transportent des sédiments estimés à 2350 m<sup>3</sup>/an/m vers le large. Cette analyse est confirmée par le modèle DSAS (évolution du trait de côte).

Les plages de la côte Algéroise sont des systèmes côtiers où les vagues et les courants littoraux sont les processus dominants affectant le transport et le dépôt des sédiments. D'un point de vue hydrodynamique, toute la zone côtière de la baie de Zemmouri est caractérisée par des vagues obliques qui frappent la côte dans la partie orientale de la baie de Zemmouri, avec des vitesses importantes variant entre 0.5m /s à 1m /s générant un courant de dérive d'Est en Ouest. Ce courant transporte les sédiments d'Est en Ouest, ce qui entraîne une érosion en amont et une accrétion en aval. En revanche, dans la partie centrale de la baie de Zemmouri, le

mouvement des sédiments d'Est en Ouest et d'Ouest en Est favorise l'équilibre de cette section. Cette analyse est confirmée par l'outil DSAS (évolution du trait de côte).

### **L'énergie des tempêtes la morphologie du littoral et l'Orientation de la ligne de rivage :**

L'érosion intensive dans toutes les sections durant la période 2007-2013, comparée aux autres épisodes (Fig.V13), est liée à l'événement exceptionnel de tempête enregistré en mars 2007, qui a affecté presque toutes les plages de la côte d'Algéroise. Selon l'étude réalisée par (Amarouche et al., 2020), les tempêtes de 2007 et 2015 ont été classées parmi les tempêtes catastrophiques (classe V) survenues au cours des 40 dernières années. La tempête de 2007 a duré du 07/03/2007 au 12/03/2007. Cette tempête provenait du Nord-Nord-Est avec un indice de puissance de tempête (SPI) de 2836,8 m<sup>2</sup> h, la hauteur significative maximale des vagues a atteint 8 m au large de la côte Algéroise. Les dégâts matériels importants ont été enregistrés, notamment à l'Ouest de la baie de Bou Isamil. Une hauteur importante a dépassé les 4 m sur la côte Ouest de la baie de Bou Ismail ce qui a provoqué la destruction de l'entrée du port, phares et l'endommagement de plusieurs bateaux. Durant la période 2007-2013, 88.2% des plages d'Algéroise ont reculé à des taux de -3.32 m/an, soit 20 m durant la période mentionnée (Tableau V4). Suite à cet événement, des travaux de construction d'ouvrages de protection et de rechargement artificiel ont été entrepris sur plusieurs plages de la côte d'Alger (Fig. V15. g-h et Fig.16b-g).

Durant la période 2013-2021, les littoraux se remettent de l'érosion revêtue par la tempête de l'événement de 2007 dans toutes les zones, même si trois événements de tempête ont été marqués dans cette période (Amarouche et al., 2020). La première tempête a été classée comme catastrophique en 2015 provenant de WNW qui a persisté pendant 8 jours du 29/01/2015 au 05/02/2015 et la deuxième tempête en 2016 (14/02/2016) a été classée comme tempête extrême (classe IV) provenant de la direction Ouest. Alors que, la troisième tempête a été annoncée le 20 mars 2018 de classe IV et venant d'une direction Nord-Ouest. L'absence d'influence des deux précédentes tempêtes sur l'évolution du littoral d'Alger (la période récente 2013-2021) est due à plusieurs facteurs :

Premièrement, la présence de promontoires rocheux le long de la côte d'Algéroise peut agir comme des épis naturels. Lorsque les vagues viennent d'une direction Ouest ou Ouest-Nord-Ouest (le cas des tempêtes de janvier 2015 et février 2016), elles peuvent être réfractées et diffractées autour du promontoire rocheux. Par conséquent, ces vagues perdent leur énergie en s'approchant de la côte.

La morphologie sous-marine du fond de la baie peut produire une dispersion de l'énergie des vagues (Paskoff, 1970). C'est le cas de la baie d'Alger où le fond présente une pente douce avec une morphologie particulière caractérisée par un fond très régulier (Dahmani et al., 2021). Hemdane et al. (2016) ont montré que la morphologie sous-marine douce de la baie d'Alger favorise la dissipation de l'énergie des vagues (les vagues sont relativement plus amorties) ce qui peut être favorisé l'équilibre des plages de la baie d'Alger.

Un autre facteur de contrôle de l'évolution des côtes est le changement climatique, qui peut conduire à une augmentation des tempêtes et à une élévation du niveau de la mer entraînant

une érosion accrue des plages (Djouder and Boutiba, 2017). Selon les derniers rapports du GIEC, les villes côtières sont de plus en plus vulnérables aux impacts croissants du changement climatique à court, moyen et long terme, avec des impacts significatifs attendus sur les systèmes socio-économiques (Clemente, 2022; IPCC, 2021). Les villes côtières d'Alger sont considérées comme des zones vulnérables (Rabehi et al., 2019). En outre, 80% du littoral de la baie de Bou Ismail est exposé au risque d'inondation (Chaib et al., 2020). Selon l'étude récente Amoura and Dahmani. (2022) a montré une très grande vulnérabilité de la côte Algéroise aux submersions marines dues à l'élévation du niveau de la mer à l'horizon 2030/2100, notamment dans le cas de tempêtes extrêmes. Ces dernières années, une augmentation considérable de la fréquence des tempêtes à vagues prolongées (classe III) avec un taux de 81 %, des tempêtes extrêmes (classe IV) avec un taux de 16 % et des tempêtes catastrophiques (classe V) avec un taux de 100 % a été observée (Amarouche et al., 2020). L'augmentation des tempêtes ces dernières années dans la région d'Algéroise est probablement la conséquence du réchauffement climatique.

## **2. Changements dus à l'intervention humaine :**

L'impact des activités humaines telles que la construction d'ouvrages côtiers (ports, brise-lames, digues et barrages), l'extraction de sable, l'urbanisation et l'industrialisation est pris en compte dans l'évaluation de l'intervention humaine sur le littoral et des modifications morphologiques du trait de côte.

Plusieurs barrages ont été construits le long de la côte algérienne (chapitre II). Une grande quantité de sédiments est piégée par ces barrages, ce qui entraîne un déficit sédimentaire dans l'approvisionnement côtier. Par exemple, la construction des barrages de Beni Amrane et de Kadara a réduit le flux de matières solides dans la baie de Zemmouri, ce qui a accentué l'érosion des plages de la baie de Zemmouri Est. Selon (Larid, 2002), la quantité moyenne annuelle de sédiments piégés dans les principaux barrages de la région Algéroise est estimée à 910000m<sup>3</sup>.

La réduction des débits solides de Oued Isser au cours des dernières décennies est due à l'extraction excessive de sables, qui a affecté simultanément le lit du fleuve, les plages et la dune de Zemmouri (Fig. 15 c-e). La quantité de sédiments apportés par les principaux oueds algériens a été réduite de 75% entre 1981 et 1990 (Larid, 2002).

Lors des sorties sur le terrain, nous avons clairement vu que l'extraction de sable directement sur les plages et les dunes a eu des impacts négatifs et a fortement affecté l'environnement côtier des plages (Fig.V15 a-c).

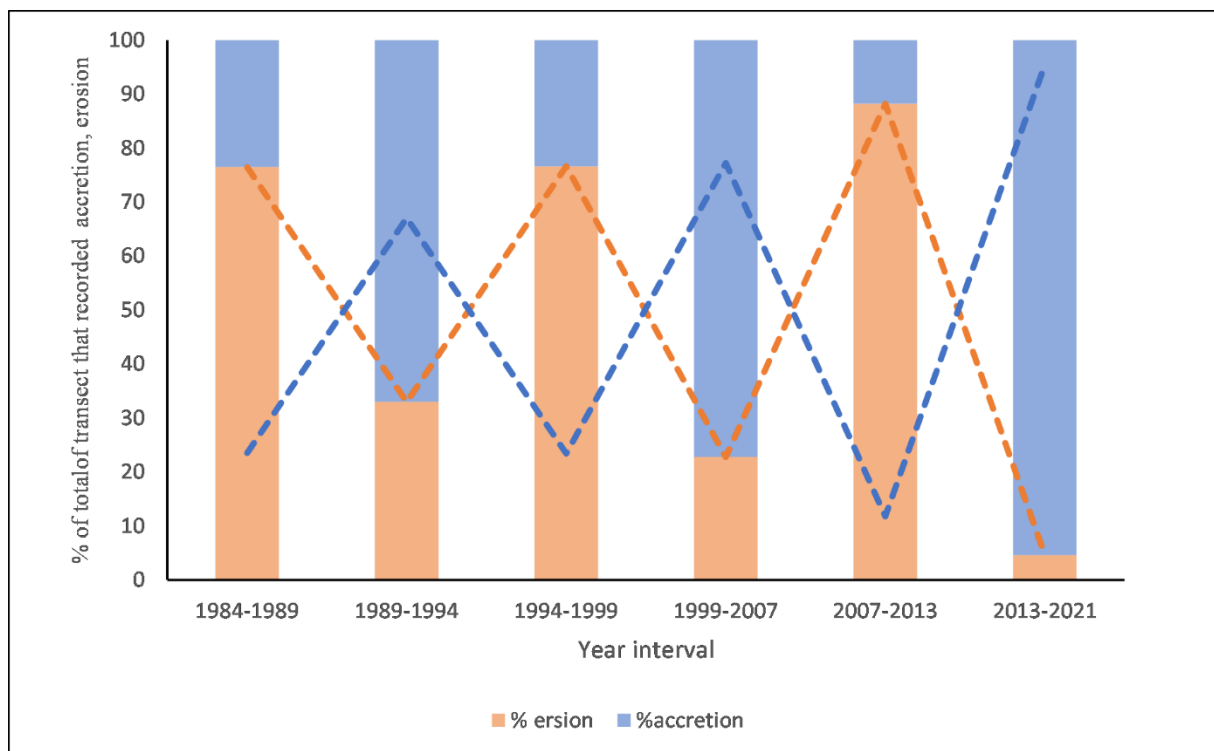
La construction d'ouvrages de protection (épis et brise-lames), qui ont été réalisés après 2007. En effet, l'observation des images d'archives de ces infrastructures sur Google Earth, montre que dix (10) constructions de protection ont été installées dans la partie ouest de Sidi Fredj (Fig 16-b). En plus des géotubes qui ont été installés dans la baie d'Al Djamila (Fig. V16-a). Plus de vingt (20) structures de protection contre l'érosion ont été installées le long de la côte de la baie d'Alger depuis la fin de 2007 à ce jour (Fig. V16-c).

Les schémas d'utilisation des sols ont une influence significative sur les schémas d'érosion. L'augmentation de la population le long de la côte Algéroise exerce une pression sur

les terres nature, les rendant plus vulnérables à l'érosion. La présence les activités humaine dans le territoire contribue à dégrader et à réduire la végétation sur les dunes littorales à cause du piétinement et de la circulation motorisée, ce qui constitue un facteur indirect de l'érosion du littoral.

L'anthropisation croissante de la baie d'Alger perturbe la dynamique naturelle du système, ce qui explique la faible corrélation entre la dynamique sédimentaire et la cinématique du trait de côte dans la région.

Enfin, le rechargement artificiel des plages est largement utilisé sur la côte d'Alger à ce jour (Fig. V15-g), notamment après la tempête de 2007. Ces rechargements artificiels de plages peuvent favoriser une accrétion rapide des plages, comme dans le cas des plages occidentales liées à la zone de remblai dans la baie d'Alger Ouest.



**Figure V. 14** : Phase cycliques d'accrétion-érosion et modifications périodiques du littoral Algérois.



**Figure V. 15 :** (a-c) Extraction de sable sur la plage de la baie de Zemmouri Est. (d-e) Erosion de la plage de la baie de Zemmouri Est. (f) Dégradation des dunes de sable de la baie de Zemmouri Est. (g) Rechargement de la plage dans la baie d'Alger (photo de Djerrai N.E). (h) Construction d'un épi sur la plage de sable doré de la baie de Bou Ismail.



**Figure V. 16 :** (a) Installation de géotubes dans la baie d'El Djamil. (b) Epis et brise-lames le long des plages de la baie de Bou Ismail. (c) Epis et brise-lames lo long de la baie d'Alger. (d) Baie de Bou Ismail (section Sidi Fredj Ouest) avant la tempête de 2007. (e) Construction de brise-lames et d'un épi dans la baie de Bou Ismail (section Sidi Fredj Ouest) après la tempête de 2007. (f) Baie d'Alger Est avant la tempête de 2007. (g) Construction de brise-lames et d'un épi dans la baie d'Alger Est après la tempête de 2007.

## V.6. Conclusion

La présente étude a analysé les taux de changement de la côte d'Alger sur 37 ans à court et à long terme. Plusieurs images satellites ont été utilisées pour extraire les lignes de côte entre 1984 et 2021. La méthode NDVI-Tasseled Cap Transformation utilisée pour extraire le littoral a montré une bonne corrélation avec le littoral numérisé à partir de l'image satellite haute résolution. L'image Pleiades est très utile pour évaluer la précision de la méthode utilisée pour extraire le trait de côte.

L'analyse des résultats à long terme a montré une nette différence entre les trois baies d'Alger comme indiqué précédemment. L'analyse par zone a indiqué que la partie orientale de la baie de Zemmouri est dans une situation alarmante. Les autres zones sont présentées soit en accrétion comme l'ouest de la baie d'Alger, soit stable comme Chenoua et le centre de la baie de Zemmouri. L'analyse à court terme a montré une alternance entre phase d'érosion et phase d'accrétion et a également montré que le littoral d'Alger peut se rétablir après des événements de tempête, comme le cas de la tempête de 2007. La direction des tempêtes est un paramètre important pour évaluer son impact sur l'évolution du trait de côte.

L'étude de la cinématique du littoral d'Alger a montré que l'évolution du littoral Algérois dans les trois baies est contrôlée à la fois par des processus naturels et des activités humaines. Les résultats ont montré que l'utilisation de l'imagerie satellitaire multi-temporelle Landsat librement disponible, les techniques DSAS avec le logiciel GIS sont réalisables pour des études à faible échelle (c'est-à-dire une grande zone) dans le suivi des changements à court et à long terme du littoral d'Algérois. La méthode proposée dans cette partie comprend plusieurs raccourcis qui peuvent être améliorés avec la connaissance et la quantification du comportement morphodynamique de la côte.

Une telle étude peut également aider à prédire la position du littoral à court et à long terme. Le résultat obtenu serait utile dans le plan de gestion adaptative du littoral régional et guiderait les environnementalistes, les décideurs politiques et les autorités de gestion des zones côtières pour initier des schémas de protection du littoral basés sur la nature.

Des mesures collectives d'adaptation devraient être mises en œuvre pour réduire l'effet de l'érosion. Pour mieux éviter le problème de l'érosion des côtes sableuses, un contrôle particulier des différents secteurs lors des futures missions est nécessaire, afin de proposer des actions dans le cadre d'une approche de gestion intégrée du littoral des trois baies.

La poursuite de ces mesures quantitatives détaillées et synoptiques à une échelle temporelle, au moins annuelle, est nécessaire pour interpréter l'évolution de la côte afin d'aider les projets de développement et en particulier les côtes à forte problématique urbaine.

**Chapitre VI : Détermination et  
cartographie des aléas d'érosion et de  
submersion marine sur le littoral  
Algérois**

Une estimation fiable des risques naturels extrêmes est nécessaire pour la protection des sites naturels exceptionnels. Dans les zones urbaines et rurales en particulier, les événements naturels extrêmes comprennent les inondations, les fortes pluies, les températures élevées et basses, les vents violents, les niveaux élevés de la mer ou les vagues de la mer, les vagues de l'océan, parmi beaucoup d'autres (Bernardara et al., 2014).

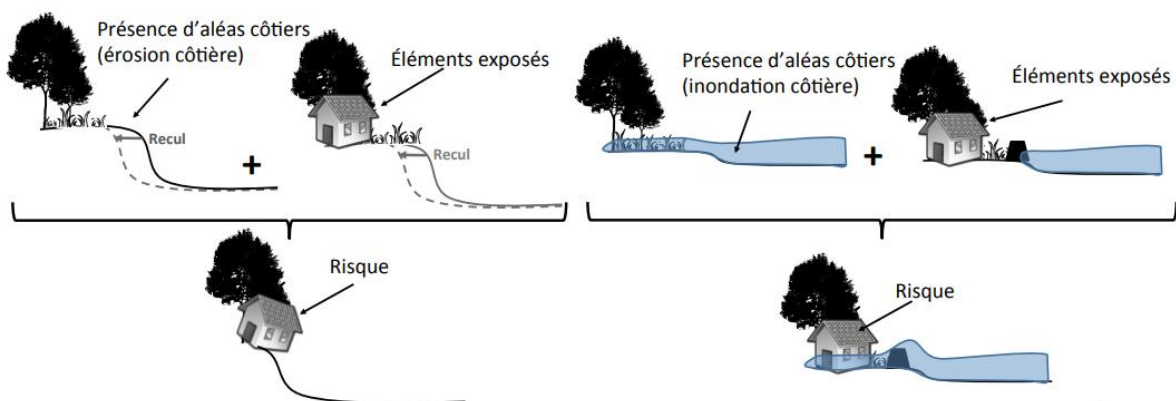
Depuis plusieurs décennies, de nombreuses études se sont attachées à cartographier le risque de submersion marine (Chouari, 2020; Dean and Malakar, 1999; Garès, 1990), d'autant plus que cet aléa est désormais une composante majeure du risque côtier (Cariolet et al., 2012).

Cette étude est basée sur des scénarios d'élévation du niveau de la mer aux horizons 2030, 2050 et 2100 et sur des événements extrêmes. Ces scénarios ont pour but de fournir des cartes détaillées des scénarios potentiels de submersion marine qui peuvent aider à la gestion des inondations côtières et à la planification du développement pour les trois zones côtières densément urbanisées et peuplées. Ces zones comprennent la baie de Bou Ismail, la baie d'Alger et la baie de Zemmouri.

### VI.1. Définition de la zone de risque côtier

Le risque côtier est la combinaison de la probabilité d'occurrence d'un aléa (érosion côtière ou inondation) et des conséquences qui peuvent en résulter sur les éléments vulnérables (matériels ou immatériels) d'un environnement donné (Figure V.1).

Satta (2014) définit la zone de risque côtier comme la zone côtière exposée aux risques d'érosion et submersions marines engendrés par l'accélération de l'élévation du niveau de la mer, les phénomènes météorologiques extrêmes et les ondes de tempête qui peuvent causer des dommages à l'écosystème naturel et/ou artificiel.



**Figure VI. 1 :** Shéma du risque (aléa+vulnérabilité= risque) en lien avec l'érosion côtière (à gauche) et l'inondation côtière (à droite) (Conseil du Saint-Laurent. 2017).

### VI.2. Méthodologie :

La modélisation a été réalisée à l'aide du logiciel Arc GIS10.4. L'extension des terres potentiellement inondées est projetée sur la topographie à l'aide de Modèles Numériques de

Terrain (MNT) à haute résolution ( $2 \times 2$  m). Le MNT utilisé couvre toutes les zones côtières de la zone d'étude.

### VI.2.1 Détermination du Niveau d'inondations marines :

Afin de fournir les projections relatives de l'élévation du niveau de la mer pour la préparation des cartes de scénarios d'inondation en 2030, 2050 et 2100, nous avons appliqué une approche empirique proposée par Hoozemans et al. (1993) :

$$Dft = MHW + S + Wf + Pf \quad \text{Eq VI.1}$$

Où :

*Dft* : Niveau de submersion.

MHW : Niveau moyen des hautes eaux.

S : Elévation relative du niveau de la mer.

*Wf* : Hauteur des houles de tempêtes responsables des inondations.

*Pf* = Elévation du niveau de la mer, due à une baisse de la pression atmosphérique.

Pour résoudre cette équation, il faut déterminer chacune de ses composantes :

#### VI.2.1.1 Scénarios d'élévation du Niveau de la mer :

Les données d'élévation sont l'un des paramètres les plus importants pour déterminer la vulnérabilité des zones côtières aux submersions et à l'élévation du niveau de la mer (Khan et al., 2012). Dans ses dernières projections sur le niveau de la mer, le GIEC recommande l'utilisation des scénarios de voies socio-économiques partagées (SSP), qui englobent une gamme plus large d'émissions de gaz à effet de serre et de CO<sub>2</sub> que les scénarios précédents (Kouakou et al., 2023).

Dans cette étude, nous avons utilisé les estimations globales du GIEC AR6, basées sur le scénario à faibles émissions (SSP1-1.9) et le scénario à fortes émissions (SSP5-8.5) pour 2030, 2050 et 2100.

**Tableau VI.1** : Projection globales (m) de l'élévation du niveau de la mer de la période 2030-2100.

| niveau moyen global de la mer (GMSL) | SSP1-1.9 | SSP5-8.5 |
|--------------------------------------|----------|----------|
| 2030                                 | 0.12     | 0.12     |
| 2050                                 | 0.23     | 0.29     |
| 2100                                 | 0.55     | 1.01     |

#### VI.2.1.2 Niveau moyen des hautes eaux :

Le niveau moyen des hautes eaux est de 0.5 m (Djouder and Boutiba, 2017).

### **VI.2.1.3 Variation du niveau de la mer liée à la pression atmosphérique :**

La pression atmosphérique moyenne au niveau de la mer est de 1013 hpa. Au-dessus de cette valeur (hautes pressions), elle provoque une diminution locale de la hauteur de la surface de la mer (décote) et en dessous de 1013 hpa (basses pressions), la pression provoque une augmentation locale de la hauteur de la surface (surcote). La variation du niveau de la mer liée à la pression atmosphérique est estimée selon la formule de Ménard et al. (2003) :

$$Z = 0.01(1013 - p) \quad \text{Eq VI.2}$$

Où : 1013 hPa : c'est la pression atmosphérique moyenne au niveau de la mer.

$p$  : est la pression atmosphérique en hectopascal.

Une augmentation de 1 hectopascal fait baisser le niveau de la mer de 0.01 m. A Alger, entre 1982 et 2023, la pression atmosphérique varie entre 980 hPa et 1050 hPa. consultée le 27/04/2023 ([https://www.weat\\_heronline.co.uk/Algeria/Algiers.htm](https://www.weat_heronline.co.uk/Algeria/Algiers.htm)). Cela signifie que le niveau de la mer varie entre - 0.37 m et +0.33 m.

### **VI.2.1.4 Analyse des valeurs extrêmes :**

Dans cette étude, les données des houles provenant d'une analyse rétrospective sur 29 ans (1992-2021) sont adoptées comme ensemble de données de base pour estimer les hauteurs de vagues significatives extrêmes.

L'analyse des valeurs extrêmes (EVA) est utilisée pour déterminer l'ampleur (hauteur) et la période de retour d'événements importants et inhabituels, par exemple des vagues de tempête extrêmes.

La théorie EVA est généralement basée sur l'extrapolation des enregistrements passés du niveau de la mer. Deux principales méthodes statistiques ressortent de la littérature lorsqu'il s'agit de réaliser une EVA : (1) la méthode des séries de maxima annuels (SMA) qui suit la distribution des valeurs extrêmes généralisées (GEV : Generalised Extreme Value) (2) la méthode pics au-dessus d'un seuil (POT : Peak Over Threshold) avec le modèle statistique de distribution de Pareto généralisée (GPD).

Dans ce travail, la méthode POT a été utilisée. Cette méthode permet de conserver plus d'informations sur les événements extrêmes et peut être utilisée avec un nombre de données plus faible que la méthode des maxima par blocs (Stander, 2015). En outre, il est plus simple d'obtenir un échantillon d'excès plutôt qu'un échantillon de valeurs maximales. Plusieurs hauteurs sont recommandées l'utilisation de la méthode POT (Caires, 2009; Colas S, 2007; Northrop et al., 2017).

La méthode POT/GPD prend en compte toutes les hauteurs de vague significatives les plus élevées au-dessus d'un certain seuil pour ajuster la distribution paramétrique. Par conséquent, il pourrait générer des estimations raisonnables des hauteurs de vagues significatives extrêmes en raison des avantages d'un échantillon raisonnable et d'une distribution naturelle, basée sur un seuil approprié (Shao et al., 2018).

Cette méthode " peak over threshold " (POT) est utilisée pour identifier et sélectionner des hauteurs de vagues significatives indépendantes au-dessus d'un seuil à partir de données initiales (Goda et al., 2001). Lorsque le seuil  $u$  est suffisamment grand, la fonction de distribution des pics de dépassement du seuil peut être approximée par un membre de la GPD (Pickands, 1975) :

$$F(y, \sigma, k) = \begin{cases} 1 - (1 + k \frac{y}{\sigma})^{-1/k} & \text{si } k \neq 0 \\ 1 - \exp(-\frac{y}{\sigma}) & \text{si } k=0 \end{cases} \quad \text{Eq VI.3}$$

Avec  $y = X - u | X > u$  Où  $\mu$  :  $u$  étant le seuil qui garantit la convergence du modèle

$k$  : le paramètre de forme  $\sigma$  représente le paramètre d'échelle.

Les paramètres GPD ( $\sigma$  et  $k$ ) sont estimés à l'aide de la méthode d'estimation du maximum de vraisemblance, recommandée par Mazas and Hamm (2011) :

$$\ln L(k, \sigma, x) = \begin{cases} -N_u \ln \sigma \left( \frac{1}{k} - 1 \right) \sum_{j=1}^{N_u} \ln \left( 1 - \frac{kX_j}{\sigma} \right) & k \neq 0 \\ -N_u \ln \sigma - \frac{1}{k} \sum_{j=1}^{N_u} X_j & k=0 \end{cases} \quad \text{Eq VI.4}$$

Où  $N$  représente le nombre d'événements dépassant le seuil (c'est-à-dire le nombre d'échantillons).

#### a) Sélection du seuil :

Le choix de la valeur seuil est une étape très importante, car c'est elle qui a le plus d'effet sur les résultats de l'EVA. Des valeurs seuils plus élevées produisent peu de valeurs extrêmes et entraînent une grande variance dans les résultats (limites de confiance), tandis que des valeurs seuils plus faibles génèrent un échantillon qui ne se rapproche pas bien du modèle GPD. L'inverse est vrai lorsque l'on exécute EVA pour des valeurs extrêmement faibles.

Un package Python en libre accès appelé « pyextrêmes » a été utilisé pour sélectionner le seuil optimal. « Pyextrêmes » fournit une série d'outils qui aident à la sélection des seuils (<https://georgebv.github.io/pyextreme>).

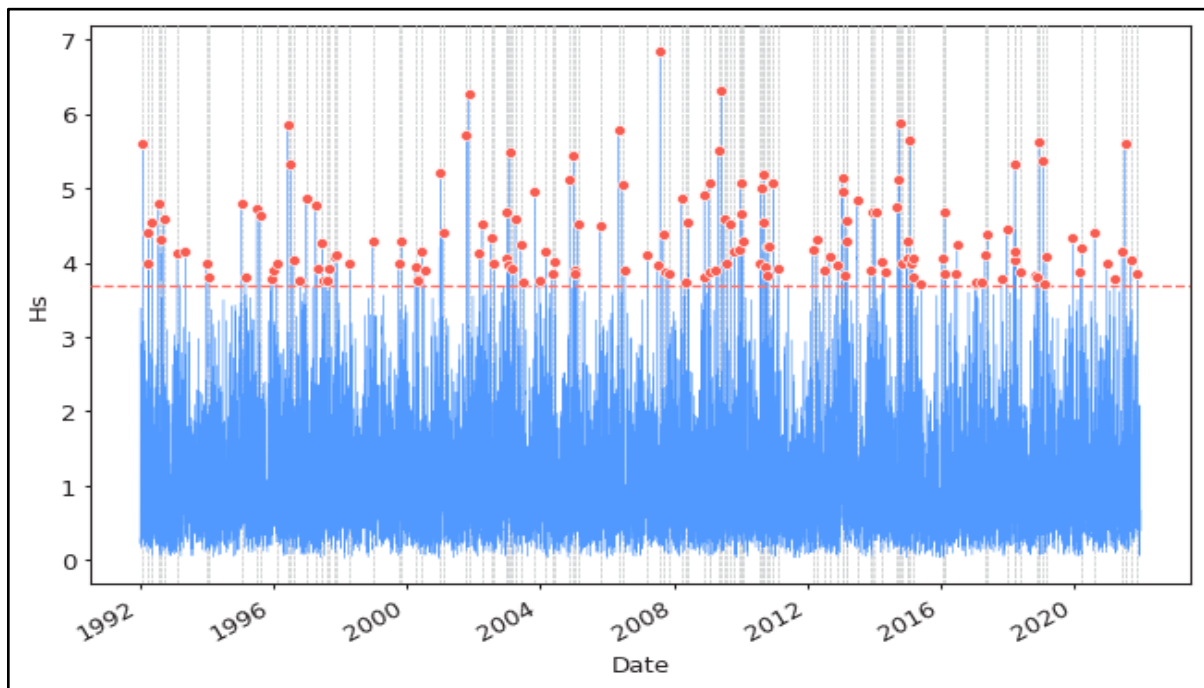
Les seuils pour les trois baies sont représentés dans les graphiques (VI.2. VI.3. VI.4).

#### b) Période de retour :

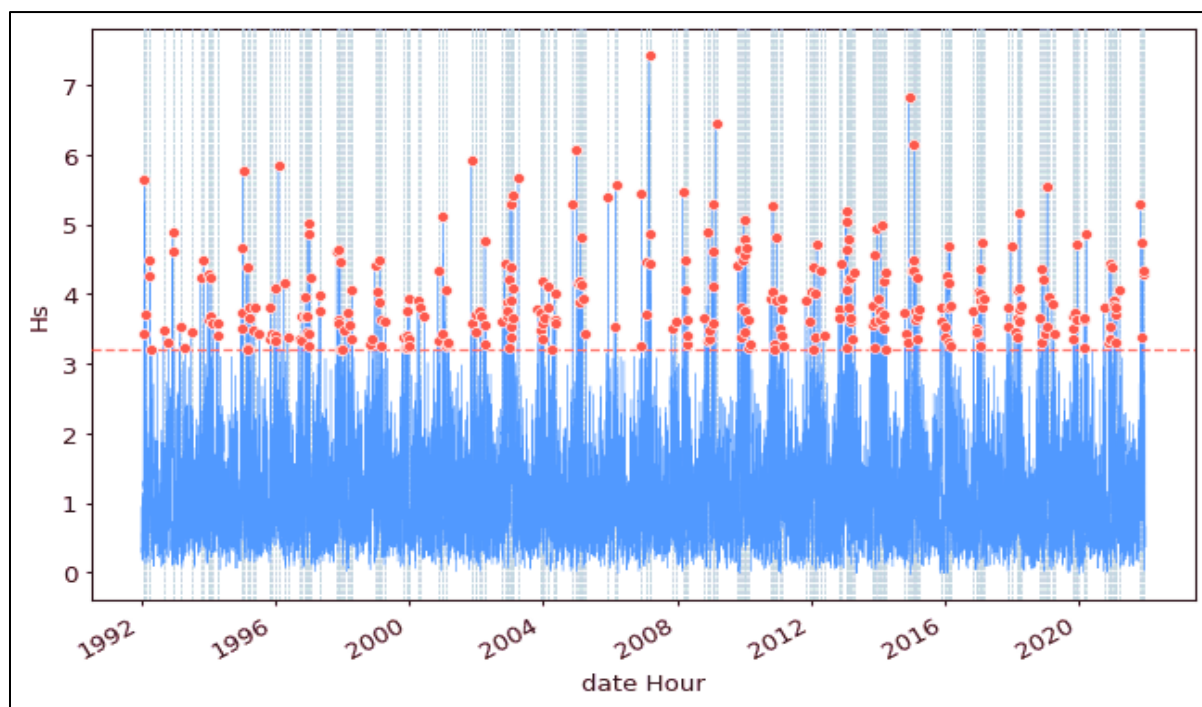
La période de retour indique une durée (généralement des années) qui correspond à la probabilité qu'une valeur donnée soit dépassée au moins une fois au cours d'une année. Cette probabilité est appelée probabilité de dépassement et est liée aux périodes de retour sous la forme  $1/p$  où  $p$  est la période de retour (Coles, 2001).

Nous avons déterminé la hauteur et la période de retour des houles extrêmes extraites au large à l'aide de la méthode POT décrites dans la section précédente, via la même **bibliothèque pyextrême**.

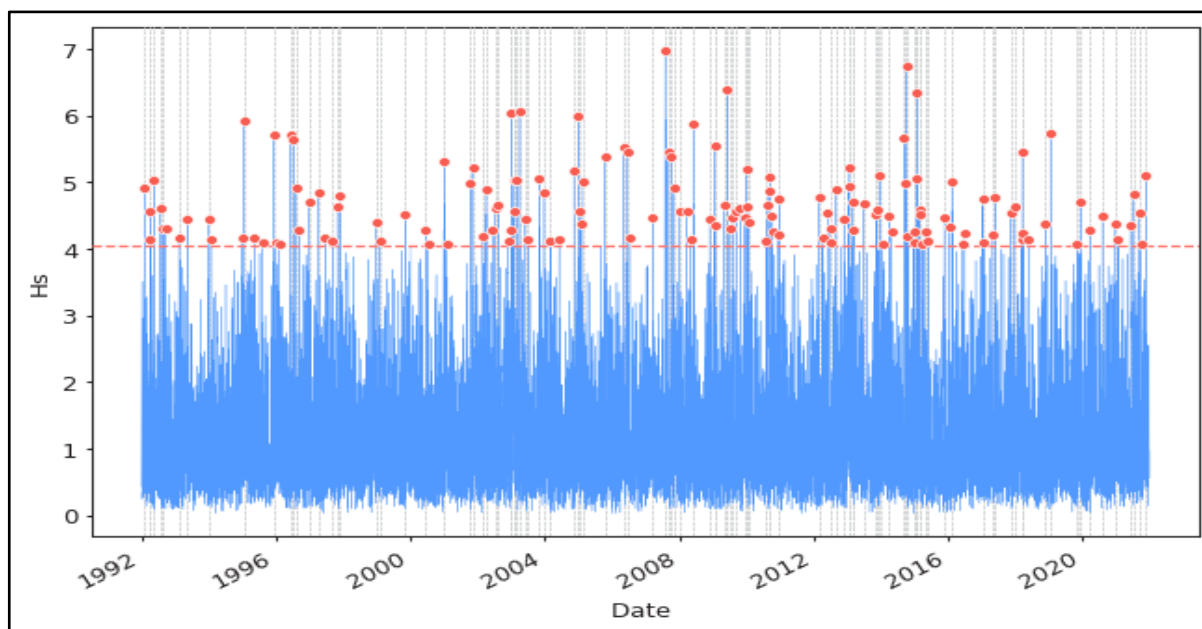
Les tableaux VI.2, VI.3 et VI.4 résument l'ensemble des hauteurs extrêmes obtenues selon les périodes de retour de ces événements extrêmes pour les trois zones étudiées. Les résultats pour les trois baies, indique que la direction Est-Nord-Est c'est la moins susceptible de causer une houle extrême, tandis que les directions pénalisantes qui peut provoquer des hauteurs de houle plus élevées sont le Ouest, Nord, le Nord-Nord-Est et le Nord-Nord-Ouest et Ouest-Nord-Ouest.



**Figure VI. 2 :** Représentaion de méthode POT sur les hauteurs de la houle de 1992-2021 pour la baie de Bou Ismail.



**Figure VI. 3 :** Représentation de la méthode POT sur les hauteurs de houles entre 1992-2021 pour la baie de baie d'Alger.



**Figure VI. 4 :** Représentation de POT sur les hauteurs de 1992-2021 pour la baie de Zemmouri.

**Tableau VI. 2 :** Tableau montrant les résultats obtenus par la méthode POT pour la baie de Bou Ismail.

| <b>POT</b>                         |          |            |           |            |          |            |           |            |             |
|------------------------------------|----------|------------|-----------|------------|----------|------------|-----------|------------|-------------|
| <b>Hauteur des vagues en mètre</b> |          |            |           |            |          |            |           |            |             |
| <b>Période De retour</b>           | <b>W</b> | <b>WNW</b> | <b>NW</b> | <b>NNW</b> | <b>N</b> | <b>NNE</b> | <b>NE</b> | <b>ENE</b> | <b>Omni</b> |
| <b>1</b>                           | 4.79     | 4.29       | 3.99      | 4.17       | 3.90     | 4.10       | 2.87      | 1.59       | 5.30        |
| <b>2</b>                           | 5.20     | 4.71       | 4.59      | 4.83       | 4.56     | 4.74       | 3.30      | 1.83       | 5.91        |
| <b>20</b>                          | 5.75     | 5.22       | 5.70      | 6.00       | 5.64     | 5.87       | 4.24      | 2.25       | 7.00        |
| <b>50</b>                          | 5.92     | 5.38       | 6.20      | 6.50       | 6.10     | 6.35       | 4.74      | 2.43       | 7.46        |
| <b>100</b>                         | 6.08     | 5.50       | 6.69      | 7.01       | 6.55     | 6.83       | 5.29      | 2.61       | 7.93        |

**Tableau VI.3 :** Tableau montrant les résultats obtenus par la méthode POT pour la baie d'Alger.

| <b>POT</b>   |          |            |           |            |          |            |           |            |             |
|--|----------|------------|-----------|------------|----------|------------|-----------|------------|-------------|
| <b>Hauteur de houle prédite par direction en mètre</b> |          |            |           |            |          |            |           |            |             |
| <b>Périodes de retour (années)</b>                     | <b>W</b> | <b>WNW</b> | <b>NW</b> | <b>NNW</b> | <b>N</b> | <b>NNE</b> | <b>NE</b> | <b>ENE</b> | <b>Omni</b> |
| <b>1</b>   | 4.21     | 4.19       | 4.25      | 4.16       | 4.24     | 4.65       | 3.31      | 3.01       | 5.21        |
| <b>2</b>   | 4.66     | 4.67       | 4.91      | 4.71       | 4.60     | 5.35       | 3.89      | 3.42       | 5.96        |
| <b>20</b>  | 5.34     | 5.39       | 5.91      | 5.53       | 5.62     | 6.41       | 4.75      | 4.04       | 6.92        |
| <b>50</b>  | 5.79     | 5.87       | 6.57      | 6.08       | 6.57     | 7.11       | 5.33      | 4.45       | 7.53        |
| <b>100</b>   | 6.13     | 6.23       | 7.08      | 6.50       | 6.57     | 7.64       | 5.76      | 4.76       | 7.98        |

**Tableau VI.4 :** Tableau montrant les résultats obtenus par la méthode POT pour la baie de Zemmouri.

| <b>POT</b>                                    |          |            |           |            |          |            |           |            |             |
|---|----------|------------|-----------|------------|----------|------------|-----------|------------|-------------|
| <b>Hauteur de vague par direction (mètre)</b> |          |            |           |            |          |            |           |            |             |
| <b>Période de retour (année)</b>              | <b>W</b> | <b>WNW</b> | <b>NW</b> | <b>NNW</b> | <b>N</b> | <b>NNE</b> | <b>NE</b> | <b>ENE</b> | <b>Omni</b> |
| <b>1</b>                                      | 4.86     | 4.49       | 4.67      | 4.30       | 4.84     | 4.67       | 3.00      | 2.57       | 5.48        |
| <b>2</b>                                      | 5.29     | 4.93       | 5.48      | 4.91       | 5.03     | 5.18       | 3.32      | 2.96       | 5.97        |
| <b>20</b>                                     | 5.81     | 5.41       | 6.41      | 5.81       | 5.69     | 5.76       | 3.67      | 3.75       | 6.64        |
| <b>50</b>                                     | 6.09     | 5.65       | 6.99      | 6.40       | 6.03     | 6.04       | 3.83      | 4.46       | 7.03        |
| <b>100</b>                                    | 6.27     | 5.80       | 7.42      | 6.83       | 6.25     | 6.21       | 3.93      | 5.11       | 7.32        |

### VI.2.1.5 Les houles extrêmes à la côte :

Il est important de déterminer les valeurs extrêmes à la côte (la zone de déferlement). Pour cela nous avons déterminés les paramètres de houles extrêmes à la côte à l'aide d'un modèle Mike 21 (2D). Les valeurs utilisées pour la modélisation des houles extrêmes à la côte sont celles des directions dominantes (N, NE et NW) pour les trois sites d'étude (Tableau VI.5).

**Tableau VI.5 :** Hauteurs significatives des houles associées à des périodes de retour à la zone de déferlement pour les trois sites d'étude.

| Période de retour          | N          |       |           | NE         |       |          | NW         |       |          |
|----------------------------|------------|-------|-----------|------------|-------|----------|------------|-------|----------|
|                            | Bou Ismail | Alger | Zemmourri | Bou Ismail | Alger | Zemmouri | Bou Isamil | Alger | Zemmouri |
| Houle annuelle (1 an)      | 1.1m       | 0.79m | 0.8 m     | 0.7 m      | 0.7 m | 0.6m     | 1m         | 0.7m  | 0.9 m    |
| Houle biennale (2 ans)     | 2.7m       | 2.1m  | 2.5m      | 1.6 m      | 1.8 m | 1.4m     | 3.2m       | 2.9m  | 3 m      |
| Houle Vingtennale (20 ans) | 3.9m       | 3.6m  | 3.7m      | 2.4 m      | 2.6 m | 2.1m     | 4.2m       | 4m    | 3.8 m    |
| Houle centennale (100 ans) | 5m         | 4m    | 4.6m      | 3.8 m      | 3.1 m | 3m       | 5.3m       | 4.9m  | 5 m      |

On constate que les houles les plus fortes sont de direction Nord-Ouest pour les trois sites d'étude. Nous avons considéré les houles à l'horizon 2030, 2050 et 2100 sont de 3.2 m, 4.2 m et 4.9 m successivement pour la baie de Bou Ismail. Pour la baie d'Alger les hauteurs significatives à la zone de déferlement aux horizons 2030, 2050 et 2100 sont de 2.9 m, 4 m et 4.9 m respectivement. Pour la baie de Zemmouri nous avons pris des hauteurs significatives aux horizons 2030, 2050 et 2100 de 3 m, 3.8 m et 5 m successivement.

### VI.3 Scénarios de submersion marine sur les zones d'étude :

Nous avons établi deux scénarios afin d'estimer l'impact de la submersion marine sur les zones d'étude (baie de Bou Ismail, baie d'Alger et la baie de Zemmouri) :

**Scénario 01 :** on considère le scénario 01 comme scénario de base. Ce scénario correspond à l'élévation du niveau de la mer en 2030, 2050 et 2100.

**Scénario 02 :** correspond à des conditions extrêmes (tempêtes). Le tableau VI.7 résume les deux scénarios pour 2030, 2050 et 2100.

**Tableau VI.6 :** Niveaux d'inondation à l'horizon 2030 et 2100.

| Scénarios   | Niveau de la mer (m) | marée (m) | Dépression atmosphérique (m) | zone                      | Hs proche de la côte (m) (WF) | niveau d'inondation (m) |
|-------------|----------------------|-----------|------------------------------|---------------------------|-------------------------------|-------------------------|
| <b>2030</b> | 0.12                 | 0.5       | 0.33                         | <b>Baie de Bou Ismail</b> | 3.2                           | 4.15                    |
|             |                      |           |                              | <b>Baie d'Alger</b>       | 2.9                           | 3.85                    |
|             |                      |           |                              | <b>Baie de Zemmouri</b>   | 3                             | 3.95                    |
| <b>2050</b> | 0.29                 | 0.5       | 0.33                         | <b>Baie de Bou Ismail</b> | 4.2                           | 5.32                    |
|             |                      |           |                              | <b>Baie d'Alger</b>       | 4                             | 5.12                    |
|             |                      |           |                              | <b>Baie de Zemmouri</b>   | 3.8                           | 4.92                    |
| <b>2100</b> | 1.01                 | 0.5       | 0.33                         | <b>Baie de Bou Ismail</b> | 5.3                           | 7.14                    |
|             |                      |           |                              | <b>Baie d'Alger</b>       | 4.9                           | 6.74                    |
|             |                      |           |                              | <b>Baie de Zemmouri</b>   | 5                             | 6.84                    |

**Tableau VI.7 :** Scénarios de submersion marine à l'horizon 2030, 2050 et 2100.

| scénarios                    | zone   | 2030   | 2050   | 2100   |
|------------------------------|--|--------|--------|--------|
| <b>Scénario 01 (base)</b>    | baie de Bou Ismail, baie d'Alger et baie de Zemmouri | 0.12 m | 0.29 m | 1.01 m |
| <b>Scénario 02 (extrême)</b> | Baie de Bou Ismail                                   | 4.15   | 5.32   | 7.14   |
|                              | Baie d'Alger   | 3.85   | 5.12   | 6.74   |
|                              | Baie de Zemmouri                                     | 3.95   | 4.92   | 6.84   |

## VI.2.2 La cartographie des zones inondables :

Les données d'élévation sont l'un des paramètres les plus importants qui déterminent la vulnérabilité des terres côtières aux submersions et à l'élévation du niveau de la mer (Khan et al., 2012). L'évaluation de l'impact des inondations côtières nécessite l'utilisation de modèles numériques de terrain (MNT) afin d'identifier les terres basses, peu ou pas pentues, susceptibles d'être affectées par les inondations.

Le MNT est une représentation numérique spatialisée de l'altitude facilement manipulable par les logiciels de traitement d'images. C'est un outil important pour illustrer les scénarios d'inondation (Snoussi et al., 2009). Il est important d'utiliser un MNT avec une très bonne résolution, car la fiabilité de la cartographie des plaines inondables est affectée par la qualité du MNT. Notre objectif ici est d'utiliser un MNT à très haute résolution spatiale pour

évaluer l'impact de l'élévation du niveau de la mer sur le littoral algérois. La résolution spatiale (XY) du MNT sélectionné est de l'ordre de 2 mètres et une précision altimétrique de 0.5 m. Le MNT présenté (Fig.VI.5) correspond à la projection universelle transverse de Mercator (UTM) avec la zone 31 N et le système de référence WGS 84.

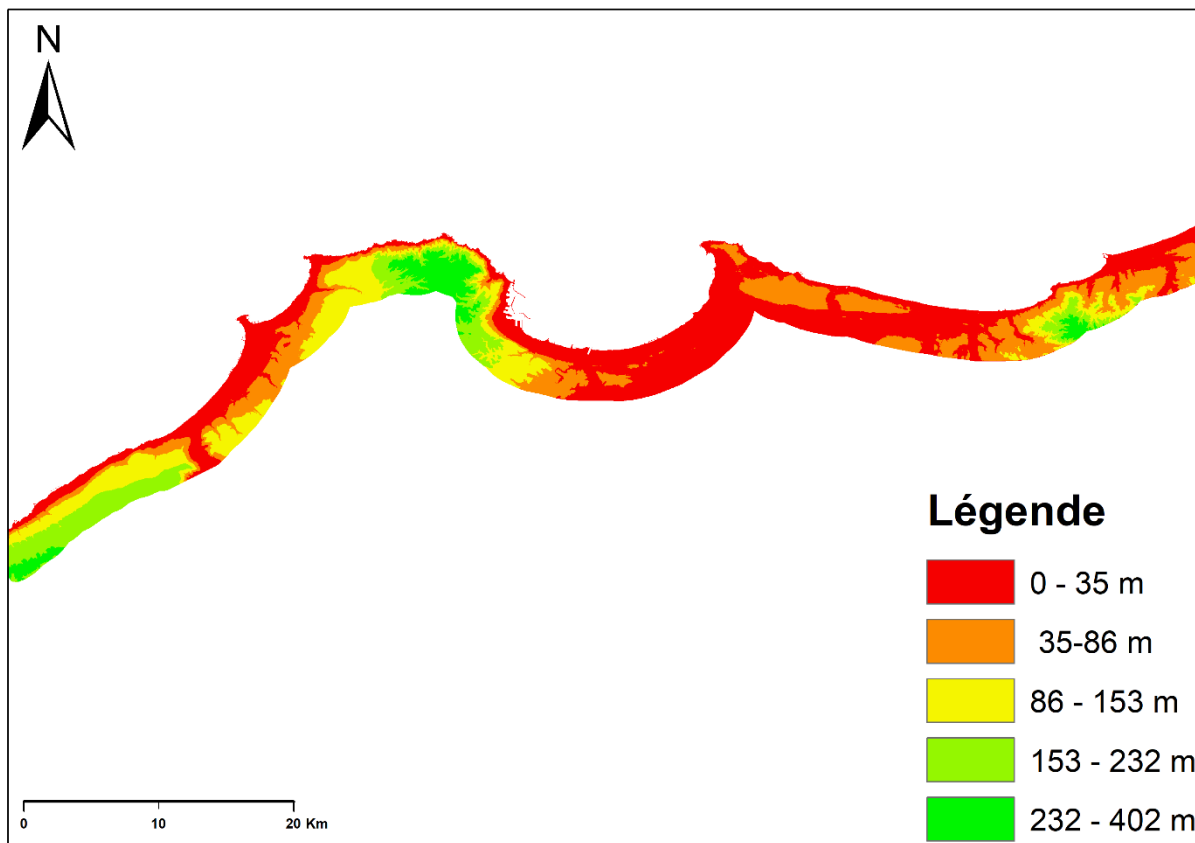


Figure VI. 5 : MNT à 2 m de résolution de la zone d'étude.

### VI.3 Résultats :

Les zones inondées en fonction des scénarios d'élévation du niveau de la mer et des événements extrêmes sont présentées dans les figures v.6, v.7 et v.8 pour la baie de Bou Ismail, la baie d'Alger et la baie de Zemmouri respectivement. Ces figures montrent les zones inondées à des niveaux d'inondation de 0 -1 m, 2-4 m, 4 -6 m et 6 -8 m.

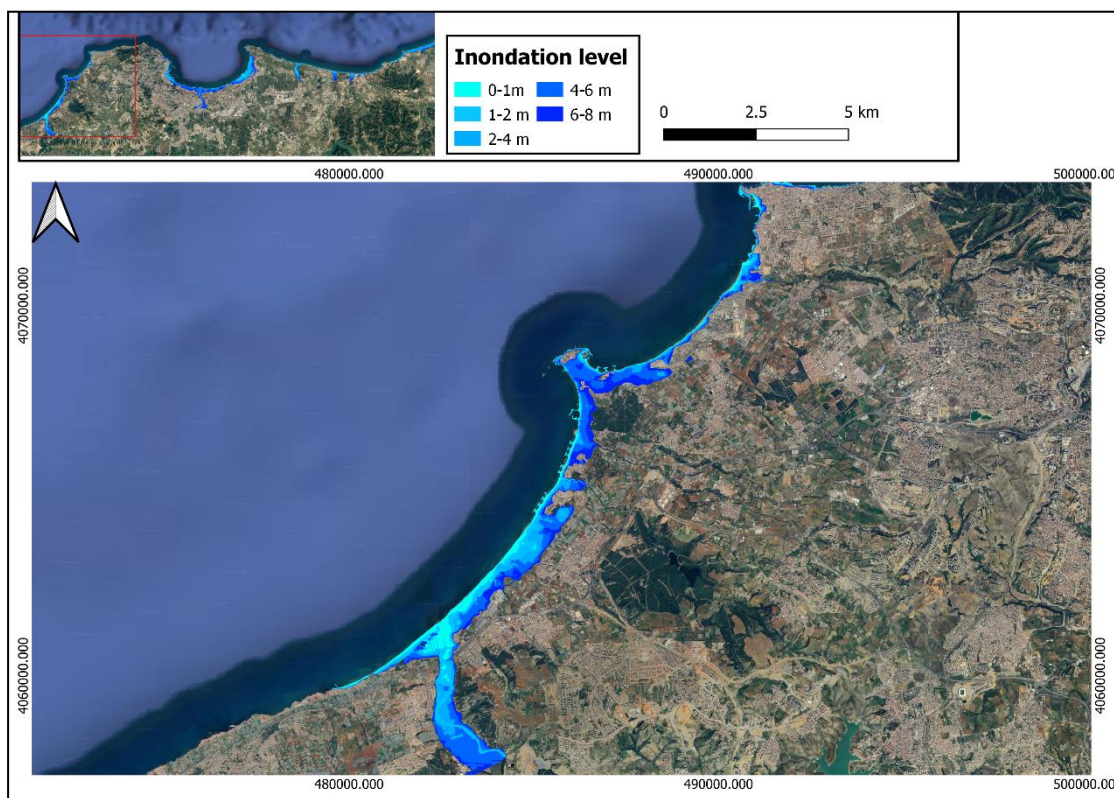


Figure VI. 6 : Les zones d'inondation selon le scénario de base et scénario extrême dans la baie de Bou Ismail.

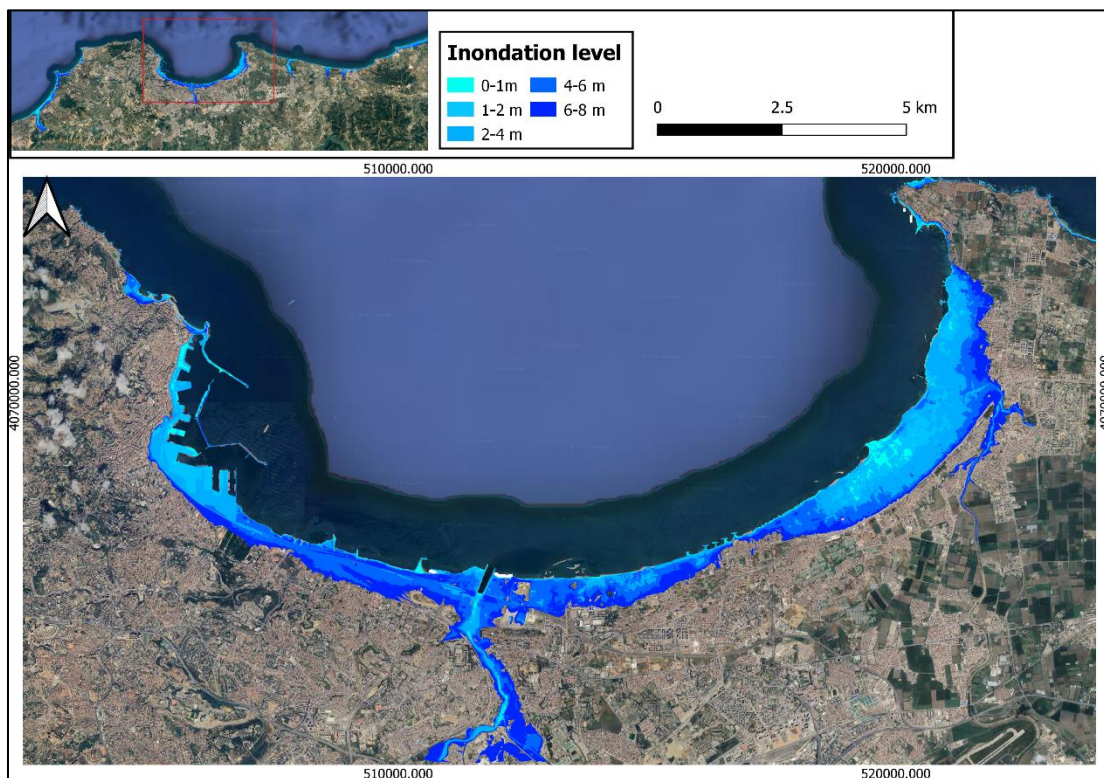
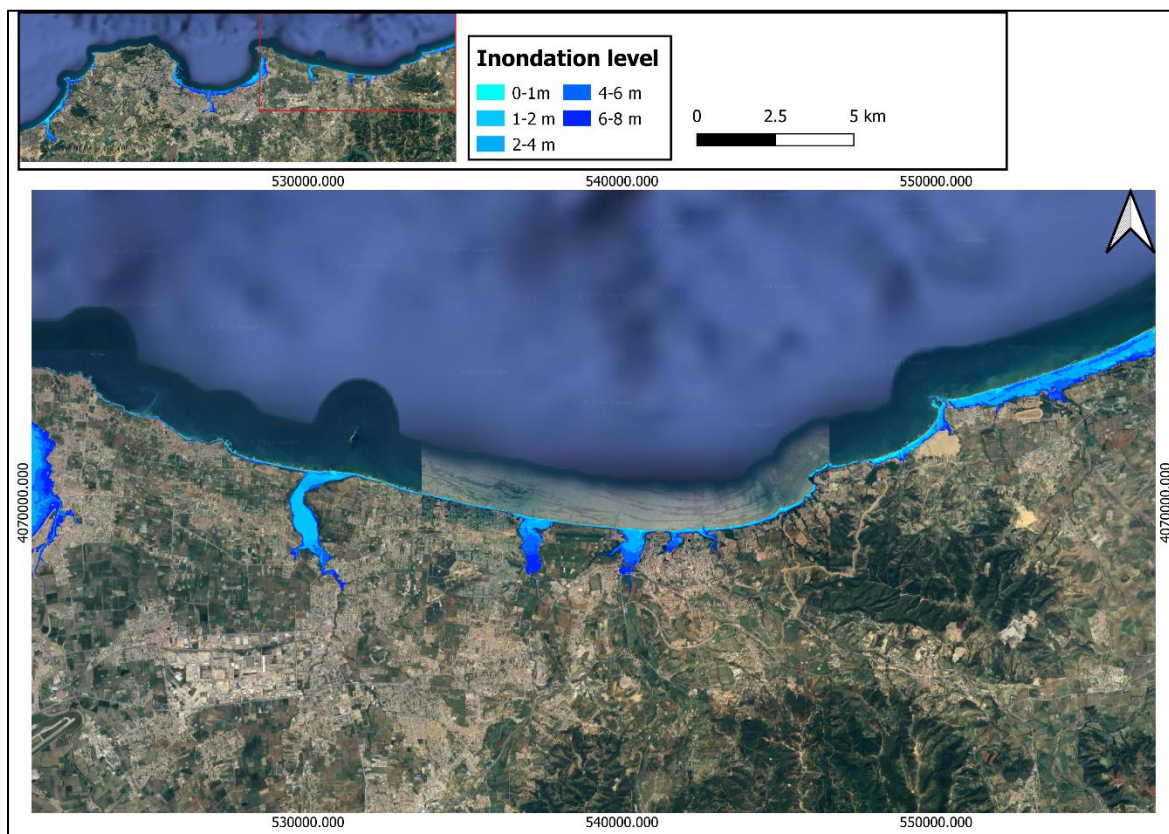


Figure VI. 7 : Les zones d'inondation selon le scénario de base et scénario extrême dans la baie d'Alger.



**Figure VI. 8 :** Les zones d'inondation selon le scénario de base et scénario extrême dans la baie de Zemmouri.

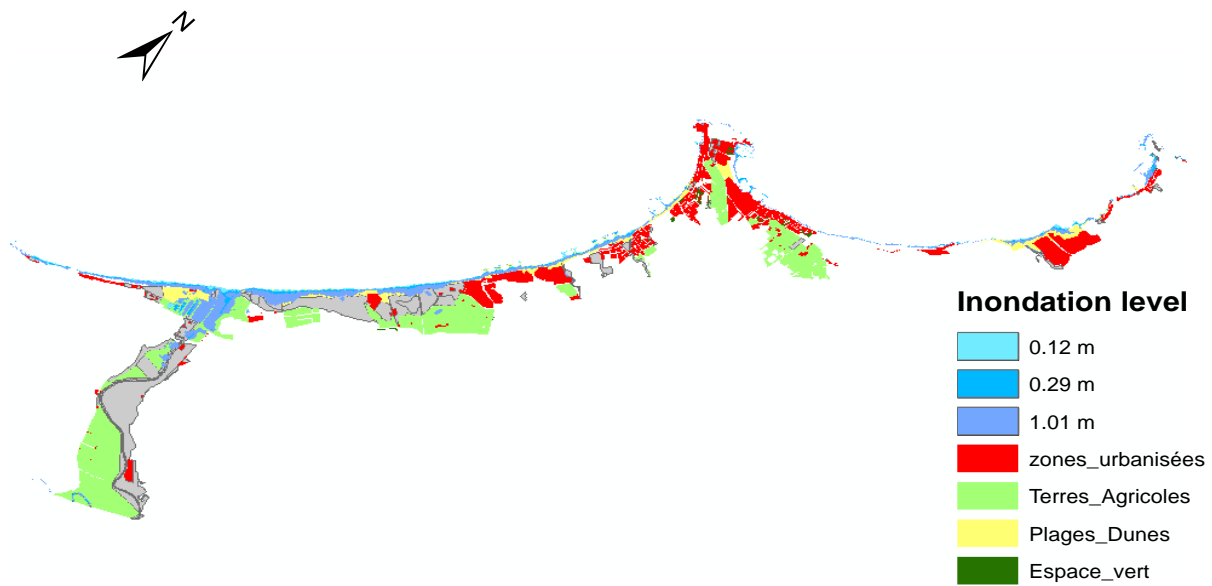
### **VI.3.1 Evaluation de l'impact de la submersion marine sur les sites d'étude :**

#### **Scénario 01 (base) :**

##### **Baie de Bou Ismail :**

A l'horizon 2030 et 2050 avec scénario d'élévation de niveau de la mer de 0.12 m et 0.29 m respectivement, l'impact sur la baie de Bou Ismail est faible, environ 18 ha en 2030 et 43 ha en 2050 des plages de la baie de Bou Ismail risquent d'être inondées par l'élévation de niveau de la mer, soit 20 % et 47 % de la surface totale successivement. Les plages les plus susceptibles d'être touchées sont Colonel Abbes, Kheloufi I et Dauphin, car Colonel Abbes et Kheloufi I sont proches de Oued Mazafran et Dauphin est proche de Oued Beni Messous. Les ouvrages de protection et les ports seront également touchés à l'horizon 2030.

A l'horizon 2100, le scénario 1,01 m prévoit l'inondation d'une superficie de 145.24 ha dans la baie de Bou Ismail. Les principales zones touchées seront les plages et les dunes, en particulier



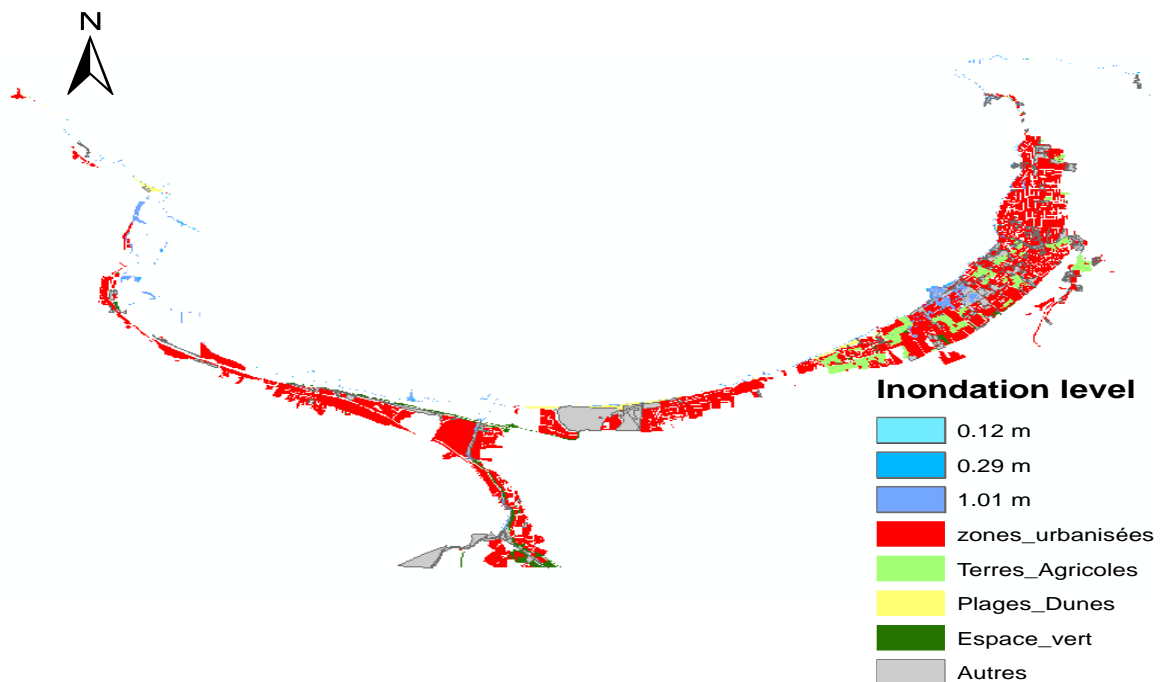
**Figure VI. 9 :** L'impact de la submersion marine sur les zones de la baie de Bou Ismail selon le scénario 01.

Les plages près de Oued Mazafran et Oued Beni Messous, les ouvrages de protection, environ 36 ha de zones urbanisées et les terres agricoles autour de Oued Mazafran.

#### **La baie d'Alger :**

A l'horizon 2030 et 2050 seulement 3.36 ha (10.69 %) et 8.16 ha (25.95 %) de la superficie totale des plages de la baie d'Alger susceptible d'être inondées. L'impact de scénario de l'élévation de niveau de la mer en 2030 est faible. Les ouvrages de protection et les plages situés proche des oueds sont susceptibles d'être inondés.

A l'horizon 2100, la côte d'une superficie de 65.29 ha sera affectée par l'élévation de niveau de la mer. Les zones principalement touchées sont : le port d'Alger, les plages (Piquet Blanc, Bateau Cassé, Alger Plage), la rue vers la plage et quelques habitats individuels au niveau de Bateau Cassé.

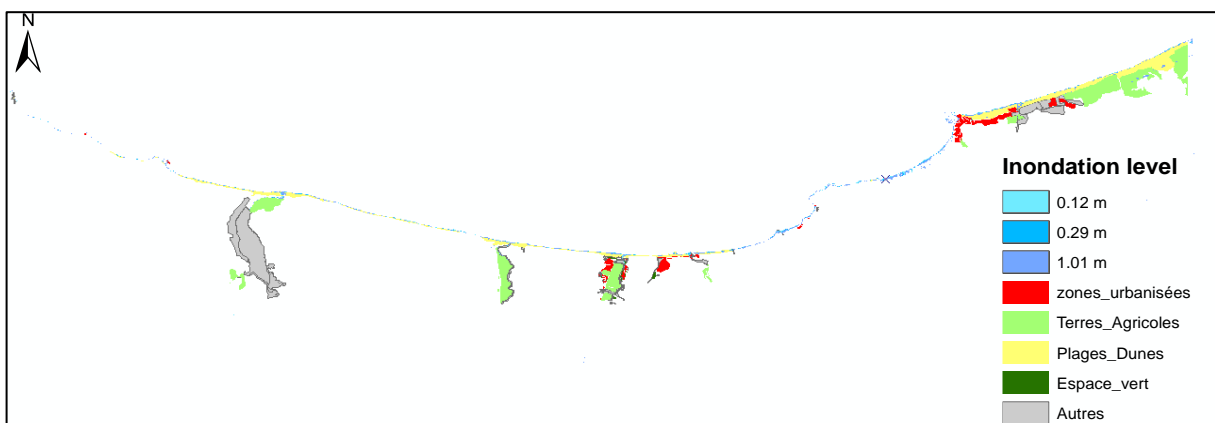


**Figure VI. 10 :** L'impact de la submersion marine sur les zones de la baie d'Alger selon scénario 01.

#### **Baie de Zemmouri :**

Pour la baie de Zemmouri en 2030, 12.96 ha et 26.34 ha en 2050 de la superficie des plages sont susceptibles d'être inondés, ce qui représente seulement 6.7 % à l'horizon 2030 et 13.64 % à l'horizon 2050 de la surface totale. Les plages proches des oueds sont susceptibles d'être affectées par les inondations en 2030 (El Kadous, Corso, Mouilha, Oued Elgharaf, Oued Elime).

A l'horizon 2100, les résultats montrent que 78.51 ha sera impacté par l'élévation de niveau de la mer. Les zone basse sera touchées telle que les plages de Tamaris, Kaf El Aarar, Flot bleu, El-Kadous, Reghaia plage et Sghiret (Fig V.11).



**Figure VI. 11 :** L'impact de la submersion marine sur les zones de la baie de Zemmouri selon scénario 01.

### **Scénario 02 (extrêmes) :**

Les résultats montrent que dans les scénarios 2030, 2050 et 2100, les zones susceptibles d'être inondées dans les trois baies sont les zones les plus basses, représentant une superficie totale de 1900 ha en 2030, 2986 ha en 2050 et 3846 ha en 2100. Les zones urbanisées touchées par les inondations sont estimées à 363,33 ha en 2030, 716 ha en 2050 et 1079,84 ha en 2100. Les terres agricoles sont également touchées par les inondations, avec une superficie de 340,65 ha en 2030, 582,23 ha en 2050 et 697,44 ha en 2100.

#### **La baie de Bou Ismail :**

Une bande de 3 km et une surface de 6113,69 ha ont été déterminées pour étudier les scénarios extrêmes de la baie de Bou Ismail.

En 2030 les résultats (Fig VI.12) montrent que pour un scénario de 4.15 m, environ 8 % de la zone étudiée est susceptible d'être inondée. Les zones les plus touchées sont les plages, les structures de protection, les installations portuaires et les dunes. La zone urbaine et les terres agricoles seront également touchées par l'inondation, avec une superficie de 39.25 ha et 35,6 ha respectivement.

En 2050, sur le scénario de 5.32 m conduira à une inondation estimée à 817.95 ha, soit 13.38% de la zone étudiée. Les zones principalement touchées sont, les zones urbaines proches de la mer (Village touristique du Mazafran, Palm Beach, Sidi Fredj, Moretti) avec une surface estimée à 124.16 ha. Ainsi que des terres agricoles, en particulier celles situées autour de l'Oued Mazfran. La superficie des terres agricoles inondées est estimée à 255.15 ha.

En 2100, pour le scénario 7,04 m (tableau VI.7, Fig VI.12), une grande partie du littoral étudié sera submergée, estimée à 1028,45 ha, soit 16,82% de la surface totale de la zone étudiée. Presque la quasi-totalité d'une bande côtière de 800 m à l'ouest de Sidi Fredj sera inondée (Fig VI.12). Les terres agricoles sont les plus touchées par les inondations avec une superficie estimée à 320.65 ha, suivies par les zones urbanisées avec une superficie de 195.79 ha. Les espaces verts sont également touchés par les inondations avec une surface estimée à 5.87 ha.

#### **La baie d'Alger :**

La bande de 3 km de zone étudiée occupe une superficie de 8469.36 ha. A l'horizon 2030 pour une submersion de 3.85 m une superficie de 803.24 ha sera inondée soit 9.48 % de la zone étudiée. Les zones principalement touchées seront ; le port d'Alger, les ouvrages de protection, la quasi-totalité des plages. Les zones urbanisées telle que les Habitats léger, Habitat individuel, les Infrastructures de transport, les Habitat collectif, les Hébergements touristiques seront les plus affectées par les inondations, notamment à l'Est de la baie d'Alger (fig VI.13), avec une superficie de 293.61 ha. Les terres agricoles et les espace verts seront également touchés avec une superficie de 47.30 ha et 3.53 ha successivement.

En 2050 avec submersion de 5.12 m, la superficie de 1309.73 ha sera affecté par l'inondation soit 15.46% de la zone étudiée. Les zones principalement touchées seront ; le port d'Alger, le chemin de fer, front de mer de hussen-Dey, Une grande partie autour de Oued El

Hamiz, Stambul, Benzerga II et Bateau Cassé, la superficie de la zone urbanisées est de 546.25 ha. Les terres agricoles situées à l'Est de la baie d'Alger (fig VI.13) seront inondées avec une superficie estimée à 67.20 ha.

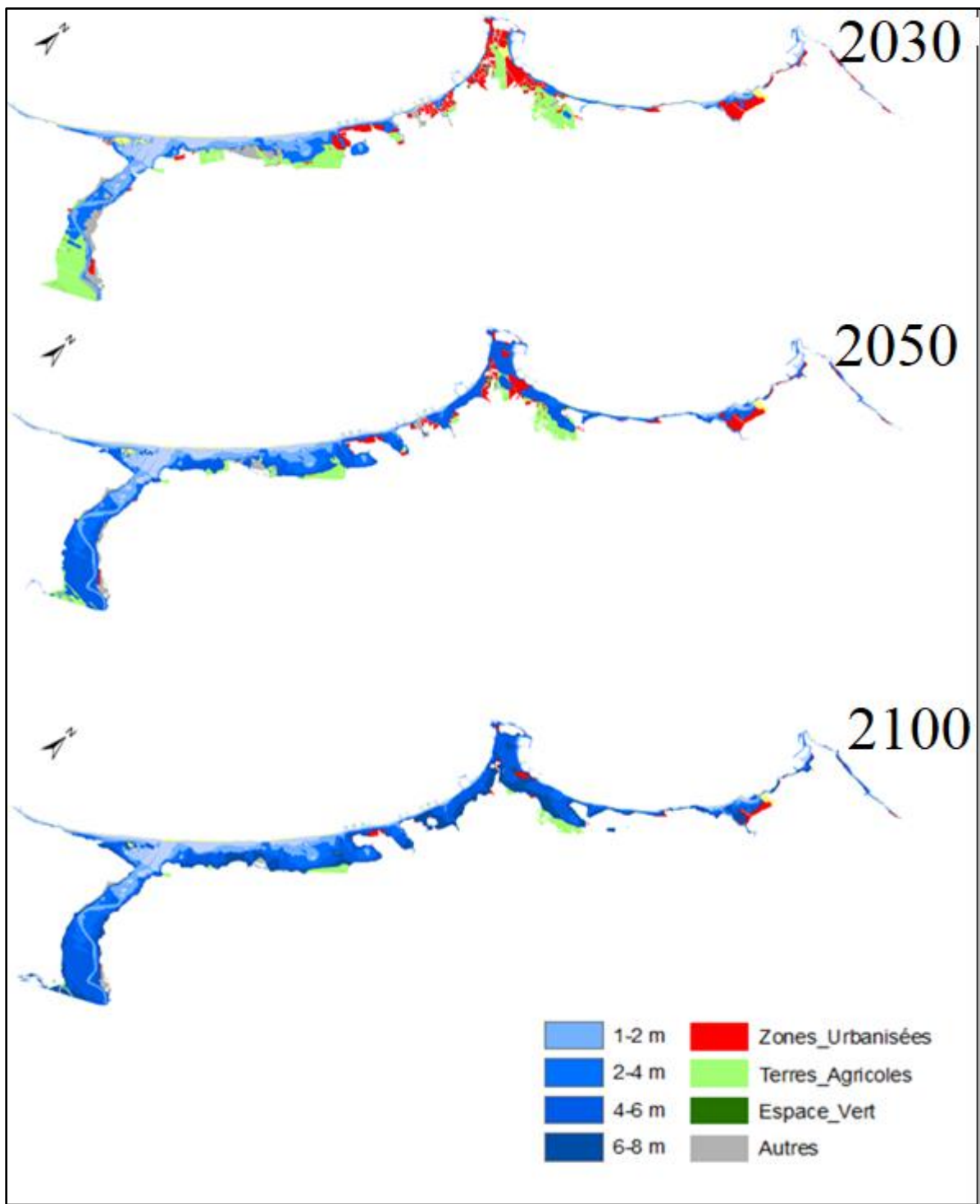
A l'horizon 2100 avec un scénario de 6.77 m environ 1803 ha de surface de la baie d'Alger risquent d'être inondée, soit 21.28 % de la superficie total étudiée. Les plages, le port d'Alger et les ouvrages de protection seront submergés à 100 %. Les zones urbanisées inondées seront augmenté d'une superficie de 826.24 ha. Les zones autour d'Oued El Harrach, Oued El Hamiz et la bande littorale de 300 m seront les plus touchées par les inondations. Les terres agricoles importantes seront également touchées par les inondations avec une perte qui dépassera les 93 ha. Les espaces verts seront inondés avec une superficie de 43.18 ha (fig VI.13).

### **Baie de Zemmouri :**

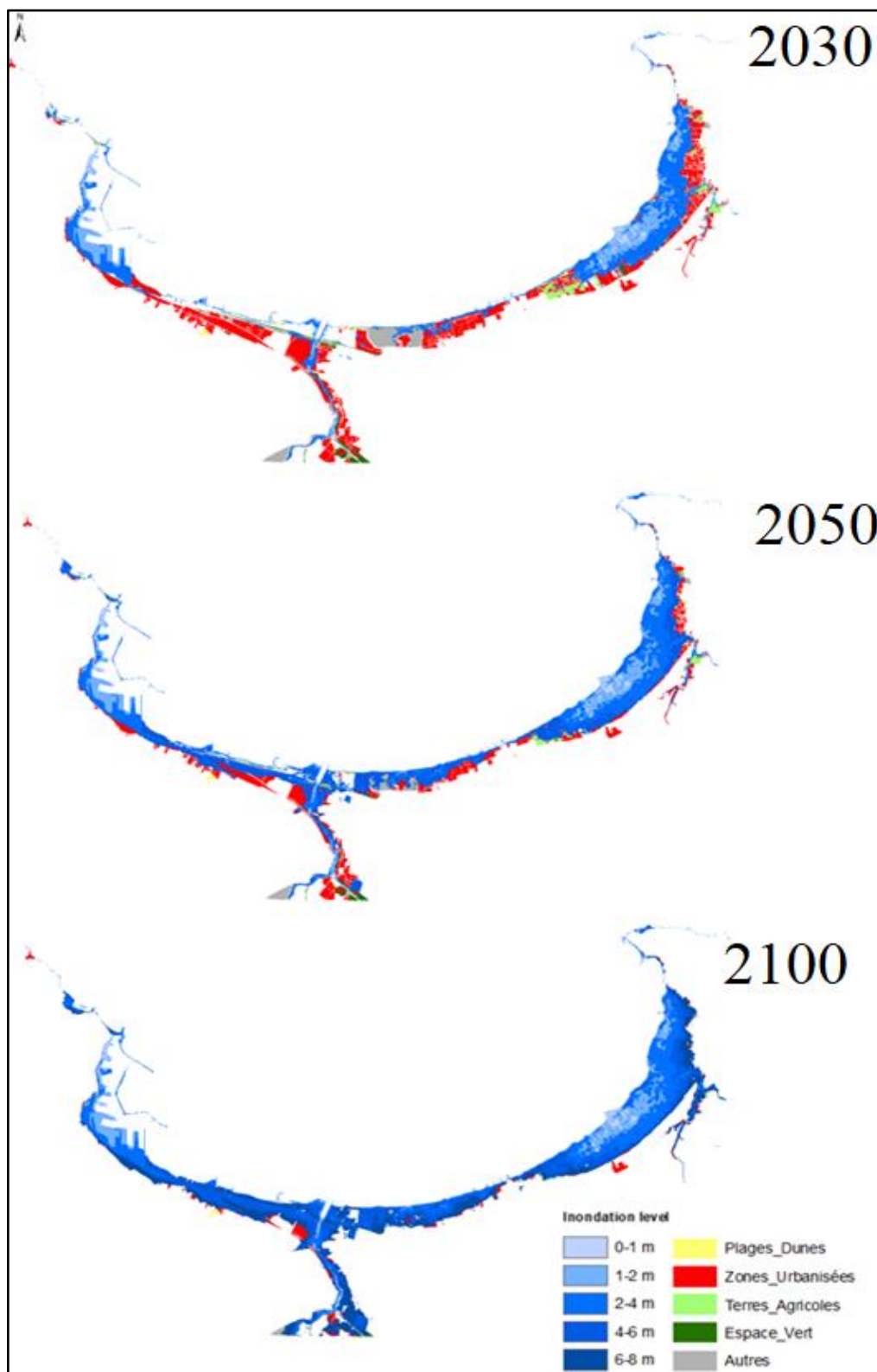
Nous avons délimité une bande de 3 km couvrant une superficie de 10697 ha. En 2030, une surface de 615 ha est susceptible d'être inondée, soit 5.74 % de la zone étudiée. La quasi-totalité des plages et des dunes sera inondée (fig IV.14). La présence des réseaux hydrographiques va étendre la zone inondée autour des oueds (oued Réghaïa, oued Boudouaou El Bahri, Oued Corso, Oued Boumerdès). Les zones les plus touchées par les inondations sont la forêt de Corso, la forêt de Zemmouri et les points bas (centre familial de Corso, complexe touristique de Zemmouri El Bahri). La zone urbanisée n'est pas touchée en raison de son altitude plus élevée. En revanche, les terres agricoles seront touchées par les inondations, avec une surface inondée dépassant les 178 ha.

En 2050, la zone inondée passera à 858.61 ha, soit 8.02% du site étudié. Les zones les plus touchées par les inondations sont les terrains et les habitations proches de la mer et des réseaux hydrographiques, les stations touristiques (Corso, Boumerdès, Zemmouri), les terres agricoles, en particulier les terres autour du lac de Réghaïa, et les terres agricoles à Corso et Zemmouri. La superficie des terres agricoles affectées par les inondations est de 259.87 ha. Les zones urbaines seront également soumises aux inondations, en particulier celles situées à proximité du front de mer et des oueds Corso et Tatarag. La surface des zones urbanisées inondées est de 59.81 ha.

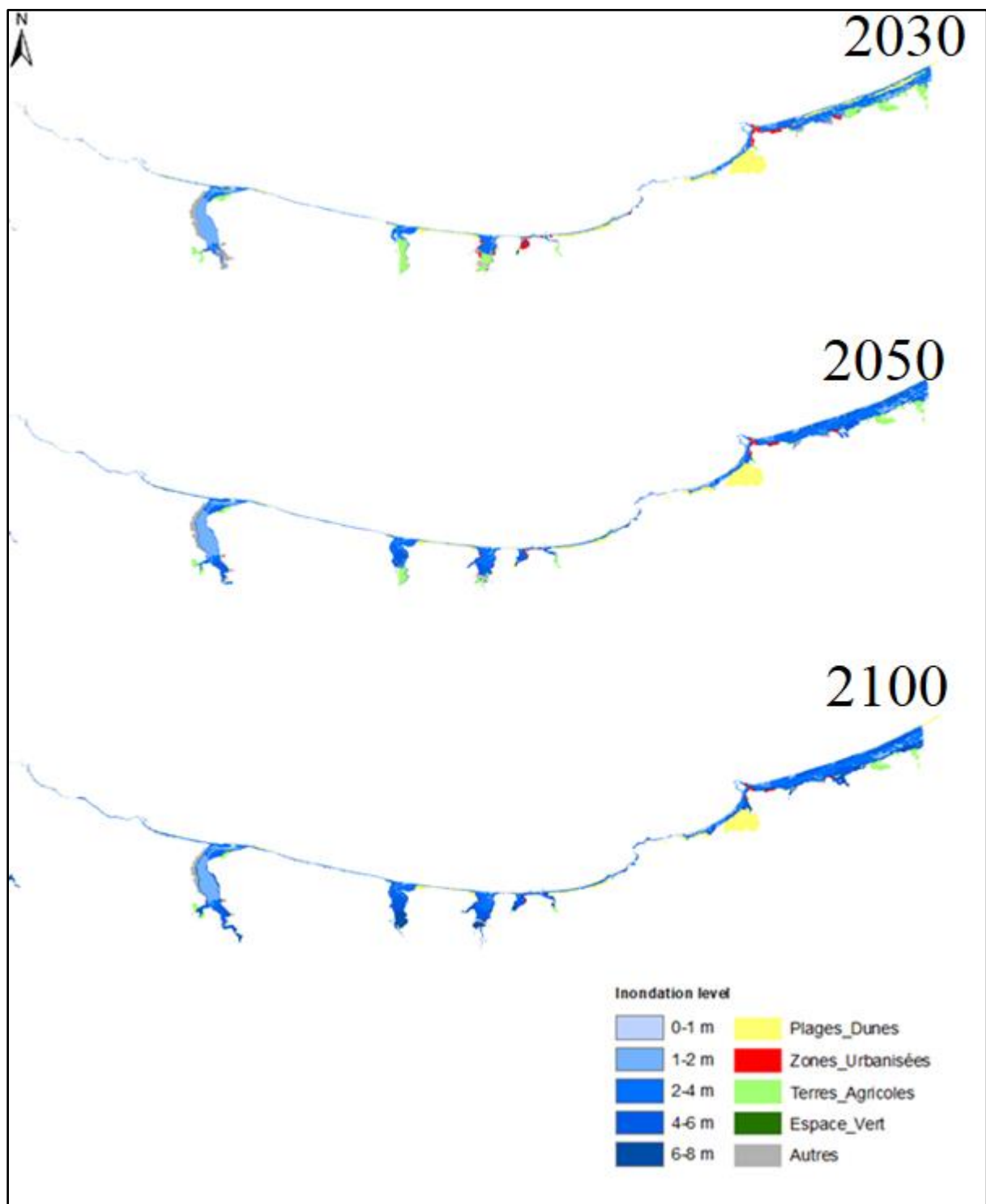
A l'horizon 2100, pour un scénario de 7.14 m, la superficie susceptible d'être inondée passera à 1015.49 ha, soit 9.49 % de la zone étudiée. Les terres agricoles autour du lac Réghaïa, les terres agricoles autour de Oued Boumerdes et les terres agricoles de Zemmouri en bord de mer seront affectées par les inondations, la superficie des terres agricoles inondées dépassant 283 ha. Les zones urbaines susceptibles d'être inondées sont les suivantes : Résidence El-Hana, Front de mer Boumerdes, Rocher Noir, habitations à proximité du port de Zemmouri et les complexes touristiques au bord de la mer. La superficie des des zones urbanisées inondées est de 73,52 ha.



**Figure VI. 12 :** L'impact de la submersion marine sur les zones de la baie de Bou Ismail selon scénario 01.



**Figure VI. 13 :** L'impact de la submersion marine sur les de la baie d'Alger selon scénario 02.



**Figure VI. 14 :** L'impact de la submersion marine sur les zones de la baie de Zemmouri selon scénario 02

#### **VI.4 Conclusion :**

Dans ce travail, nous avons appliqué une méthodologie pour créer des cartes avec des scénarios de submersion potentiellement attendus pour 2030, 2050 et 2100 dans trois zones d'étude de la côte algéroise qui sont sujettes à la submersion marine sous l'effet de l'élévation relative du niveau de la mer. Pour ces zones, des cartes thématiques ont été produites sur la base des scénarios climatiques, des houles de tempête responsables des inondations et du meilleur modèle numérique de terrain (MNT) disponible, ce qui a permis de cartographier, d'identifier et de classer les zones les plus exposées au risque d'inondation. Les résultats montrent que les zones les plus vulnérables aux inondations marines sont les zones de basse altitude et les zones situées autour des réseaux hydrographiques. Les résultats montrent que pour le scénario 01, les zones susceptibles d'être inondées sont de 34 hectares en 2030, 77 hectares en 2050 et 289 hectares en 2100. En revanche le scénario 02 (extrêmes), les zones susceptibles d'être inondées dans les trois baies sont les zones les plus basses, représentant une superficie totale de 1900 ha en 2030, 2986 ha en 2050 et 3846 ha en 2100.

# **Conclusion Générale**

### **Conclusion :**

Ce travail de thèse portant sur l'évolution morphodynamique des côtes sableuses du littoral de la métropole Algéroise, a pour principal objectif de mettre en évidence les phénomènes d'érosion de la ligne de côte et de dynamique sédimentaire et l'évaluation des zones à risques aux changements à plusieurs échelles spatio-temporelle.

L'étude, réalisée le long de la côte Algéroise du Mont Chenoua à Cap Djenet, a permis de mettre en évidence les principaux processus naturels et anthropiques qui contrôlent l'évolution du littoral Algérois et de cartographier les zones à risque de submersion aux horizons 2030, 2050 et 2100, en tenant compte de l'élévation future du niveau de la mer et des événements extrêmes.

L'étude a également mis en évidence les caractéristiques du littoral d'Algérois, composé de 92 km de côtes sableuses, 15 km d'infrastructures portuaires et de 78 km de côtes rocheuses. Une grande partie du littoral de la baie de Bou Ismail est rocheuse, tandis qu'une grande partie du littoral de la baie d'Alger et de la baie de Zemmouri est sablonneuse. La côte Algéroise est caractérisée par 120 plages de différentes formes (rectilignes, en poches, plages au pied des falaises, plages en baies).

Lors de cette étude, nous avons constaté que l'occupation et l'utilisation des sols ont considérablement changé dans la région d'Alger. L'analyse diachronique des images satellitaires a révélé des changements importants dans l'utilisation des terres. Entre 1984 et 2021, les terres agricoles ont été réduites de 23.68%, soit une superficie de 50367.73 hectares, et d'autre part, les zones urbanisées ont augmenté de 73700 ha, soit une multiplication par 6 en espace de 37 ans.

La modélisation de la dynamique hydrosédimentaire à l'aide de MIKE 21/3 a permis de déterminer les directions des houles dominantes, les courants côtiers et modéliser numériquement le transport et les tendances sédimentaires dans les trois baies (la baie de Bou Ismail, la baie d'Alger et la baie de Zemmouri). Les résultats de la modélisation montrent que la baie de Bou Ismail est soumise à une propagation de houle de Nord-Est, arrivant à la côte à des hauteurs comprises entre 1m et 2.5m. Ces houles génèrent de forts courants qui sont dirigés vers l'Ouest avec une vitesse de 0.30 m/s ce qui peut affecter plusieurs plages de sable de cette baie. Dans la baie d'Alger, les vagues venant du nord-ouest ont une hauteur moyenne variant de 1,5 m à 2.53 m, générant un courant de 0.3 m/s vers l'Est. Pour la baie de Zemmouri, les houles venant du Nord-Est génèrent une dérive littorale parallèle à la côte avec des vitesses variant de 0.5 m/s à 1 m/s et dirigée d'Est en Ouest.

L'étude a également montré que l'orientation locale de la côte peut modifier la dynamique sédimentaire, comme dans le cas des plages Moretti et Sahel, où les houles du quadrant nord génèrent des courants de retour vers le large. Le sens de la dérive littorale change donc d'une zone à l'autre. La dérive évolue en fonction de la direction de la houle et de l'orientation de la côte.

Le suivi de l'évolution de la ligne de rivage à long terme révèle que 16.35 % des plages sableuses montrent une tendance à l'érosion ( $> -0,5$  m/an), 50.36 % sont en état stable (entre -

0,5 et 0,5 m) et 33.28% des plages sont en accrétion ( $> +0,5$  m/an). Un modèle cyclique d'érosion (au cours des périodes 1984-1989, 1994-1999 et 2007-2013) et d'accrétion (au cours des périodes 1989-1994, 1999-2007 et 2013-2021) a été observé lors de l'évaluation des changements à court terme du trait de côte Algéroise.

Dans l'ensemble, les processus naturels, en particulier la tempête de 2007 et les activités anthropiques telles que l'extraction de sable, les constructions des barrages, l'installation des ouvrages de protection juste après la tempête de 2007 (03 brise-lames et un épi au niveau de Plam Beach et 04 brise-lames au niveau de plage Sirène) et le rechargement artificiel, sont les principaux facteurs des modifications de littoral Algérois.

Lors de l'étude du phénomène de submersion marine, deux scénarios ont été adoptés pour évaluer les zones à risque à l'horizon 2030, 2050 et 2100, le premier ne considérant que l'élévation du niveau de la mer et le second incluant les événements extrêmes.

Il a été montré qu'une élévation comprise entre 0 m et 1 m aura un impact minime sur la zone côtière d'Algéroise (Environ 290 ha inondés), les zones les plus touchées sont les plages, les ouvrages de protection et quelques habitats au niveau de Bateau Cassé. Cependant, l'impact le plus important sera dû à la conjonction avec des conditions météorologiques extrêmes au large des cotes de la zone d'étude qui pourraient générer un niveau d'inondation de 2 m à 4 m en 2030, de 4 m à 6 m en 2050 et de 6 m à 8 m à l'horizon 2100.

Cette étude a permis aussi de cartographier les risques d'érosion et d'inondation et de déterminer les terres menacées par l'élévation du niveau de la mer, en tenant compte des événements extrêmes, d'identifier les infrastructures, les zones urbanisées et les terres agricoles les plus menacées, ainsi que les pourcentages de chaque zone exposée au risque d'inondation. Les résultats révèlent qu'environ 700 ha de terres agricoles et 1 095 ha de zones urbanisées seront submergés à l'horizon 2100.

Il ressort de cette étude que l'utilisation des SIG et de la télédétection ainsi que l'extraction de données statistiques permettent de créer une base de données géographique qui peut ensuite être utilisée pour suivre l'évolution du littoral.

Cette étude a apporté de nouveaux résultats couvrant au total un linéaire de 185 km sur les 1764 km de côtes Algérienne ; il reste donc plusieurs centaines de kilomètres à étudier.

L'utilisation de données topographiques LiDAR (Light Detection and Ranging) à haute résolution dans les études futures est nécessaire pour évaluer les variations du volume de sédiments sur les plages et les cordons dunaires de la côte Algéroise.

Il est important de combler le manque de données provenant de mesures in situ des vagues et des courants à court et à moyen terme. Pour de futurs travaux complémentaires, nous recommandons des mesures in situ des vagues et des courants, ainsi que du transport de sédiments, combinées à des modèles numériques ou empiriques à court et moyen terme pour valider le modèle numérique MIKE 21/3.

Lors de cette étude du littoral des trois baies de Bou Ismail, Alger et Zemmouri a certainement apporté de nouveaux résultats importants sur le fonctionnement hydrodynamique et l'évolution morpho-sédimentaire, ainsi que sur l'évolution spatio-temporelle de ce littoral face

à l'élévation du niveau de la mer. Cependant, des progrès restent à faire et des études plus approfondies sont nécessaires pour améliorer nos connaissances et lever certaines incertitudes, notamment par :

- Prise en compte de la tectonique (taux de subsidence/élévation) dans les scénarios d'élévation relative du niveau de la mer ;
- Prise en compte des flux liquides et solides des différents oueds de littoral Algérois ;
- Mise à jour des données topographiques par la réalisation de levés topographiques à l'aide d'un DGPS, et des données sur les flux de sédiments fluviaux ;
- L'identification de l'impact des ouvrages de protection sur la dynamique sédimentaire côtière.

Toutefois, la contrainte la plus importante de ce travail a été le manque de certaines données essentielles pour les études de vulnérabilité/adaptation, telles que les longues séries temporelles de données sur les ondes de tempête le long du littoral Algérois, et les mesures du niveau de la mer à l'échelle historique (sur au moins une centaine d'années), qui fourniraient une indication des tendances actuelles.

En outre, cette étude ouvre la voie à d'autres recherches, à mener en collaboration avec d'autres spécialistes, notamment dans les domaines suivants :

- L'utilisation de modèles hydrodynamiques pour différents scénarios de niveau de la mer et d'inondation ;
- Une évaluation plus détaillée de l'impact du changement climatique sur la biodiversité côtière, les écosystèmes et les ressources naturelles ;
- Une évaluation de l'impact combiné de la submersion marine et de l'inondation des bassins versants sur les côtes basses le long de la côte Algérienne ;
- Évaluation économique, à l'aide d'analyses coûts-avantages, des options d'adaptation et des dommages causés en cas de politique d'inaction.

Ce travail pourrait servir de plateforme pour développer un programme de stratégie nationale d'adaptation du littoral méditerranéen Algérien face au changement climatique. Ce programme devrait être conçu dans le cadre d'un plan de GIZC, avec des mesures en termes de normes réglementaires pour la construction en bord de mer, de zonage futur et de planification, qui doit impérativement intégrer le facteur " changement climatique ", en termes de sensibilisation et d'action participative de tous les acteurs concernés.

# **Bibliographie**

## Bibliographie

- Abu Zed, A.A., Soliman, M.R., Yassin, A.A., 2018. Evaluation of using satellite image in detecting long term shoreline change along El-Arish coastal zone, Egypt. *Alexandria Engineering Journal* 57, 2687–2702. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2017.10.005>
- Adams, B., Huyck, C., Mansouri, B., Eguchi, R., Shinozuka, M., 2004. Application of High-Resolution Optical Satellite Imagery for Post-Earthquake Damage Assessment: The 2003 Boumerdes (Algeria) and Bam (Iran) Earthquakes.
- Alesheikh, A., Ghorbanali, A., Talebzadeh, A., 2004. Generation the coastline map for Urmia Lake by TM and ETM+ imagery.
- Amarouche, K., Akpinar, A., Bachari, N.E.I., Houma, F., 2020. Wave energy resource assessment along the Algerian coast based on 39-year wave hindcast. *Renewable Energy* 153, 840–860.
- Amoura, R., Dahmani, K., 2022. Visualization of the spatial extent of flooding expected in the coastal area of Algiers due to sea level rise. *Horizon 2030/2100. Ocean & Coastal Management* 219, 106041.
- Amrouni, O., 2019. Photogrammetric assessment of shoreline retreat in North Africa\_ Anthropogenic and natural drivers. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 20.
- Andrew D. Short, 2012. Coastal Processes and Beaches | Learn Science at Scitable. URL <https://www.nature.com/scitable/knowledge/library/coastal-processes-and-beaches-26276621/> (accessed 3.31.23).
- Anfuso, G., Bowman, D., Danese, C., Pranzini, E., 2016. Transect based analysis versus area based analysis to quantify shoreline displacement: Spatial resolution issues. *Environmental monitoring and assessment* 188, 1–14.
- A.N.R.H., 2004. A.N.R.H., (2004) Agence Nationale des Ressources Hydrauliques [https://scholar.google.com/scholar?hl=fr&as\\_sdt=0%2C5&q=A.N.R.H.%2C+%282004%29+Carte+du+r%C3%A9seau+Hydroclimatologique+et+de+surveillance+de+la+qualit%C3%A9+des+eaux+du+nord+de+l%27Alg%C3%A9r&btnG=](https://scholar.google.com/scholar?hl=fr&as_sdt=0%2C5&q=A.N.R.H.%2C+%282004%29+Carte+du+r%C3%A9seau+Hydroclimatologique+et+de+surveillance+de+la+qualit%C3%A9+des+eaux+du+nord+de+l%27Alg%C3%A9r&btnG=) (accessed 11.6.23).
- Antonioli, F., De Falco, G., Lo Presti, V., Moretti, L., Scardino, G., Anzidei, M., Bonaldo, D., Carniel, S., Leoni, G., Furlani, S., Marsico, A., Petitta, M., Randazzo, G., Scicchitano, G., Mastronuzzi, G., 2020. Relative Sea-Level Rise and Potential Submersion Risk for 2100 on 16 Coastal Plains of the Mediterranean Sea. *Water* 12, 2173. <https://doi.org/10.3390/w12082173>
- Apostolopoulos, D., Nikolakopoulos, K.G., Boumpoulis, V., Depountis, N., 2020. GIS-based analysis and accuracy assessment of low-resolution satellite imagery for coastline monitoring, in: *Earth Resources and Environmental Remote Sensing/GIS Applications XI. SPIE*, pp. 29–40.
- Apostolopoulos, D.N., Avramidis, P., Nikolakopoulos, K.G., 2022. Estimating quantitative morphometric parameters and spatiotemporal evolution of the Prokopos Lagoon using remote sensing techniques. *Journal of Marine Science and Engineering* 10, 931.
- Appeaning Addo, K., Jayson-Quashigah, P.N., Kufogbe, K.S., 2012. Quantitative Analysis of Shoreline Change Using Medium Resolution Satellite Imagery in Keta, Ghana. *MS* 1, 1–9. <https://doi.org/10.5923/j.ms.20110101.01>
- Ayadi, K., Boutiba, M., Sabatier, F., Guettouche, M.S., 2015. Detection and analysis of historical variations in the shoreline, using digital aerial photos, satellite images, and topographic surveys DGPS: case of the Bejaia bay (East Algeria). *Arab J Geosci* 9, 26. <https://doi.org/10.1007/s12517-015-2043-9>

- Bachari Houma, F., 2009a. Modélisation et cartographie de la pollution marine et de la bathymétrie à partir de l'imagerie satellitaire (These de doctorat). Paris Est.
- Bachari Houma, F., 2009b. Modélisation et cartographie de la pollution marine et de la bathymétrie à partir de l'imagerie satellitaire (These de doctorat). Paris Est.
- Bernardara, P., Mazas, F., Kergadallan, X., Hamm, L., 2014. A two-step framework for over-threshold modelling of environmental extremes. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 14, 635–647.
- Bird, E.C., 1985. Coastline changes. A global review.
- Boak, E.H., Turner, I.L., 2005a. Shoreline definition and detection: a review. *Journal of coastal research* 21, 688–703.
- Boak, E.H., Turner, I.L., 2005b. Shoreline Definition and Detection: A Review. *Journal of Coastal Research* 214, 688–703. <https://doi.org/10.2112/03-0071.1>
- Boak, E.H., Turner, I.L., 2005c. Shoreline definition and detection: a review. *Journal of coastal research* 21, 688–703.
- Bombino, G., Barbaro, G., D'Agostino, D., Denisi, P., Foti, G., Labate, A., Zimbone, S.M., 2022. Shoreline change and coastal erosion: The role of check dams. First indications from a case study in Calabria, southern Italy. *CATENA* 217, 106494. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106494>
- Bonnot-Courtois, C., Levasseur, J.-E., 2003. Recherche d'indicateurs "naturalistes" de la limite supérieure du domaine maritime. *Cahiers Nantais* 59, 47–56.
- Bouakline, S., 2009. Variations historiques de la ligne de rivage et érosion côtière le long de la côte Est Algéroise entre Cap Matifou et l'embouchure de l'oued Reghaïa (PhD Thesis). Alger.
- Bouhmadouche, M., 2012. Contribution à l'étude géologique et sédimentologique de la grande baie de Zemouri (Cap-Matifou Cap-Djenet).
- Bouhmadouche, M., Hemdane, Y., 2016. Erosion of a sandy coast: continuous follow-up of the coastal groynes of protection in Boumerdes (Algeria). *Environ Earth Sci* 75, 866. <https://doi.org/10.1007/s12665-016-5665-7>
- Boukhennaf, A., Mezouar, K., 2023. Long and short-term evolution of the Algerian coastline using remote sensing and GIS technology. *Regional Studies in Marine Science* 61, 102893. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2023.102893>
- Boussinesq, J., 1872. Théorie des ondes et des remous qui se propagent le long d'un canal rectangulaire horizontal, en communiquant au liquide contenu dans ce canal des vitesses sensiblement pareilles de la surface au fond. *Journal de mathématiques pures et appliquées* 17, 55–108.
- Boutiba, M., Bouakline, S., 2011. Monitoring shoreline changes using digital aerial photographs, quick-bird image and DGPS topographic survey: Case of the east coast of Algiers, Algeria. *European Journal of Scientific Research* 48, 361–369.
- BOUTIBA, M.U., Guendouz, M., Guettouche, M.S., 2006. Evolution du littoral jijelien (est-algérie) à travers l'analyse sédimentologique des dépôts quaternaires. *Bulletin du Service Géologique de l'Algérie* 17, 113–127.
- Butt et Russell, T., Russell, P., 2000. Hydrodynamics and cross-shore sediment transport in the swash-zone of natural beaches: a review. *Journal of coastal research* 255–268.
- Caires, S., 2009. A comparative simulation study of the annual maxima and the peaks-over-threshold methods. Deltares report 1200264-002 for Rijkswaterstaat, Waterdienst.
- Cariolet, J.-M., Suanez, S., Meur-Ferec, C., Postec, A., 2012. Cartographie de l'aléa de submersion marine et PPR : éléments de réflexion à partir de l'analyse de la commune de Guissény (Finistère, France). *Cybergeo: European Journal of Geography*. <https://doi.org/10.4000/cybergeo.25077>

- Carter, R.W.G., 1988. *Coastal Environments: An Introduction to the Physical, Ecological, and Cultural Systems of Coastlines*. Elsevier.
- Chaaban, F., 2011. Apport potentiel des Systèmes d'Informations Géographiques (SIG) pour une meilleure gestion d'un littoral dans une optique de développement durable, approches conceptuelles et méthodologiques appliquées dans le Nord de la France (PhD Thesis). Présentée Pour l'obtention du titre de Docteur de l'Université Lille ....
- Chabane, K., 2019. Fonctionnement et diversité d'un écosystème à macroalgues de substrat rocheux de la région d'Alger (thèse).
- Chaib, W., Guerfi, M., Hemdane, Y., 2020. Evaluation of coastal vulnerability and exposure to erosion and submersion risks in Bou Ismail Bay (Algeria) using the coastal risk index (CRI). *Arabian Journal of Geosciences* 13, 1–18.
- Chouari, W., 2020. A methodological approach for mapping Tunisia's lower coast's risk of submersion: The case of the coastal sabkhas of Sidi Khlifa and Halq El Minjel (Central-East Tunisia). *Journal of African Earth Sciences* 162, 103726. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2019.103726>
- Clemente, M.F., 2022. The Future Impacts of ESL Events in Euro-Mediterranean Coastal Cities: The Coast-RiskBySea Model to Assess the Potential Economic Damages in Naples, Marseille and Barcelona. *Sustainability* 14, 10096. <https://doi.org/10.3390/su141610096>
- Colas S, 2007. Analyse statistique et cartographique de l'érosion marine. Institut français de l'environnement (IFEN). L'environnement en France - Rapport sur l'état de l'environnement. URL <https://ree.developpement-durable.gouv.fr//themes/milieus-et-territoires-a-enjeux/mer-et-littoral> (accessed 3.14.21).
- Coles, S., 2001. *An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values*, Springer Series in Statistics. Springer London, London. <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-3675-0>
- Conseil du Saint-Laurent, 2017. Risques côtiers. URL Qu'est-ce qu'un risque côtier ? Conseil du Saint-Laurent <https://tcrsudestuairemoyen.org>
- Cowell, P.J., Thom, B.G., 1994. Morphodynamics of coastal evolution. *Coastal evolution: Late Quaternary shoreline morphodynamics* 33–86.
- Crapoulet, A., 2015. Évolution du trait de côte, bilans sédimentaires et évaluation des zones à risques sur le littoral du Nord-Pas-de-Calais: analyse multi-échelles par LiDAR aéroporté.
- Crowell, M., Leatherman, S., Douglas, B., 2018. *Erosion: Historical Analysis and Forecasting*.
- Daeden, J., 2015. Analyse des pressions anthropiques sur l'environnement littoral européen et français (PhD Thesis). Université de La Rochelle.
- Dahmani, A. el alim, Mezouar, K., Salem Cherif, Y., Sallaye, M., 2021. Coastal processes and nearshore hydrodynamics under high contrast wave exposure, Bateau-cassé and Stamboul coasts, Algiers Bay. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 250, 107169. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2021.107169>
- Daniels, R.C., 2012. Using ArcMap to extract shorelines from Landsat TM & ETM+ data, in: *Proceedings of the 32nd ESRI International Users Conference*, San Diego, CA, USA. pp. 23–27.
- Davidson-Arnott, R., 2010. *An Introduction to Coastal Processes and Geomorphology*.
- Davies, J.L., 1964. A morphogenic approach to world shorelines. *Zeitschrift für geomorphologie* 127–142.
- Dean, R.G., Malakar, S.B., 1999. Projected flood hazard zones in Florida. *Journal of Coastal Research* 85–94.

- Delga MD, M., 1969. Mise au point sur la structure du Nord-Est de la Berbérie. <https://www.abebooks.com/Mise-au-point-structure-Nord-Est-Berb%C3%A9rie/221799754/bd> (accessed 4.29.23).
- Dette, H., Larson, M., Murphy, J., Newe, J., Peters, K., Reniers, A., Steetzel, H., 2002. Application of prototype flume tests for beach nourishment assessment. *Coastal Engineering* 47, 137–177.
- Déverchère, J., Yelles, K., Domzig, A., Mercier de Lépinay, B., Bouillin, J.-P., Gaullier, V., Bracène, R., Calais, E., Savoye, B., Kherroubi, A., Le Roy, P., Pauc, H., Dan, G., 2005. Active thrust faulting offshore Boumerdes, Algeria, and its relations to the 2003 Mw 6.9 earthquake. *Geophysical Research Letters* 32. <https://doi.org/10.1029/2004GL021646>
- DHI, 2016. Flow Model: Hydrodynamic Module Scientific Documentation. DHI Software: Hørsholm, Denmark.
- DHI, 2014. Couple Model FM (MIKE 21/3 FM ). User Guide. URL [https://manuals.mikepoweredbydhi.help/2017/MIKE\\_21.htm](https://manuals.mikepoweredbydhi.help/2017/MIKE_21.htm) (accessed 9.23.21).
- Djouder, F., Boutiba, M., 2017. Vulnerability assessment of coastal areas to sea level rise from the physical and socioeconomic parameters: case of the Gulf Coast of Bejaia, Algeria. *Arabian Journal of Geosciences* 10, 1–20.
- Dolan, R., Fenster, M.S., Holme, S.J., 1991. Temporal analysis of shoreline recession and accretion. *Journal of coastal research* 723–744.
- Domzig, A., Yelles, K., Le Roy, C., Déverchère, J., Bouillin, J.-P., Bracène, R., Mercier de Lépinay, B., Le Roy, P., Calais, E., Kherroubi, A., Gaullier, V., Savoye, B., Pauc, H., 2006a. Searching for the Africa–Eurasia Miocene boundary offshore western Algeria (MARADJA’03 cruise). *Comptes Rendus Geoscience* 338, 80–91. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2005.11.009>
- Domzig, A., Yelles, K., Le Roy, C., Déverchère, J., Bouillin, J.-P., Bracène, R., Mercier de Lépinay, B., Le Roy, P., Calais, E., Kherroubi, A., Gaullier, V., Savoye, B., Pauc, H., 2006b. Searching for the Africa–Eurasia Miocene boundary offshore western Algeria (MARADJA’03 cruise). *Comptes Rendus Geoscience* 338, 80–91. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2005.11.009>
- Douglas, B.C., Crowell, M., 2000. Long-term shoreline position prediction and error propagation. *Journal of Coastal Research* 145–152.
- Dubarbier, B., 2014. Modélisation numérique de l’évolution des profils de plages sableuses dominées par l’action de la houle (phdthesis). Université de Bordeaux.
- EGIS EAU, 2013, n.d. EgisEau/ Iau-Idf/ BRGM (2013) Etude sur la vulnérabilité et l’adaptation de la Wilaya d’Alger au changement climatique et aux risques naturels : Phase 1 – Evaluation et représentation des sources de vulnérabilité. URL (accessed 5.9.22).
- Esteves, L.S., Finkl, C.W., 1998. The problem of critically eroded areas (CEA): An evaluation of Florida beaches. *Journal of Coastal Research* 11–18.
- Falqués, A., 2006. Wave driven alongshore sediment transport and stability of the Dutch coastline. *Coastal Engineering, Coastal Hydrodynamics and Morphodynamics* 53, 243–254. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2005.10.012>
- FAO, 1996. Forest resources assessment 1990: Survey of tropical forest cover and study of change processes. Food & Agriculture Org.
- Faye, I., 2010. Dynamique du trait de côte sur les littoraux sableux de la Mauritanie à la Guinée-Bissau (Afrique de l’Ouest) : Approches régionale et locale par photo-interprétation, traitement d’images et analyse de cartes anciennes - Archive ouverte HAL. URL <https://theses.hal.science/tel-00472200/> (accessed 4.8.23).

- Fletcher, C., Rooney, J., Barbee, M., Lim, S.-C., Richmond, B., 2003. Mapping shoreline change using digital orthophotogrammetry on Maui, Hawaii. *Journal of Coastal Research* 106–124.
- Fletcher, C.H., Romine, B.M., Genz, A.S., Barbee, M.M., Dyer, M., Anderson, T.R., Lim, S.C., Vitousek, S., Bochicchio, C., Richmond, B.M., 2012. National assessment of shoreline change: Historical shoreline change in the Hawaiian Islands.
- Fryirs, K., 2013. (Dis) Connectivity in catchment sediment cascades: a fresh look at the sediment delivery problem. *Earth Surface Processes and Landforms* 38, 30–46.
- Gallagher, E.L., Elgar, S., Guza, R.T., 1998. Observations of sand bar evolution on a natural beach. *J. Geophys. Res.* 103, 3203–3215. <https://doi.org/10.1029/97JC02765>
- Gallien, T.W., O'Reilly, W.C., Flick, R.E., Guza, R.T., 2015. Geometric properties of anthropogenic flood control berms on southern California beaches. *Ocean & Coastal Management* 105, 35–47.
- Garès, P.A., 1990. Predicting flooding probability for beach/dune systems. *Environmental Management* 14, 115–123. <https://doi.org/10.1007/BF02394025>
- Genz, A.S., Fletcher, C.H., Dunn, R.A., Frazer, L.N., Rooney, J.J., 2007. The predictive accuracy of shoreline change rate methods and alongshore beach variation on Maui, Hawaii. *Journal of Coastal Research* 23, 87–105.
- Goda, Y., Konagaya, O., Takeshita, N., Hitomi, H., Nagai, T., 2001. Population distribution of extreme wave heights estimated through regional analysis, in: *Coastal Engineering 2000*. pp. 1078–1091.
- Guessoum, N., Benhamouche, A.A., Bouhadad, Y., Bourenane, H., Abbouda, M., 2018. Field evidence of Quaternary seismites in the Mostaganem-Relizane (western Algeria) region: seismotectonic implication. *Arab J Geosci* 11, 641. <https://doi.org/10.1007/s12517-018-4009-1>
- Hapke, C., Reid, D., Richmond, B.M., Ruggiero, P., List, J., 2006. National assessment of shoreline change Part 3: Historical shoreline change and associated coastal land loss along sandy shorelines of the California Coast.
- Hellequin, A.-P., Flanquart, H., Meur-Ferec, C., Rulleau, B., 2013. Perceptions du risque de submersion marine par la population du littoral languedocien : contribution à l'analyse de la vulnérabilité côtière. *Natures Sciences Sociétés* 21, 385–399.
- Hemdane, Y., Bouhmadouche, M., Atroune, F., 2016. Identification des zones côtières à fort potentiel en énergie marine renouvelable (vagues/houles) à travers l'étude de la morphologie côtière et sous-marine et hydrodynamique. *Journal of Renewable Energies* 19, 543–552. <https://doi.org/10.54966/jreen.v19i4.593>
- Himmelstoss, E.A., Henderson, R.E., Kratzmann, M.G., Farris, A.S., 2018. Digital Shoreline Analysis System (DSAS) Version 5.0 User Guide; Open-File Report 2018–1179. US Geological Survey: Reston, VA, USA.
- Hoozemans, F.M.J., Marchand, M., Pennekamp, H.A., 1993. Sea level rise: A global vulnerability assessment vulnerability assessments for population, coastal wetlands and rice production on a global scale. H1588.
- Houser, C., Hapke, C., Hamilton, S., 2008. Controls on coastal dune morphology, shoreline erosion and barrier island response to extreme storms. *Geomorphology* 100, 223–240. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2007.12.007>
- <https://www.wheatonline.co.uk/Algeria/Algiers.htm>, n.d. Alger - Observations | Historique de la météo en Algérie. URL (accessed 4.27.23).
- Ibrahima Faye, 2010. Dynamique du trait de côte sur les littoraux sableux de la Mauritanie à la Guinée-Bissau (Afrique de l'Ouest) : Approches régionale et locale par photo-interprétation, traitement d'images et analyse de cartes anciennes - TEL - Thèses en ligne. URL <https://theses.hal.science/tel-00472200/> (accessed 12.5.22).

- Inman, D.L., Nordstrom, C.E., 1971. On the tectonic and morphologic classification of coasts. *The Journal of Geology* 79, 1–21.
- IPCC, 2023. AR6 Synthesis Report: Summary for Policymakers Headline Statement. URL <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/resources/spm-headline-statements> (accessed 4.10.23).
- IPCC, 2021. Chapter 9: Ocean, Cryosphere and Sea Level Change. In: *Climate Change 2021: the Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. <https://www.ipcc.ch/>. 152.
- Jeschke, A., Pedersen, G., Vater, S., Behrens, J., 2017. Depth-averaged Non-hydrostatic Extension for Shallow Water Equations with Quadratic Vertical Pressure Profile: Equivalence to Boussinesq-type Equations. *International Journal for Numerical Methods in Fluids* 84. <https://doi.org/10.1002/flid.4361>
- Kacemi, M., 2013. Protection et valorisation du littoral en Algérie : législation et instruments : Le cas des communes littorales d'Oran. *Études caribéennes*. <https://doi.org/10.4000/etudescaribeennes.5959>
- Kankara, R.S., 2015. Estimation of Long and Short Term Shoreline Changes Along Andhra Pradesh Coast Using Remote Sensing and GIS Techniques. *Procedia Engineering* 8.
- Kermani, S., Boutiba, M., Guendouz, M., Guettouche, M.S., Khelfani, D., 2016. Detection and analysis of shoreline changes using geospatial tools and automatic computation: Case of jijelian sandy coast (East Algeria). *Ocean & coastal management* 132, 46–58.
- Khan, A.S., Ramachandran, A., Usha, N., Punitha, S., Selvam, V., 2012. Predicted impact of the sea-level rise at Vellar–Coleroon estuarine region of Tamil Nadu coast in India: Mainstreaming adaptation as a coastal zone management option. *Ocean & coastal management* 69, 327–339.
- Koffi Djagnikpo, K., Drabo, O., Ouoba, A.P., Da, D.C.E., Tchamie, T.T.K., 2017. Analyse de l'occupation du sol pour le suivi de l'évolution du paysage du territoire ouatchi au sud-est togo entre 1958 et 2015. *Cahiers du cerleshs xxxi*, 203.
- Komar, P.D., Inman, D.L., 1970. Longshore sand transport on beaches. *Journal of geophysical research* 75, 5914–5927.
- Kouakou, M., Bonou, F., Gnandi, K., Djagoua, E., Idrissou, M., Abunkudugu, A., 2023. Determination of Current and Future Extreme Sea Levels at the Local Scale in Port-Bouët Bay (Côte d'Ivoire). *Journal of Marine Science and Engineering* 11, 756. <https://doi.org/10.3390/jmse11040756>
- Kourosh Niya, A., Alesheikh, A., Soltanpour, M., Kheirkhahzarkesh, M., 2013. Shoreline Change Mapping Using Remote Sensing and GIS Case Study: Bushehr Province.
- Künzer, C., Ottinger, M., Liu, G., Sun, B., Baumhauer, R., Dech, S., 2014. Earth observation-based coastal zone monitoring of the Yellow River Delta: Dynamics in China's second largest oil producing region over four decades. *Applied Geography* 55, 92–107.
- Larid, M., 2008. La zone côtière humide de Réghaia dans le littoral Est Algérois (Algérie) : Contribution méthodologique à son plan de gestion. *Cybergeo : European Journal of Geography*. <https://doi.org/10.4000/cybergeo.18852>
- Larid, M., 2002. Le recul des plages en Algérie : problèmes et perspectives 5.
- Li, W., Gong, P., 2016. Continuous monitoring of coastline dynamics in western Florida with a 30-year time series of Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment* 179, 196–209.
- Liu, X.-Y., Jia, R.-S., Liu, Q.-M., Zhao, C.-Y., Sun, H.-M., 2019. Coastline Extraction Method Based on Convolutional Neural Networks—A Case Study of Jiaozhou Bay in Qingdao, China. *IEEE Access* 7, 180281–180291. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2959662>

- Luijendijk, A., Hagenaaars, G., Ranasinghe, R., Baart, F., Donchyts, G., Aarninkhof, S., 2018. The State of the World's Beaches. *Sci Rep* 8, 6641. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-24630-6>
- MacQueen, J., 1967. Some methods for classification and analysis of multivariate observations, in: *Proceedings of the Fifth Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability*. Oakland, CA, USA, pp. 281–297.
- Maiti, S., Bhattacharya, A.K., 2009. Shoreline change analysis and its application to prediction: A remote sensing and statistics based approach. *Marine Geology* 257, 11–23. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2008.10.006>
- Maouche, S., Harbi, A., 2018. The active faults of the Mitidja basin (North Central Algeria): what does the seismic history of the region tell us? A review. *Euro-Mediterr J Environ Integr* 3, 21. <https://doi.org/10.1007/s41207-018-0061-1>
- Maouche, S., Morhange, C., Meghraoui, M., 2009. Large boulder accumulation on the Algerian coast evidence tsunami events in the western Mediterranean. *Marine Geology* 262, 96–104. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2009.03.013>
- Martínez, M.L., Intralawan, A., Vázquez, G., Pérez-Maqueo, O., Sutton, P., Landgrave, R., 2007. The coasts of our world: Ecological, economic and social importance. *Ecological economics* 63, 254–272.
- Masria, A., Nadaoka, K., Negm, A., Iskander, M., 2015. Detection of Shoreline and Land Cover Changes around Rosetta Promontory, Egypt, Based on Remote Sensing Analysis. *Land* 4, 216–230. <https://doi.org/10.3390/land4010216>
- Masselink, G., Short, A.D., 1993a. The effect of tide range on beach morphodynamics and morphology: a conceptual beach model. *Journal of coastal research* 785–800.
- Masselink, G., Short, A.D., 1993b. The effect of tide range on beach morphodynamics and morphology: a conceptual beach model. *Journal of coastal research* 785–800.
- Mazas, F., Hamm, L., 2011. A multi-distribution approach to POT methods for determining extreme wave heights. *Coastal Engineering* 58, 385–394.
- McFeeters, S.K., 1996. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International journal of remote sensing* 17, 1425–1432.
- Ménard, Y., Fu, L.-L., Escudier, P., Parisot, F., Perbos, J., Vincent, P., Desai, S., Haines, B., Kunstmann, G., 2003. The Jason-1 mission special issue: Jason-1 calibration/validation. *Marine Geodesy* 26, 131–146.
- Mezouar, K., Ciortan, R., Boukhemacha, M.A., 2009. Mesures de protection du littoral roumain, in: *Edition 1, Hammamet, Tunisie*. Presented at the Conférence Méditerranéenne Côtière et Maritime - Coastal and Maritime Mediterranean Conference, Editions Paralia, pp. 139–142. <https://doi.org/10.5150/cmcm.2009.035-0>
- Mishra, M., Chand, P., Pattnaik, N., Kattel, D.B., Panda, G.K., Mohanti, M., Baruah, U.D., Chandniha, S.K., Achary, S., Mohanty, T., 2019. Response of long-to short-term changes of the Puri coastline of Odisha (India) to natural and anthropogenic factors: a remote sensing and statistical assessment. *Environmental Earth Sciences* 78, 1–23.
- Morton, R.A., Miller, T.L., 2005. National Assessment Of Shoreline Change: Part 2, Historical Shoreline Changes And Associated Coastal Land Loss Along The U.S. Southeast Atlantic Coast (No. 2005–1401), Open-File Report. U.S. Geological Survey. <https://doi.org/10.3133/ofr20051401>
- Nassar, El-Adawy, A., Zakaria, M., Diab, R., Masria, A., 2022. Quantitative appraisal of naturalistic/anthropic shoreline shifts for hurghada: Egypt. *Marine Georesources & Geotechnology* 40, 573–588. <https://doi.org/10.1080/1064119X.2021.1918807>

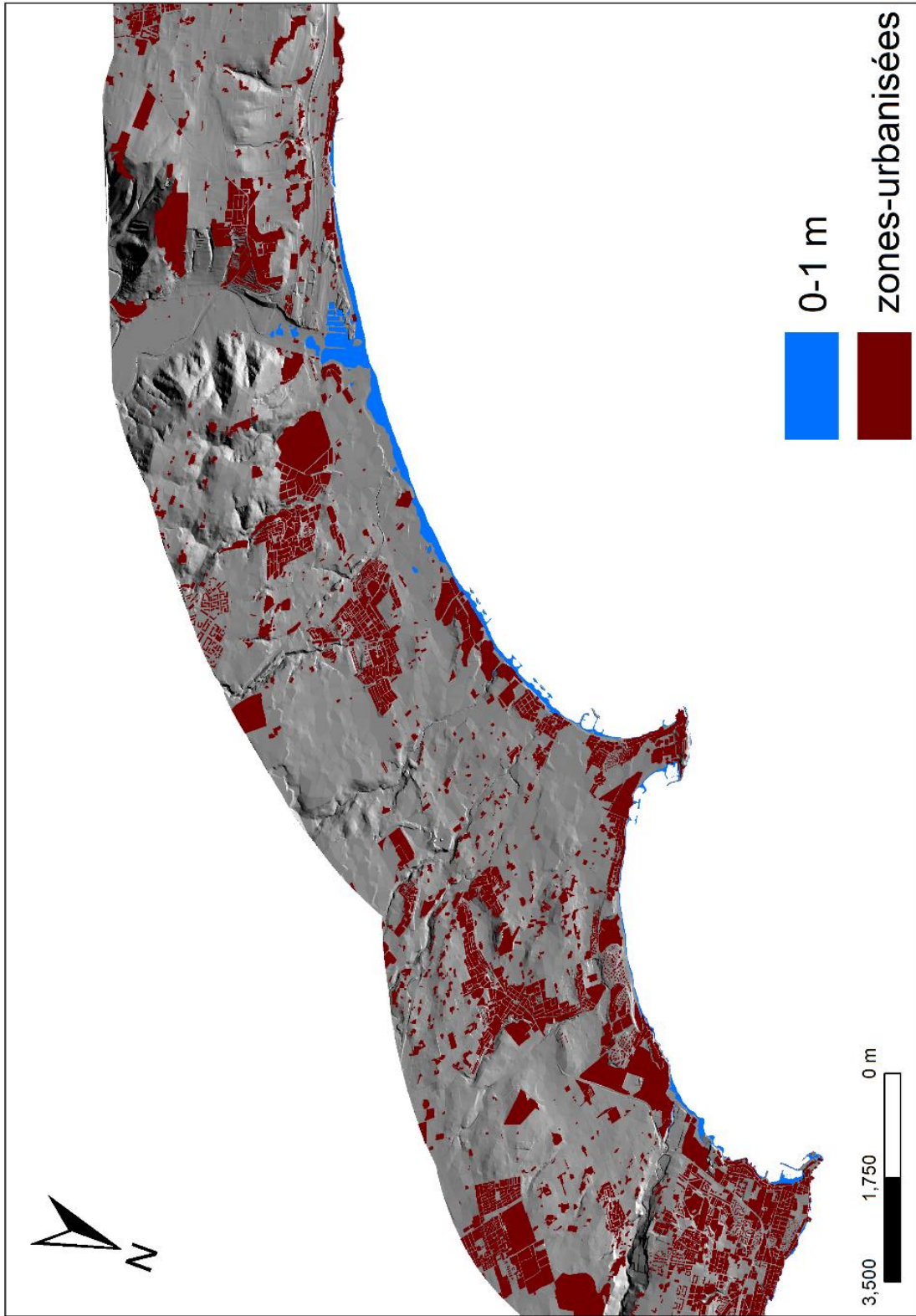
- Nazeer, M., Waqas, M., Shahzad, M.I., Zia, I., Wu, W., 2020. Coastline Vulnerability Assessment through Landsat and Cubesats in a Coastal Mega City. *Remote Sensing* 12, 749. <https://doi.org/10.3390/rs12050749>
- Northrop, P.J., Attalides, N., Jonathan, P., 2017. Cross-Validatory Extreme Value Threshold Selection and Uncertainty with Application to Ocean Storm Severity. *Journal of the Royal Statistical Society Series C: Applied Statistics* 66, 93–120. <https://doi.org/10.1111/rssc.12159>
- Parker, B.B., 2003. The difficulties in measuring a consistently defined shoreline—the problem of vertical referencing. *Journal of Coastal Research* 44–56.
- Paskoff, R., 1970. *L'érosion des côtes*, 1re édition : 2e trimestre 1981. ed.
- Pickands, J., 1975. Statistical inference using extreme order statistics. *the Annals of Statistics* 119–131.
- Quadrado, G.P., Dillenburg, S.R., Goulart, E.S., Barboza, E.G., 2021. Historical and geological assessment of shoreline changes at an urbanized embayed sandy system in Garopaba, Southern Brazil. *Regional Studies in Marine Science* 42, 101622.
- Rabehi, W., Guerfi, M., Mahi, H., 2019. La baie d'Alger, un espace côtier prisé, entre pressions d'urbanisation et gouvernance territoriale. *Geo-Eco-Marina* 25, 113–130. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3609744>
- Rajasree, B.R., Deo, M.C., Sheela Nair, L., 2016. Effect of climate change on shoreline shifts at a straight and continuous coast. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 183, 221–234. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2016.10.034>
- Rami, A., Nechimi, M., Haddad, M., Maârrouf, S., Benkouider, T., 2016. Traitement du signal marégraphique par analyse harmonique pour la détermination d'une référence altimétrique pour l'Algérie.
- Rangel-Buitrago, N.G., Anfuso, G., Williams, A.T., 2015. Coastal erosion along the Caribbean coast of Colombia: Magnitudes, causes and management. *Ocean & Coastal Management* 114, 129–144. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2015.06.024>
- Reeve, D.E., Horrillo-Caraballo, J., Karunaratna, H., Pan, S., 2019. A new perspective on meso-scale shoreline dynamics through data-driven analysis. *Geomorphology* 341, 169–191. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.04.033>
- Remya, P.G., Kumar, R., Basu, S., Sarkar, A., 2012. Wave hindcast experiments in the Indian Ocean using MIKE 21 SW model. *J Earth Syst Sci* 121, 385–392. <https://doi.org/10.1007/s12040-012-0169-7>
- Rigoni m, 2003. Erosion du littoral de la mer Méditerranée : les conséquences pour le tourisme [WWW Document]. URL <http://www.assembly.coe.int/nw/xml/XRef/X2H-Xref-ViewHTML.asp?FileID=10340&lang=fr> (accessed 3.14.21).
- Robertson, W., Whitman, D., Zhang, K., Leatherman, S.P., 2004. Mapping shoreline position using airborne laser altimetry. *Journal of Coastal Research* 20, 884–892.
- Ruessink, B.G., 1998. The temporal and spatial variability of infragravity energy in a barred nearshore zone. *Continental Shelf Research* 18, 585–605.
- Sallaye M, 2021. Processus mis en jeu dans l'évolution morpho-dynamique de la baie de Zemmouri: modélisation hydro-sédimentaire et cinématique du trait de côte. (PhD Thesis). Ecole nationale supérieure des sciences de la mer et de l'aménagement du ....
- Santos, C.A.G., do Nascimento, T.V.M., Mishra, M., da Silva, R.M., 2021. Analysis of long- and short-term shoreline change dynamics: A study case of João Pessoa city in Brazil. *Science of the Total Environment* 769, 144889.
- Satta, 2014. An index-based method to assess vulnerabilities and risks of Mediterranean coastal zones to multiple hazards (Doctoral Thesis). Università Ca' Foscari Venezia.

- Shao, Z., Liang, B., Li, H., Lee, D., 2018. Study of sampling methods for assessment of extreme significant wave heights in the South China Sea. *Ocean Engineering* 168, 173–184.
- Short, 1999. *Handbook of beach and shoreface morphodynamics*. Great Britain: John Wiley; ISBN 0-471-96570-7.
- Snoussi, M., Ouchani, T., Khouakhi, A., Niang-Diop, I., 2009. Impacts of sea-level rise on the Moroccan coastal zone: quantifying coastal erosion and flooding in the Tangier Bay. *Geomorphology* 107, 32–40.
- Stander, C., 2015. *Analysis of extreme events in the coastal engineering environment* (PhD Thesis). Stellenbosch: Stellenbosch University.
- Stive, M.J., Aarninkhof, S.G., Hamm, L., Hanson, H., Larson, M., Wijnberg, K.M., Nicholls, R.J., Capobianco, M., 2002. Variability of shore and shoreline evolution. *Coastal engineering* 47, 211–235.
- Stive, M.J.F., Aarninkhof, S.G.J., Hamm, L., Hanson, H., Larson, M., Wijnberg, K.M., Nicholls, R.J., Capobianco, M., 2002. Variability of shore and shoreline evolution. *COAST ENG* 47, 211–235. [https://doi.org/10.1016/S0378-3839\(02\)00126-6](https://doi.org/10.1016/S0378-3839(02)00126-6)
- Than, V.V., 2015a. *Modélisation d'érosion côtière : application à la partie Ouest du tombolo de Giens* (These de doctorat). Aix-Marseille.
- Than, V.V., 2015b. *Modélisation d'érosion côtière: application à la partie Ouest du tombolo de Giens* (PhD Thesis). Aix-Marseille.
- Thieler, E.R., O'Connell, J.F., Schupp, C.A., 2001. The massachusetts shoreline change project: 1800s to 1994. *US Geological Survey Administrative Report* 39.
- UICN, 2012. *Conservation des dunes côtières : restauration et gestion durables en Méditerranée occidentale*.
- Valderrama-Landeros, L., Flores-de-Santiago, F., 2019. Assessing coastal erosion and accretion trends along two contrasting subtropical rivers based on remote sensing data. *Ocean & Coastal Management* 169, 58–67. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2018.12.006>
- Vanem, E., 2016. Joint statistical models for significant wave height and wave period in a changing climate. *Marine Structures* 49, 180–205. <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2016.06.001>
- Vu, M.T., 2018. *Une approche numérique pour la conception d'ouvrages de protection côtière au tombolo oriental de la presqu'île de Giens* (PhD Thesis). Toulon.
- Wikipédia, 2022. *Liste des barrages en Algérie*. Wikipédia.
- Wildi, W., 1983. La chaîne tello-rifaine (Algérie, Maroc, Tunisie): structure, stratigraphie et évolution du Trias au Miocène. *Revue de géographie physique et de géologie dynamique* 24, 201–297.
- Willmott, C.J., 1981. On the validation of models. *Physical geography* 2, 184–194.
- wofrance, 2023. *climat - Graphique - Alger Algérie - wofrance*. URL <https://www.weatheronline.co.uk/weather/maps/city>.
- Wright, L.D., Short, A.D., 1984. Morphodynamic variability of surf zones and beaches: a synthesis. *Marine geology* 56, 93–118.
- Wright, L.D., Thom, B.G., 1977. Coastal depositional landforms: a morphodynamic approach. *Progress in Physical Geography* 1, 412–459.
- Yelles-Chaouche, A., Boudiaf, A., Djellit, H., Bracene, R., 2006a. La tectonique active de la région nord-algérienne. *Comptes Rendus Geoscience, Quelques développements récents sur la géodynamique du Maghreb* 338, 126–139. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2005.11.002>

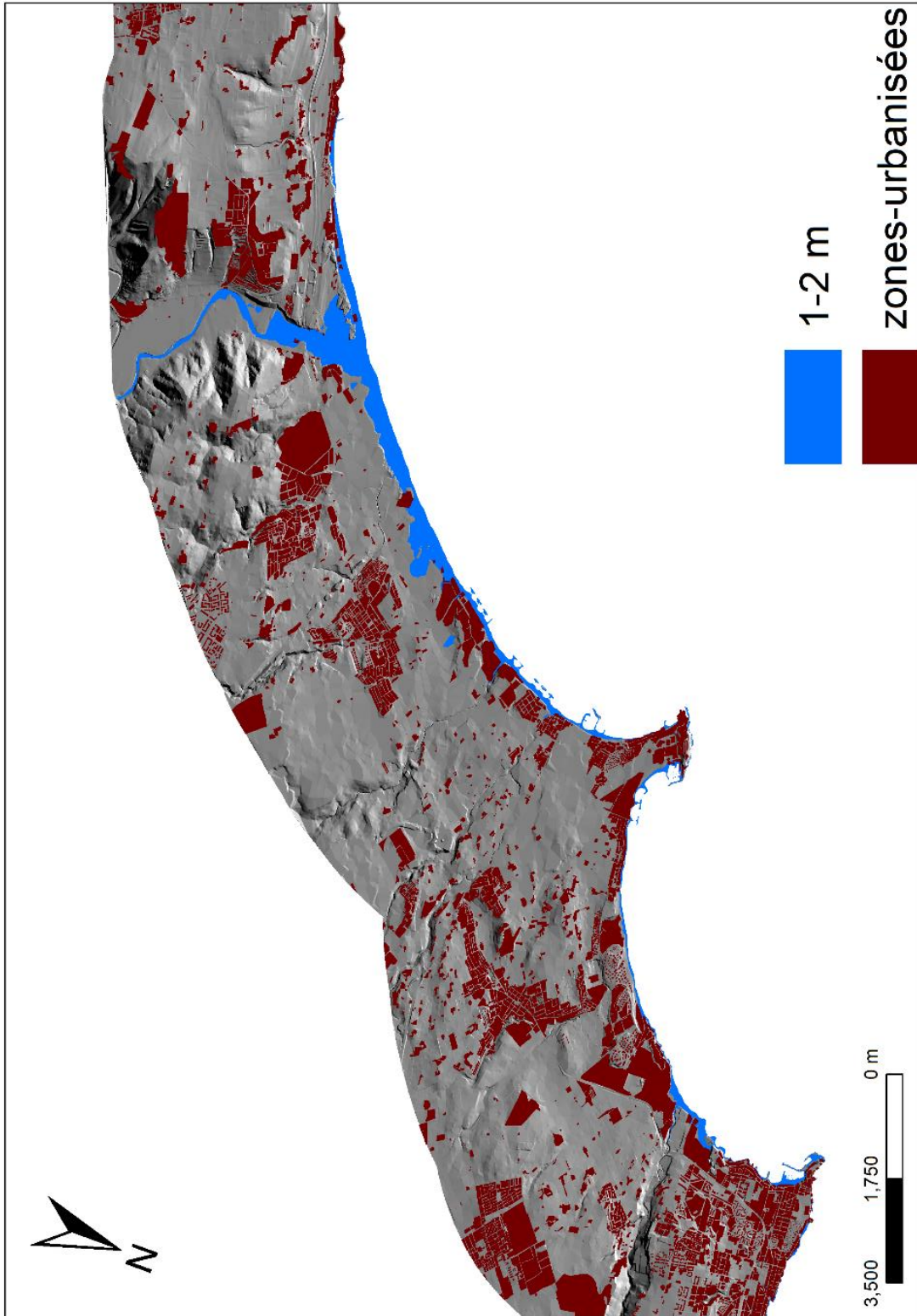
- Yelles-Chaouche, A., Boudiaf, A., Djellit, H., Bracene, R., 2006b. La tectonique active de la région nord-algérienne. *Comptes Rendus Geoscience* 338, 126–139.  
<https://doi.org/10.1016/j.crte.2005.11.002>
- Yelles-Chaouche, A., Khelif, M.F., Haned, A., Chami, A., Aidi, C., Beldjoudi, H., Kherroubi, A., Benaissa, Z., 2019. The Algiers (north central Algeria) earthquake of August 1st, 2014 Mw 5.5 in the Algiers Bay tectonic context. *J Seismol* 23, 287–302.  
<https://doi.org/10.1007/s10950-018-9806-1>
- Yelles-Chaouche, A.K., Haned, A., Aidi, C., Beldjoudi, H., Kherroubi, A., Semmane, F., Benabdeloued, B.Y.N., Larbes, Y., Alili, A., Khelif, M.F., Belheouane, A., 2017. The M w 5.0 Hammam Melouane Earthquake (North Central Algeria) of 17 July 2013 in the Context of the Tellian Atlas Seismicity. *Pure Appl. Geophys.* 174, 1601–1614.  
<https://doi.org/10.1007/s00024-017-1492-3>
- Zhang, Y., Hou, X., 2020. Characteristics of coastline changes on southeast Asia Islands from 2000 to 2015. *Remote Sensing* 12, 519.

**Annexe**

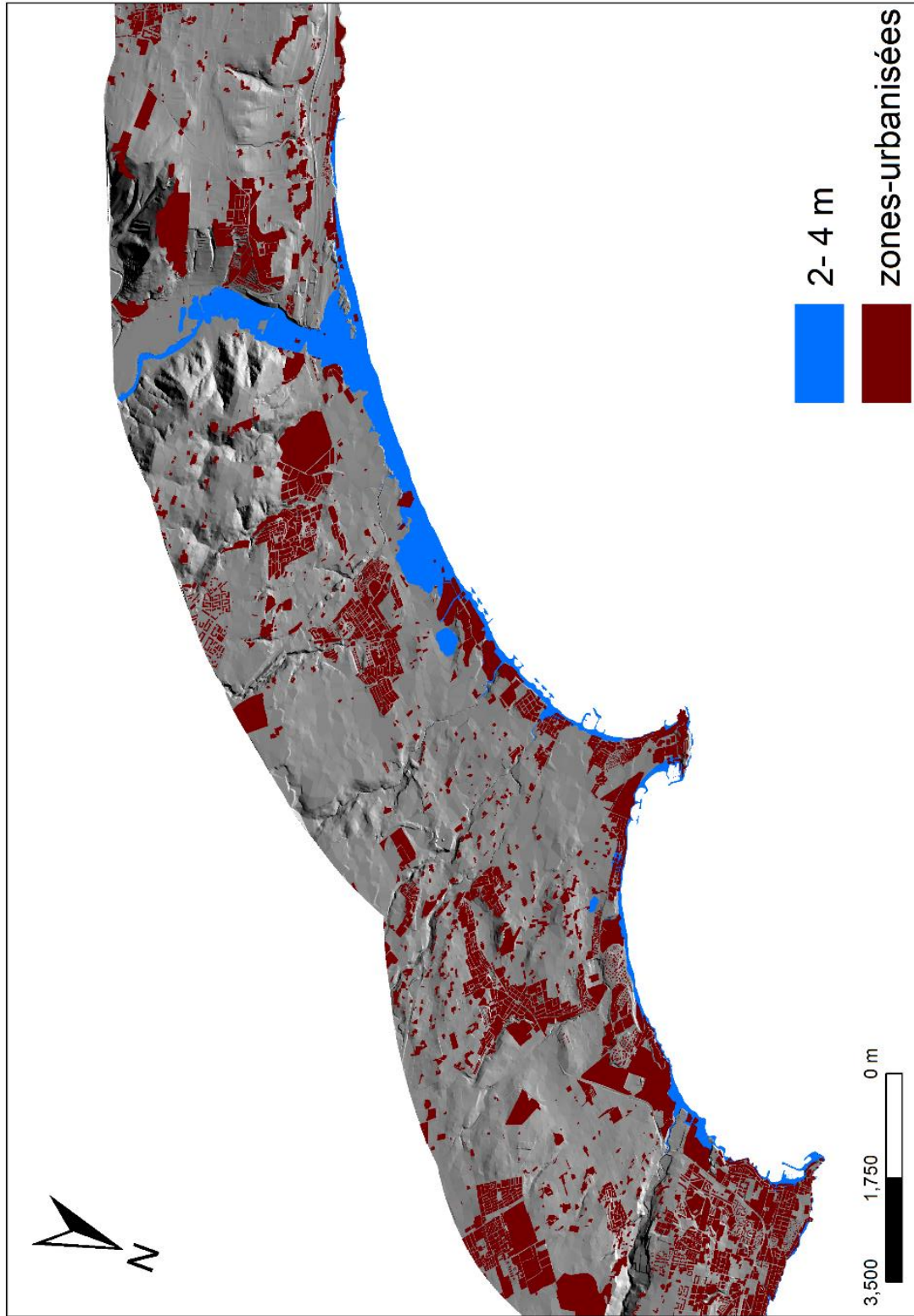
# Annexe



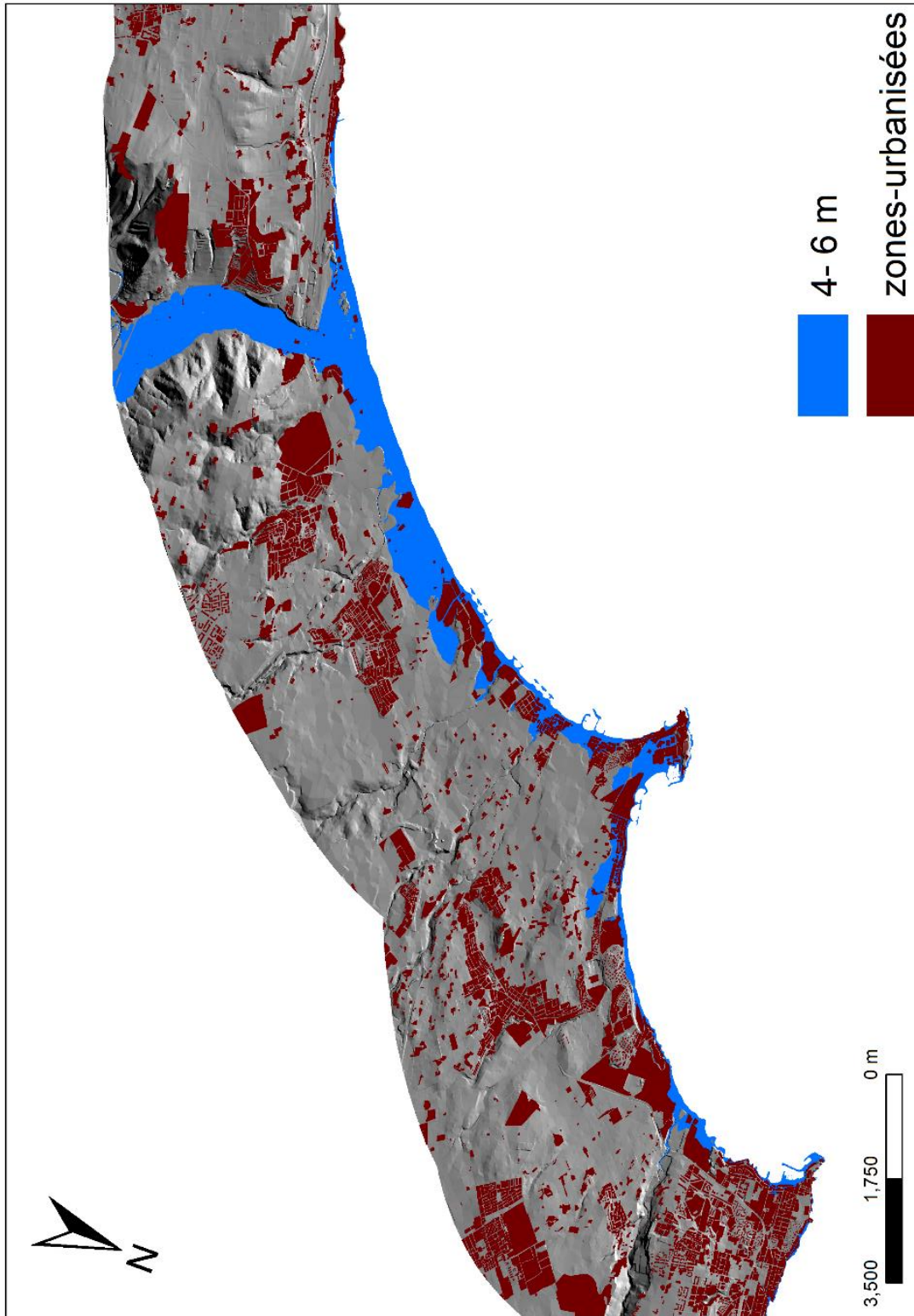
**Annexe II.1** Les zones inondables par un niveau de submersion 1 m pour la baie de Bou Ismail.



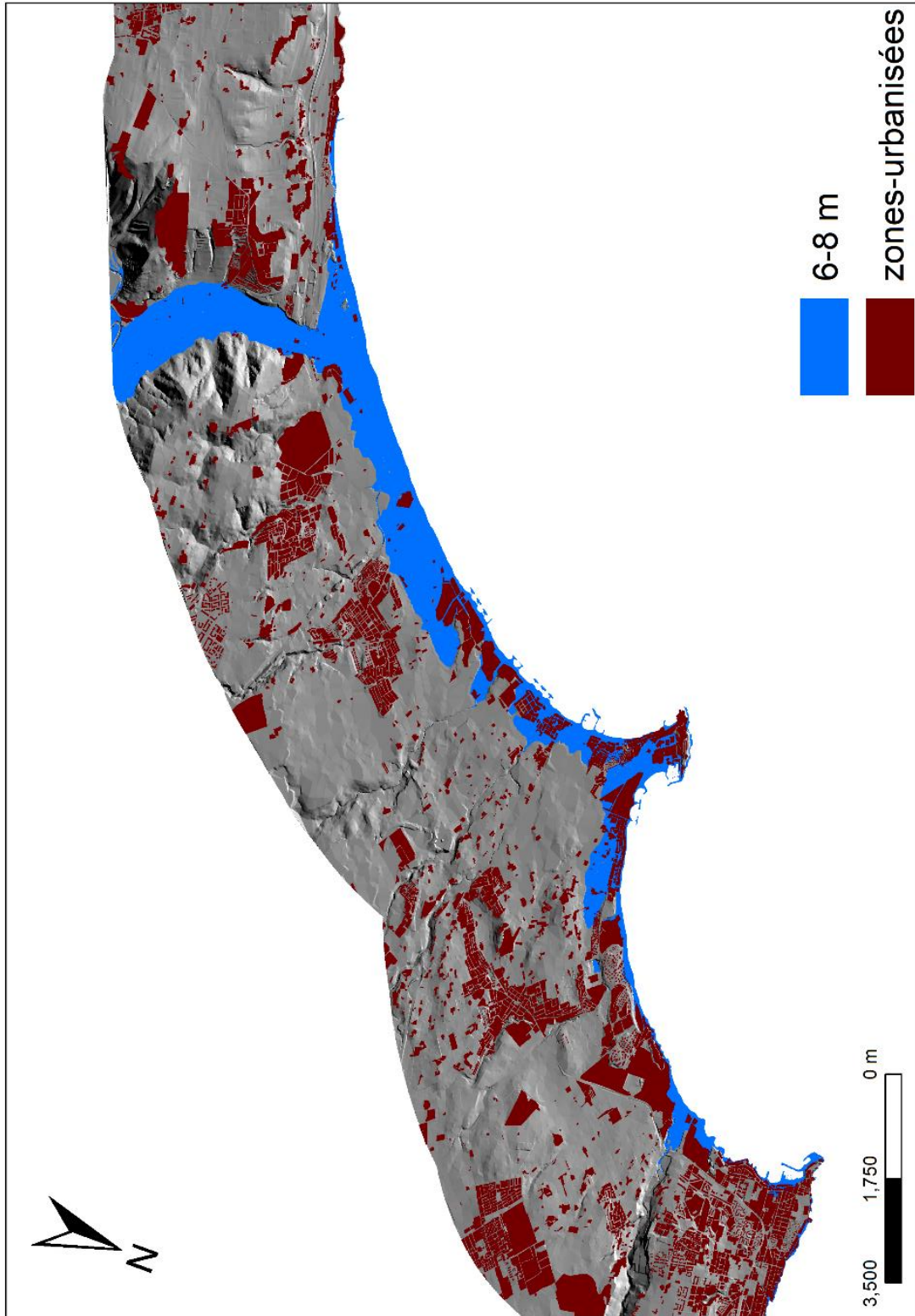
Annexe II.2 Les zones inondables par un niveau de submersion 1-2 m pour la baie de Bou Ismail.



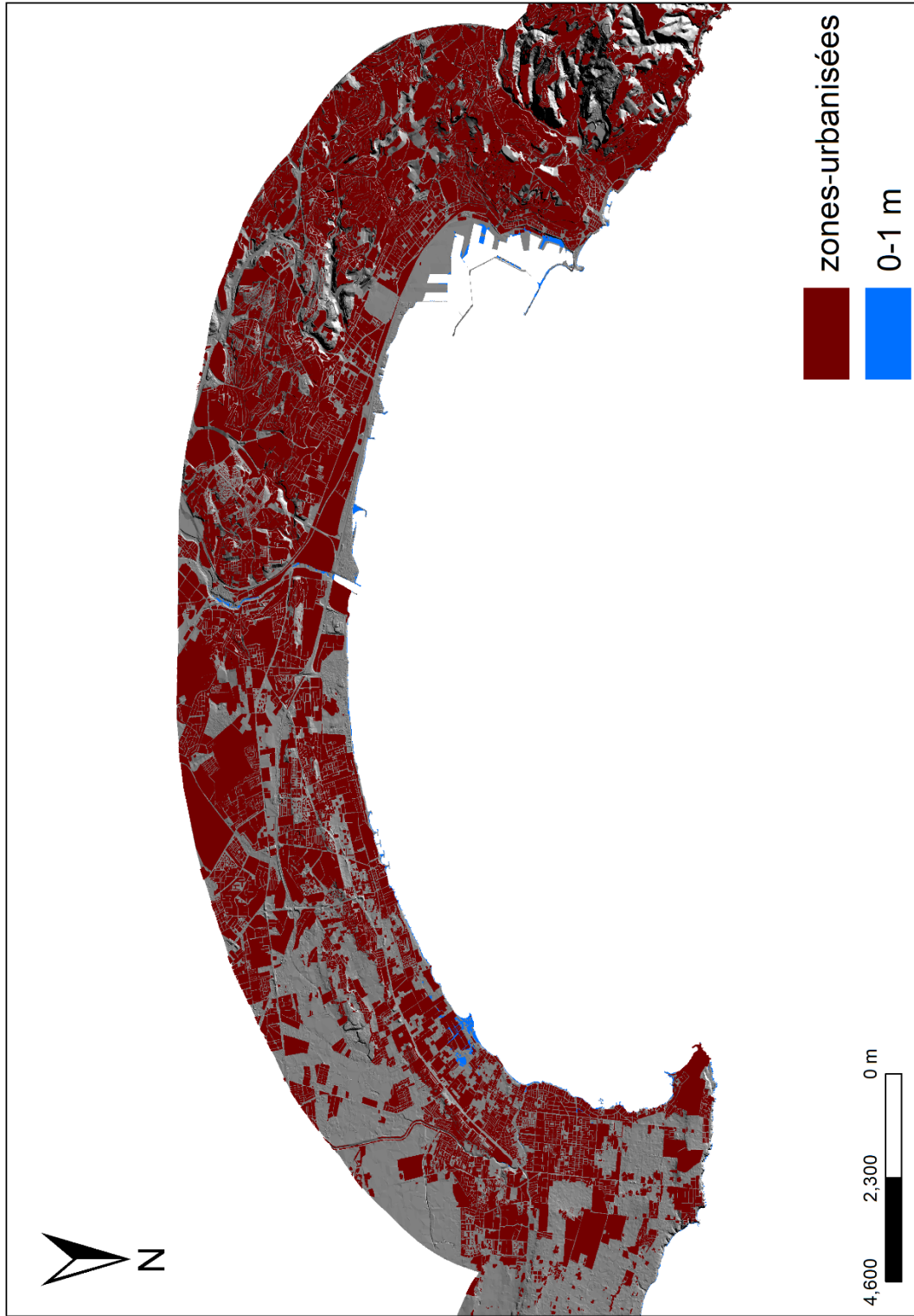
**Annexe II.3** Les zones inondables par un niveau de submersion de 2-4 m pour la baie de Bou Ismail.



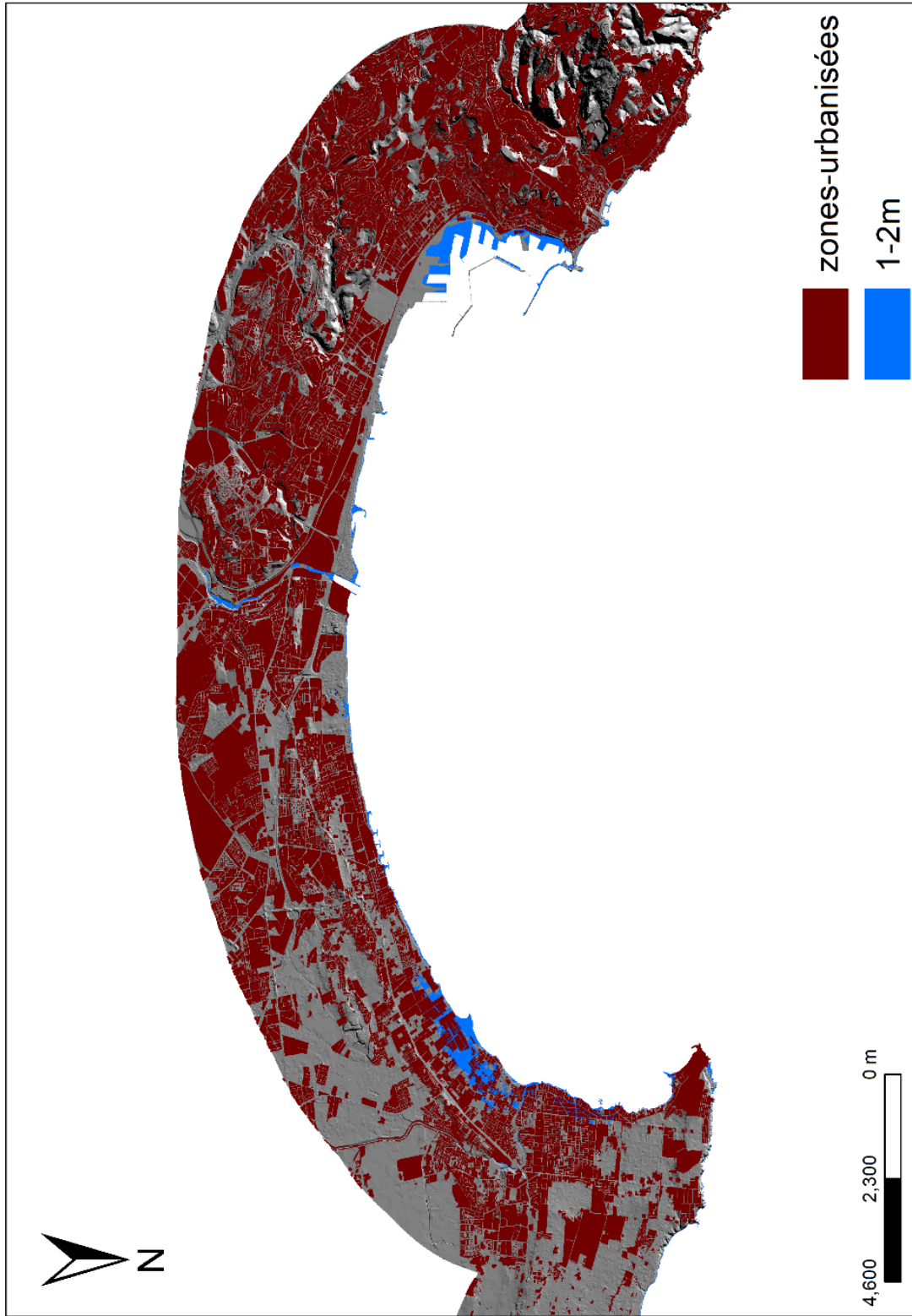
**Annexe II.4** Les zones inondables par un niveau de submersion de 4-6 m pour la baie de Bou Ismail



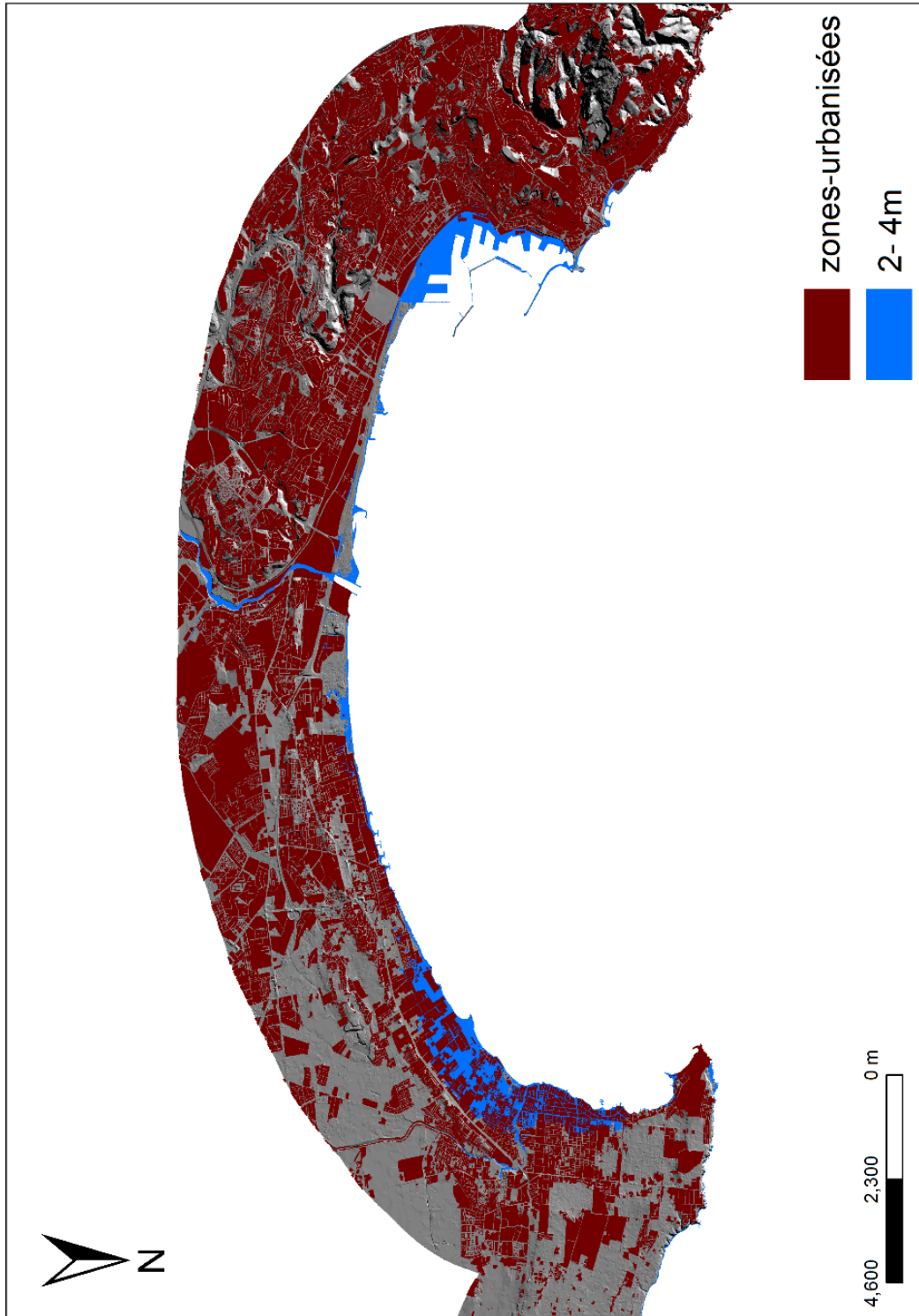
Annexe II.5 Les zones inondables par un niveau de submersion de 6-8 m pour la baie de Bou Ismail



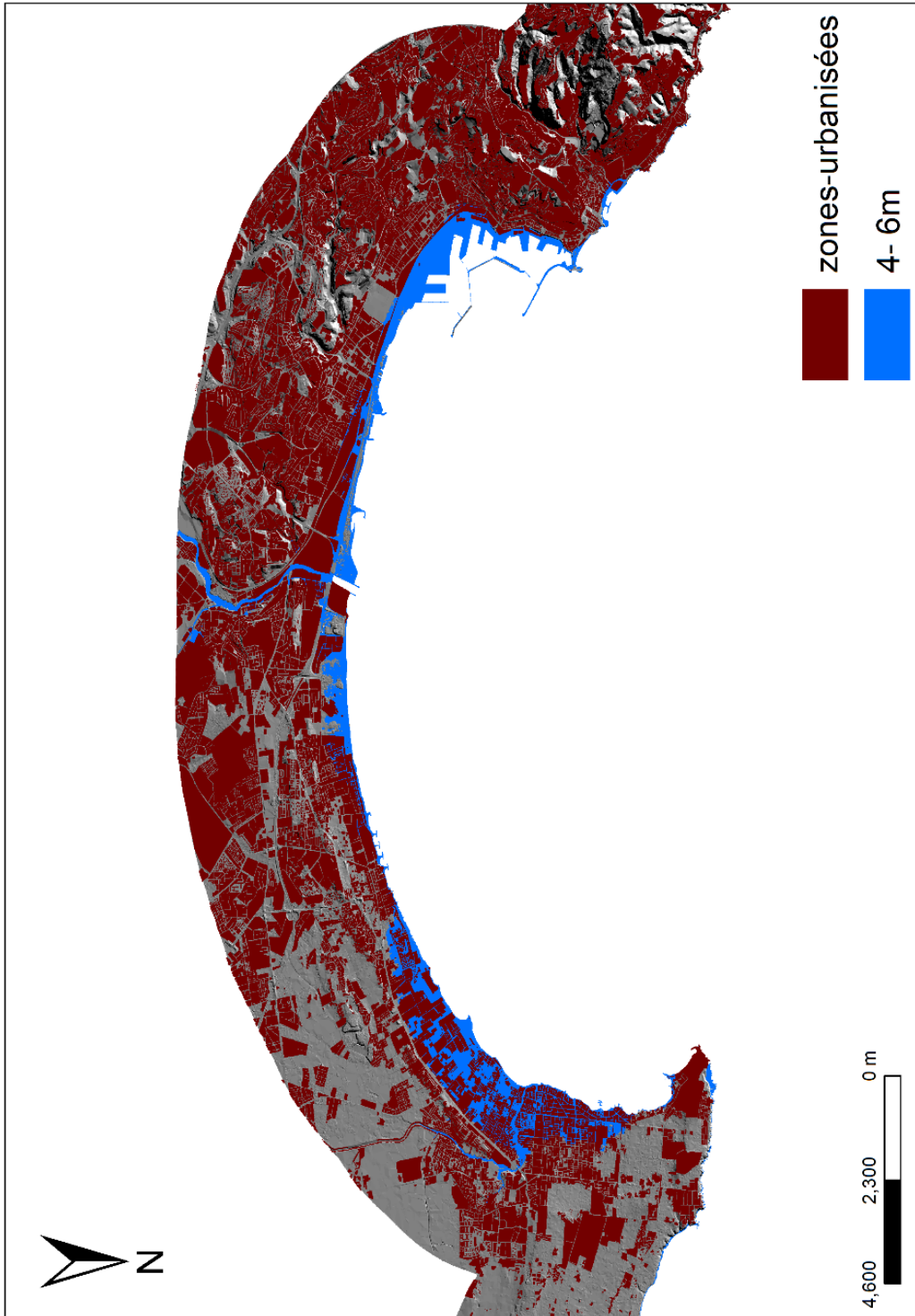
**Annexe II.6** Les zones inondables par un niveau de submersion de 0-1 m pour la baie d'Alger



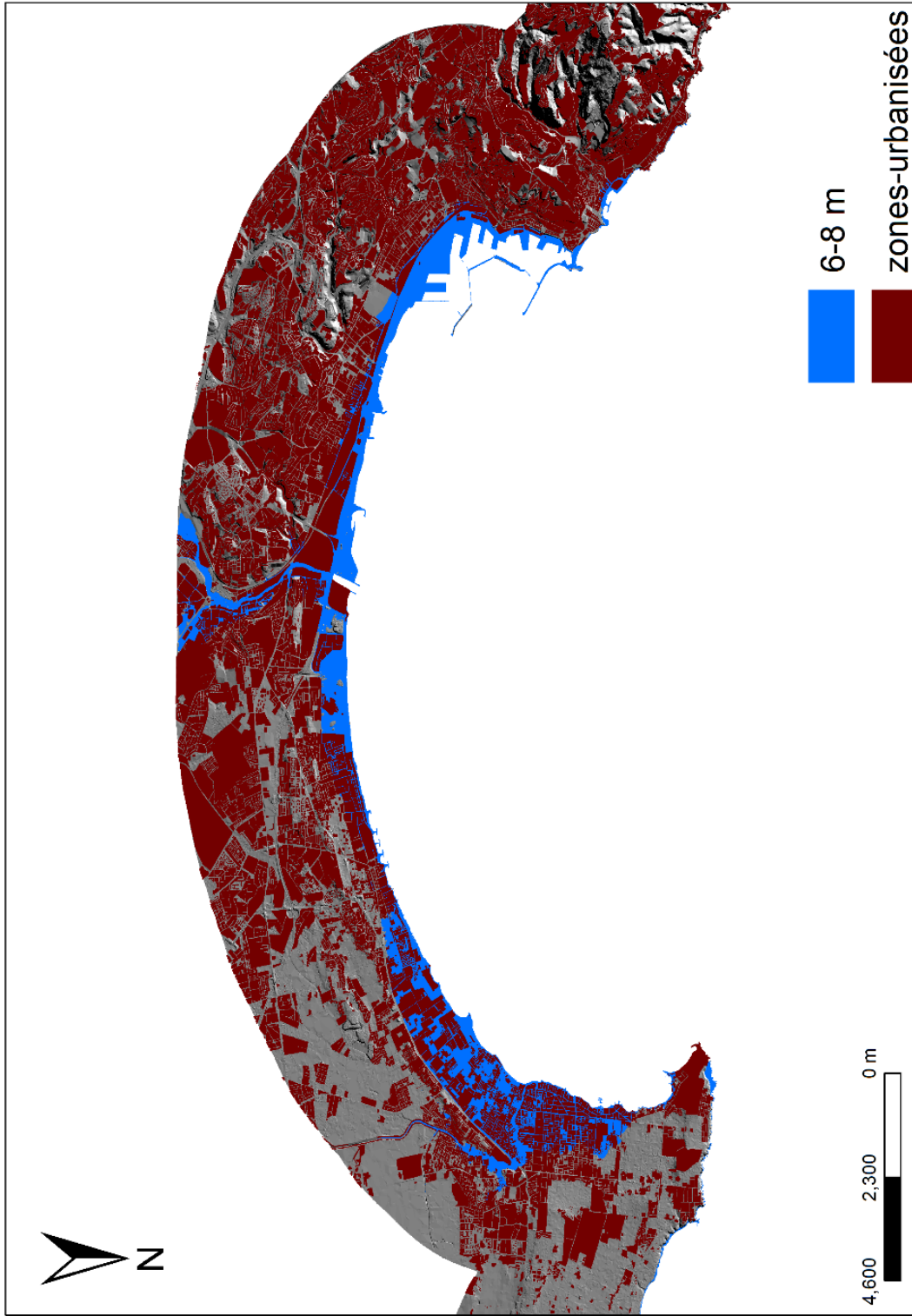
Annexe II.7 Les zones inondables par un niveau de submersion de 1-2 m pour la baie d'Alger.



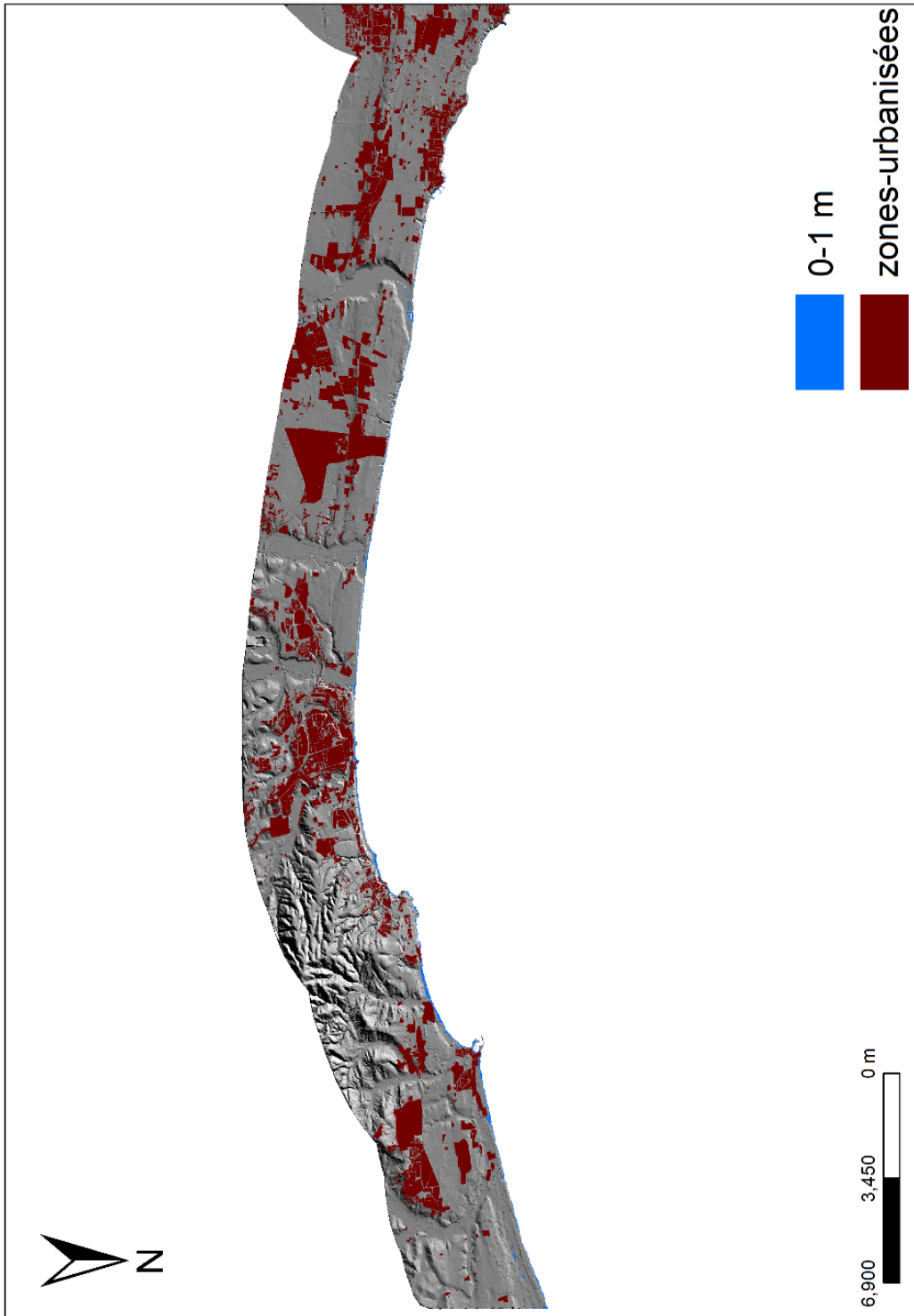
**Annexe II.8** Les zones inondables par un niveau de submersion de 2-4 m pour la baie d'Alger



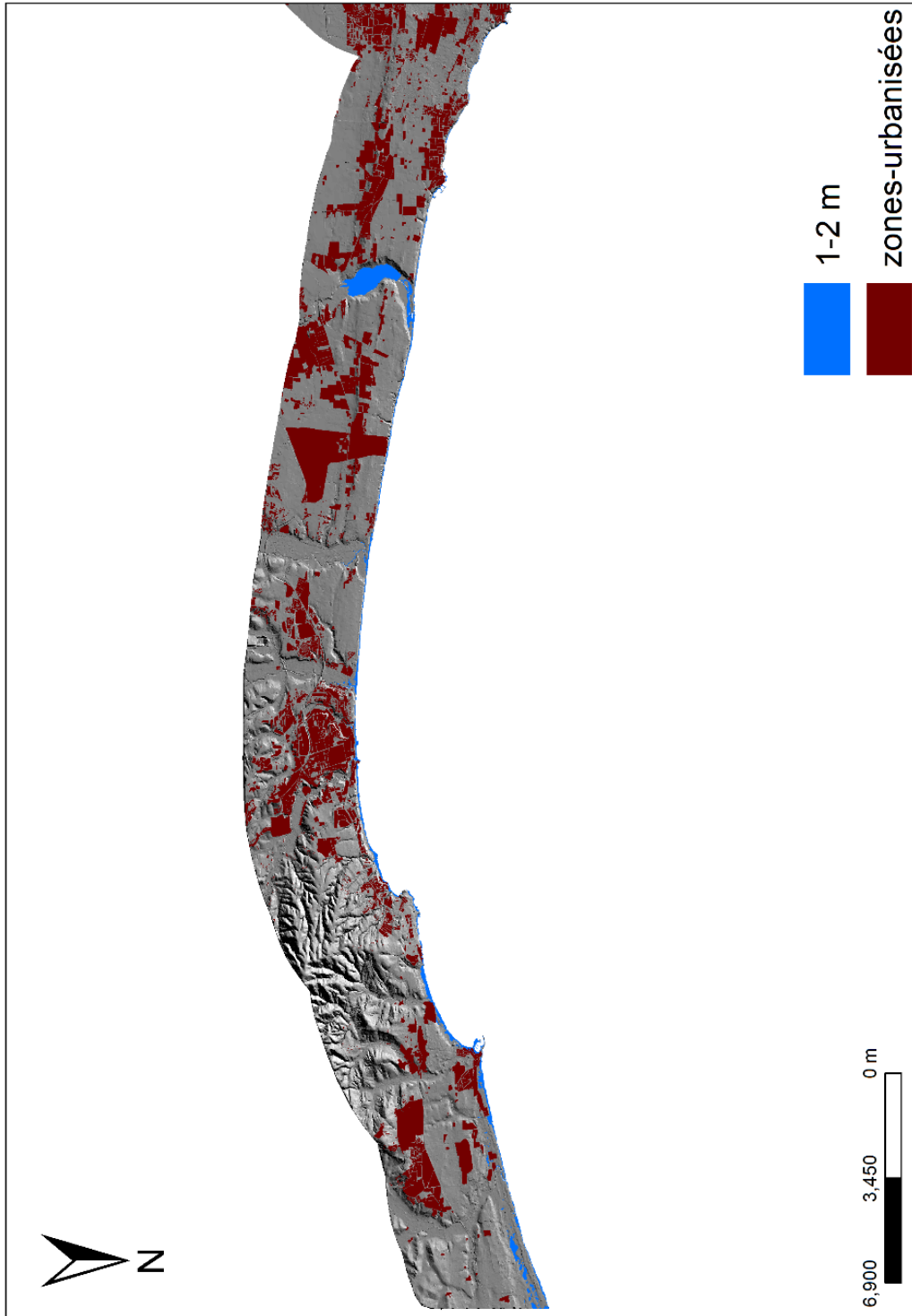
**Annexe II.9** Les zones inondables par un niveau de submersion de 4-6 m pour la baie d'Alger.



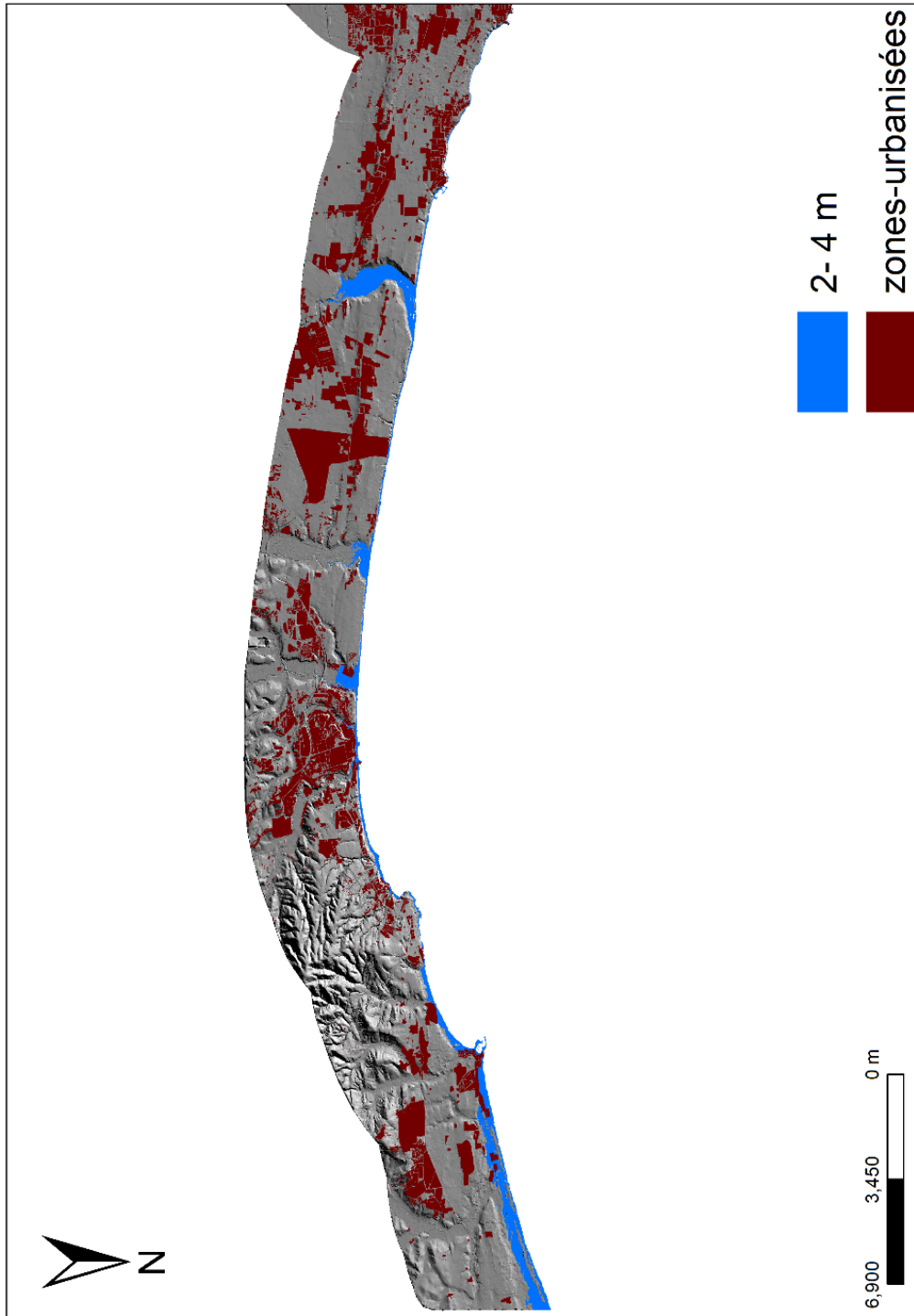
Annexe II.10 Les zones inondables par un niveau de submersion de 6-8 m pour la baie d'Alger.



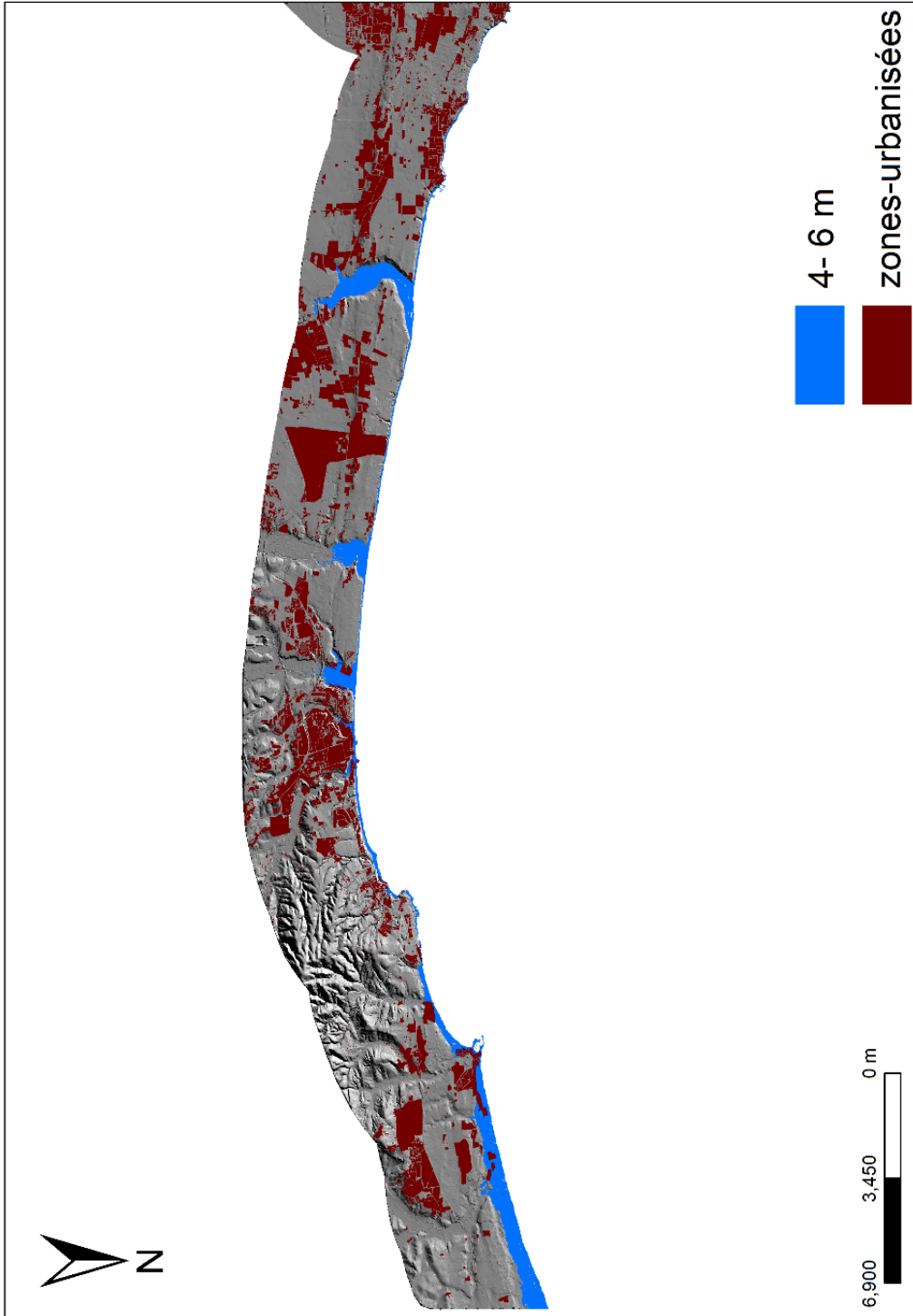
**Annexe II.11** Les zones inondables par un niveau de submersion de 0-1 m pour la baie de Zemmourir



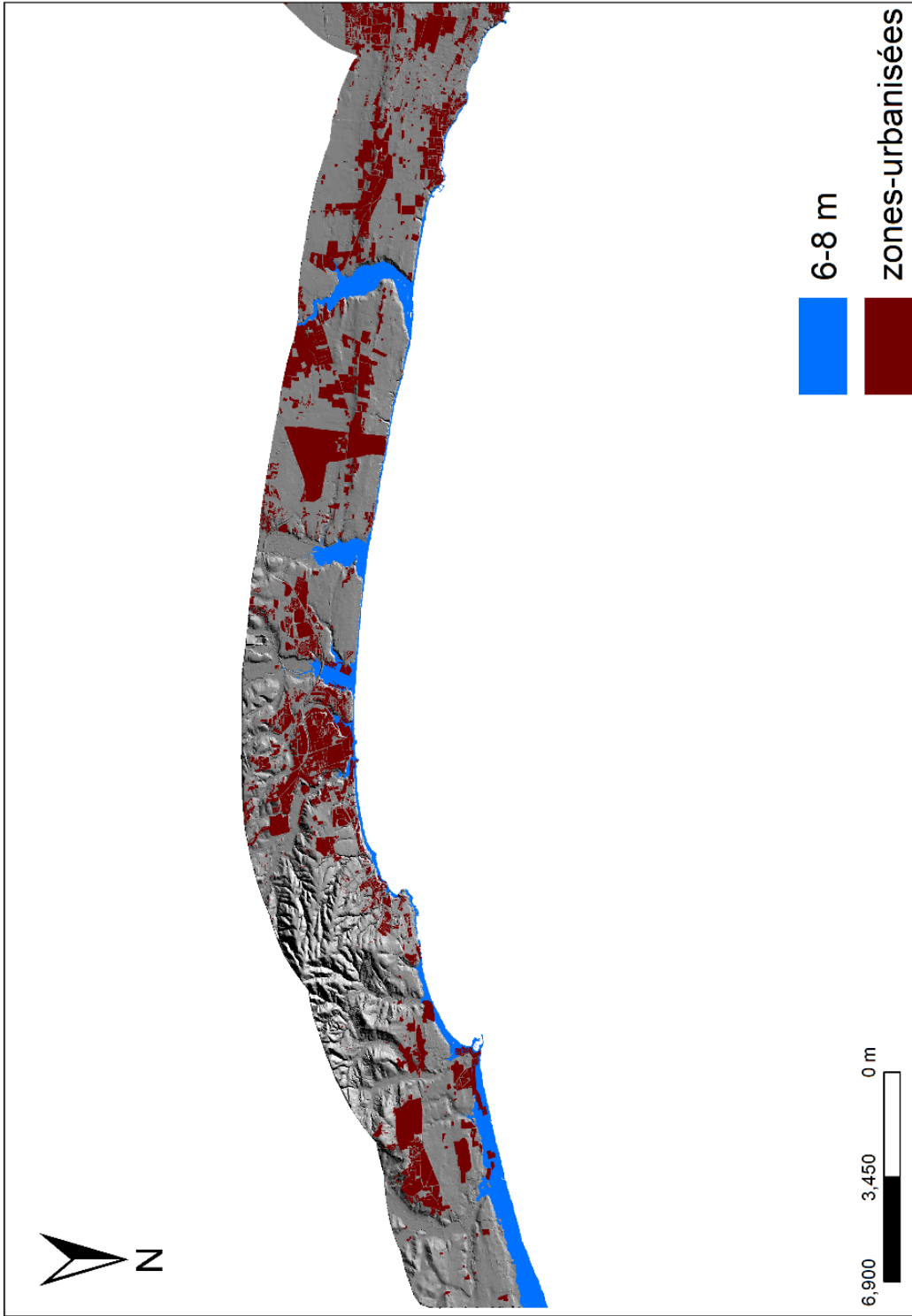
**Annexe II.12** Les zones inondables par un niveau de submersion de 1-2 m pour la baie de Zemmouri.



**Annexe II.13** Les zones inondables par un niveau de submersion de 2-4 m pour la baie de Zemmouri.



**Annexe II.14** Les zones inondables par un niveau de submersion de 4-6 m pour la baie de Zemmourri.



**Annexe II.15** Les zones inondables par un niveau de submersion de 6-8 m pour la baie de Zemmourir.

## **Annexe I**

## **Résumé :**

La zone côtière algéroise est densément peuplée et a connu une croissance urbaine, des infrastructures et des activités humaines (tourisme, agriculture, pêche...), qui sont menacées par l'érosion et les catastrophes naturelles. Ces menaces ont rendu le littoral Algérois de plus en plus vulnérable. Les principaux objectifs de la thèse étaient d'analyser les changements spatio-temporels qualitatifs et quantitatifs du littoral d'Alger, d'identifier les principaux facteurs contrôlant l'évolution du littoral Algérois et d'évaluer les zones les plus exposées aux risques côtiers à l'horizon 2030/2100. Ce travail a été largement basé sur l'utilisation de données satellitaires libres de 1984 à 2021 et de méthodes statistiques pour développer une banque de données spatiales rentable pour la surveillance du littoral Algérois.

L'analyse de l'évolution du trait de côte a montré des tendances contrastées, à la fois dans l'espace et dans le temps. En effet, les résultats à long terme montrent que la baie de Bou Ismail a une tendance stable avec un taux moyen de changement égal à 0,35 m/an ; la baie d'Alger a une tendance à l'accrétion avec un taux moyen de 1,24 m/an, Par contre, la baie de Zemmouri a connu des résultats très distincts entre ses différentes sections ; les parties ouest et centre ont une tendance stable avec un taux moyen de 0,44 m/an et -0,01 m/an, respectivement. Alors que dans la partie orientale on observe un très fort recul, avec un taux de recul de de -4,98 m/an. D'après l'analyse à court terme, les résultats montrent un schéma cyclique d'érosion-crétion le long du littoral de la zone d'étude. Ces résultats montrent également que l'effet d'érosion dû à la tempête de 2007 a été extrêmement important. Ainsi, la côte après cet événement est la plus dégradée. L'étude des changements morphosédimentaires a été accompagnée d'une analyse des données de vent, de houle et de courant, dans le but d'expliquer le rôle de ces forçages dans l'évolution du trait de côte. L'analyse des résultats a montré que l'évolution du littoral algérois est contrôlé à la fois par des processus naturels et des activités anthropiques.

La cartographie de l'aléa submersion marine à l'horizon 2030/2050, prenant en compte le scénario d'élévation du niveau de la mer lié au changement climatique et le scénario lié aux événements météorologiques extrêmes a clairement mis en évidence les zones les plus vulnérables à l'inondation marine.

**Mots-clés :** Evolution du trait de côte, Submersion marine, Risques côtiers, Hydro-sédimentaire, La côte Algéroise.

## **Abstract:**

The Algiers coastal area is densely populated and has experienced urban growth, infrastructure and human activities (tourism, agriculture, fishing, etc.), which are threatened by erosion and natural disasters.

These threats have made the Algerian coastline increasingly vulnerable. The main objectives of the thesis were to analyze the qualitative and quantitative spatio-temporal variations of the coast of Algiers, to identify the main factors controlling the evolution of

the Algerian coast and to evaluate the most exposed areas to coastal risks to the horizons 2030/2100. This work was largely based on the use of free satellite data from 1984 to 2021 and statistical methods to develop a cost-effective spatial database for monitoring the Algerian coastline.

The analysis of the evolution of the coastline showed contrasting trends, both in space and in time. Indeed, long-term results show that Bou Ismail Bay has a stable trend with an average rate of change equal to 0.35 m/year; the Bay of Algiers has a tendency towards accretion with an average rate of 1.24 m/year.

On the other hand, Zemmouri Bay experienced very distinct results between its different sections; the western and central parts have a stable trend with an average rate of 0.44 m/year and -0.01 m/year, respectively. While in the eastern part we observe a very strong decline, with a decline rate of -4.98 m/year.

Based on the short-term analysis, the results show a cyclical erosion-creation pattern along the coastline of the study area. These results also show that the erosion effect due to the 2007 storm was extremely significant. Thus, the coast after this event is the most degraded.

The study of morphosedimentary changes was accompanied by an analysis of wind, swell and current data, with the aim of explaining the role of these forcings in the evolution of the coastline. The analysis of the results showed that the evolution of the Algerian coastline is controlled by both natural processes and anthropogenic activities.

The mapping of the marine submersion hazard by 2030/2050, taking into account the sea level rise scenario linked to climate change and the scenario linked to extreme weather events, has clearly highlighted the most vulnerable areas to marine flooding.

**Keywords:** shoreline evolution, marine submersion, coastal risks, hydro-sedimentary, the Algerian coast.

## المخلص

تميز المنطقة الساحلية بالجزائر العاصمة بكثافة سكانية وشهدت نموًا عمرانيًا وبنية تحتية وأنشطة بشرية (السياحة والزراعة وصيد الأسماك وغيرها)، وهي مهددة بالتآكل والكوارث الطبيعية.

وقد جعلت هذه التهديدات الساحل الجزائري عرضة للخطر بشكل متزايد. وكانت الأهداف الرئيسية للأطروحة هي تحليل التغيرات النوعية والكمية المكانية والزمانية لساحل الجزائر العاصمة، وتحديد العوامل الرئيسية المتحكمة في تطور الساحل الجزائري وتقييم المناطق الأكثر تعرضًا للمخاطر الساحلية لآفاق 2030 / 2100. واعتمد هذا العمل إلى حد كبير على استخدام بيانات الأقمار الصناعية المجانية من عام 1984 إلى عام 2021 والأساليب الإحصائية لتطوير قاعدة بيانات مكانية فعالة من حيث التكلفة لمراقبة الساحل الجزائري.

أظهر تحليل تطور الخط الساحلي اتجاهات متناقضة، سواء في المكان أو في الزمان. في الواقع، تظهر النتائج طويلة المدى أن خليج بو إسماعيل لديه اتجاه مستقر بمتوسط معدل تغير يساوي 0.35 م/سنة؛ يميل خليج الجزائر نحو التراكم بمعدل متوسط قدره 1.24 م/3 السنة.

ومن ناحية أخرى، شهد خليج الزموري نتائج مميزة للغاية بين أقسامه المختلفة؛ الأجزاء الغربية والوسطى لديها اتجاه مستقر بمتوسط معدل 0.44 م/سنة و-0.01 م/سنة على التوالي. بينما في الجزء الشرقي نلاحظ تراجعاً قوياً جداً، حيث بلغ معدل الانخفاض -4.98 م/سنة.

استناداً إلى التحليل قصير المدى، أظهرت النتائج وجود نمط دوري من التآكل على طول الخط الساحلي لمنطقة الدراسة. تظهر هذه النتائج أيضاً أن تأثير التآكل الناجم عن عاصفة عام 2007 كان كبيراً للغاية. وبالتالي فإن الساحل بعد هذا الحدث هو الأكثر تدهوراً.

وقد رافقت دراسة التغيرات الرسوبية المورفولوجية تحليل بيانات الرياح والأمواج والتيارات الحالية، بهدف شرح دور هذه التأثيرات في تطور الخط الساحلي. أظهر تحليل النتائج أن تطور الساحل الجزائري يتم التحكم فيه من خلال العمليات الطبيعية والأنشطة البشرية.

**الكلمات المفتاحية:** تطور الخط الساحلي، الغمر البحري، المخاطر الساحلية، المائبة الرسوبية، الساحل الجزائري.