

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 وتهيئة الساحل

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



**THESE DE DOCTORAT D-LMD**

**DOMAINE : SCIENCES DE LA TERRE ET DE L'UNIVERS**

**FILIERE : GEOGRAPHIE ET AMENAGEMENT DU TERRITOIRE**

**SPECIALITE : ENVIRONNEMENT MARIN ET LITTORAL**

**Utilisation de la géomatique pour l'étude des risques côtiers  
dans la zone centre Algérienne (littoral de Cherchell)**

**Préparé par :**

**M<sup>me</sup> AMARNI Nadia**

**Soutenu le 03/04/2021 devant la commission de jury :**

<b>Mr BOULAHIDID Mostefa</b>	<b>Professeur</b>	<b>(ENSSMAL)</b>	<b>Président</b>
<b>Mr BELKESSA Rabah</b>	<b>Professeur</b>	<b>(ENSSMAL)</b>	<b>Promoteur</b>
<b>Mr GUERFI Mokhtar</b>	<b>Professeur</b>	<b>(USTHB)</b>	<b>Examineur</b>
<b>Mr MEZOUAR Khoudir</b>	<b>Maitre conférences A</b>	<b>(ENSSMAL)</b>	<b>Examineur</b>
<b>Mr SETTI Mhamed</b>	<b>Professeur</b>	<b>(USTHB)</b>	<b>Examineur</b>

**Promotion : 2014**

## **Remerciements**

Tout d'abord, je remercie Dieu, le tout puissant de m'avoir donné la santé, le courage, la force et surtout la volonté pour réaliser cette étude.

J'exprime ma profonde gratitude et j'adresse mes remerciements les plus sincères au professeur BELKESSA Rabah pour m'avoir guidé, pour sa patience et sa disponibilité dans la réalisation de ce travail, et surtout de m'avoir bénéficiée de son savoir et de son expérience professionnelle. La pertinence de son thème proposé m'a attiré dès le départ et m'a poussée à travailler sans relâche le long de toutes ces années.

Je remercie aussi le responsable de la formation doctorale le professeur BOULAHIDID Mostefa d'avoir accepté de m'honorer en présidant le jury de ma thèse.

Je remercie aussi Mr MEZOUAR Khoudir, Maître de conférences d'avoir accepté d'examiner ce travail de thèse.

Je tiens à remercier le professeur GUERFI Mokhtar, d'avoir accepté d'examiner ce manuscrit.

Je remercie aussi le professeur SETTI Mhamed d'avoir accepté d'examiner ce travail de thèse.

Je remercie Mr FERNANE Lounes qui m'a énormément aidée dans la réalisation de ce travail de thèse.

Je remercie tous les membres de la direction générale de la protection civile et les membres de la subdivision de la protection civile de la wilaya de Tipaza de m'avoir mis à ma disposition la donnée nécessaire à la réalisation de ce travail de thèse, je n'oublierai jamais la complicité de Mr NECHAB et M<sup>me</sup> BRADAI.

Je remercie aussi le personnel de l'ANRH, CRAAG, CGS, MAT, MTP et DTP de la wilaya de Tipaza qui m'ont permis de collecter les données nécessaires pour l'accomplissement de cette étude, et particulièrement M<sup>me</sup> SADOU, M<sup>me</sup> DJEHA, Mr CHERIETE, Mr DJEHA, Mr MAOUCHE, Mr AIADI et M<sup>me</sup> HOUDA.

Je remercie aussi M<sup>me</sup> LOUNAS, M<sup>me</sup> SALEM EL CHERIF, M<sup>elle</sup> ABAD, Mr OTMANI, M<sup>elle</sup> KIRAGELLE, Mr BOUGHERIRA et Mr NAILI qui m'ont toujours aidée malgré leurs nombreuses préoccupations.

Je remercie l'ensemble de personnalités de la bibliothèque de l'ENSSMAL et notamment Mr Cherif.

Enfin, je présente mes reconnaissances et mon estime à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail de thèse.

## *Dédicace*

*Je dédie ce travail à,*

*A mes très chers parents, qui m'ont toujours soutenue et accompagnée à chaque étape de ma vie, et sont toujours la source de mon inspiration, je leur dois tout...*

*A mon mari, qui m'a toujours soutenue et qui été compréhensif et patient pendant toute ces années. Merci encore.*

*A mes très chers enfants « Sérine et Syfax », la source de ma force qui mon toujours poussés à donner encore plus, merci mes enfants.*

*A mes chers frères et sœurs qui mon toujours assurée le soutien moral ; Akila, Hemidouche, Amar, Sarah, Lila et Mouhend.*

*A la mémoire de ma grand-mère qui n'est plus de ce monde et qui est présente toujours dans mes plus beaux souvenirs, qu'elle repose en paix.*

*A mes cousines*

*A mes tantes et oncles*

*A ma belle mere et mon beau père*

*A mes beaux-frères et belles sœurs*

*A mes copines qui mon toujours soutenue, Ryhane et Nacira.*

*Merci particulièrement à vous qui êtes entrain de lire ce travail de thèse en ce moment.*

*Nadia*

## Résumé

Situé au Sud de la Méditerranée occidentale, dans la région centre-algérienne, le littoral de Cherchell a participé au fil du temps au développement économique de la région (agriculture et tourisme balnéaire). Durant ces dernières décennies, le littoral a subi plusieurs contraintes dues aux interventions humaines, telles que la construction du barrage Boukerdene dans le bassin versant de la région (piège les sédiments et les eaux descendant des piémonts), l'extraction abusive de sable des plages et celui des lits d'oueds, ainsi l'exploitation abusive de l'aquifère de Cherchell. Ce qui rend ce littoral très vulnérable aux aléas géologiques. Ce travail de thèse a pour but d'étudier les Géo-risques côtiers, sous l'angle de la géomatique, du littoral de Cherchell, parmi lesquels on cite : l'érosion côtière, les inondations marines et l'intrusion marine, afin de pouvoir effectuer une carte de vulnérabilité côtière de la zone d'étude. Dans le cadre de cette thèse, des sites pilotes ont été choisis, selon leur importance : économique, sociale, culturelle et naturelle.

L'évolution historique de la ligne du rivage, sur une échelle mi-séculaire, permet de constater que l'érosion est plus importante à l'Est qu'à l'Ouest. Pour bien comprendre les phénomènes à l'origine de l'érosion de la plage Hamdania, une étude complémentaire sur le fonctionnement hydro-sédimentaire a été menée. Par la suite un scénario tendanciel a été projeté sur les 50 prochaines années, afin d'avoir une idée sur le devenir de ces plages. L'érosion qui touche le littoral de Cherchell est plus importante que l'accumulation, la récession est presque trois fois plus importante que l'accrétion.

La simulation des inondations marines est basée sur les données de houles de tempêtes extrêmes annuelles, décennales, cinquantennales et centennales. Les résultats auxquels nous sommes parvenus indiquent que là plus part des zones inondées se fait avec des houles de tempêtes annuelles, ce qui s'explique par la topographie basse des plages (Hamdania et Bella) et des plaines des oueds (El Hachem et El Bellaa) près de la côte.

La cartographie de la vulnérabilité de l'aquifère côtier de Cherchell à l'intrusion marine, en se basant sur la méthodologie établie du modèle GALDIT destinée aux aquifères côtiers, témoigne d'une vulnérabilité faible à modérée en amont et une vulnérabilité élevée en aval de l'aquifère. Cette vulnérabilité élevée peut atteindre 800 m à l'intérieur des terres perpendiculairement à la ligne de rivage, elle est due principalement au déséquilibre hydrologique causé par la construction du barrage Boukerdene, qui réduit les apports d'eau superficielle.

La cartographie de la vulnérabilité côtière face aux risques d'érosion et de submersion de la côte de Cherchell permet de faire ressortir les zones à risque de la côte. En ce qui concerne la vulnérabilité physique, un tiers (33%) du littoral de Cherchell est vulnérable, étant constitué essentiellement de zones d'accumulations sableuses, par contre la vulnérabilité socio-économique, près de la moitié (48%) du littoral de Cherchell est vulnérable, caractérisée par des zones à fortes occupations humaines.

## Mots clés

Géomatique, risques côtiers, cinématique côtière, fonctionnement hydro-sédimentaire, inondation marine, intrusion marine, vulnérabilité physique et socio-économique, Méditerranée occidentale, région centre-algérienne, Cherchell, Hamdania.

## **Abstract**

Located south of the western Mediterranean, in the central Algerian region, Cherchell coastline has participated over time in the economic development of the region (agriculture and seaside tourism). During the last decades this coastline has suffered several threats due to human interventions such as the construction of the Boukerdene dam in the region's watershed (trapping sediments and water coming down from the foothills), the abusive extraction of sand from beaches and from the wadi bed in order to satisfy the construction demand, as well as the exploitation of the aquifer. This makes the coastline more vulnerable to accelerated sea level rise. The goal of this thesis work is to use geomatics for the study of coastal hazards in Cherchell coastline, such as coastal kinematics, marine flooding due to extreme storm swells, marine intrusion, and the coastal vulnerability index. Using aerial photos, satellite images, digital terrain models combined with geographic information systems (GIS).

The historical evolution of the shoreline, allows to have a real observation on the evolution of the beaches studied (Hamdania, Tizirine and the Center beach). In order to fully understand the phenomena at the origin of the erosion of Hamdania beach, a study of the hydro-sedimentary functioning was carried out to identify the presence of a back current in the region. A trend scenario has been projected over the next 50 years, in order to get an idea of the future of these beaches. For a period of 58 years. The erosion affecting the Cherchell shoreline is greater than the accumulation, the recession is almost three times greater than the accretion.

The assessment of land to be lost due to flood risk is based on annual, decadal, five-year and centennial extreme storm swell data. The results we have reached indicate that most of the flooded land is with annual storm swells, which is explained by the low topography of the beaches (Hamdania and Bella) and the wadi plains (El Hachem and El Bellaa) near the coast.

The mapping of the vulnerability of the Cherchell Coastal Aquifer to marine intrusion, based on the established methodology of the GALDIT model for coastal aquifers, shows low to moderate vulnerability upstream and high vulnerability downstream. This high vulnerability can reach 800 m inland perpendicular to the shoreline. This vulnerability is mainly due to the hydrological imbalance caused by the construction of the Boukerdene Dam, which reduces surface water inflows.

The assessment of the physical and socio-economic vulnerability of the Cherchell coast and sea level rise provides a snapshot of the state of vulnerability of the coast. In terms of physical vulnerability, one third (33%) of Cherchell coastline is vulnerable to sea level rise, consisting mainly of areas of sand accumulation. This is explained by the presence of densely populated urban areas with developed road networks, with an important heritage and cultural heritage.

## **Keywords**

Geomatics, coastal risk, coastal kinematics, hydro-sedimentary functioning, marine flooding, marine intrusion, physical and socio-economic vulnerability. western Mediterranean, central Algerian region, Cherchell, Hamdania.

## ملخص

تقع جنوب غرب البحر الأبيض المتوسط ، في منطقة وسط الجزائر ، شارك ساحل شرشال بمرور الوقت في التنمية الاقتصادية للمنطقة (الزراعة والسياحة الساحلية). خلال العقود الماضية ، تعرض الساحل لعدة قيود بسبب التدخلات البشرية ، مثل بناء سد بوكردين في متجمعات المياه في المنطقة (مصائد الرواسب والمياه المنحدرة من سفوح التلال) ، والاستخراج المفرط للرمال من الشواطئ وتلك من قيعان الوديان ، وبالتالي الاستغلال التعسفي لطبقة المياه الجوفية في شرشال. هذا يجعل هذا الخط الساحلي شديد التأثر بالمخاطر الجيولوجية. تهدف هذه الأطروحة إلى دراسة المخاطر الجغرافية الساحلية ، من زاوية الجيوماتكس ، لساحل شرشال ، ومن بينها: تآكل السواحل ، والفيضانات البحرية ، والتدخل البحري ، حتى يتمكن من رسم خريطة الضعف الساحلية لمنطقة الدراسة. في إطار هذه الأطروحة تم اختيار مواقع تجريبية حسب أهميتها الاقتصادية، الاجتماعية، الثقافية والطبيعية.

يظهر التطور التاريخي لخط الشاطئ ، على نطاق شبه علماني ، أن التآكل أكثر أهمية في الشرق منه في الغرب. لفهم ظاهرة تآكل شاطئ حمدانية بشكل كامل ، تم إجراء دراسة تكميلية عن الأداء المائي الرسوبي. بعد ذلك ، تم توقع سيناريو الاتجاه على مدى السنوات الخمسين القادمة ، من أجل الحصول على فكرة عن مصير هذه الشواطئ. التآكل الذي يؤثر على ساحل شرشال أكبر من التراكم ، والركود أكبر بثلاث مرات تقريباً من التراكم.

تعتمد محاكاة الفيضانات البحرية على بيانات سنوية وعشرية وخمسين سنة و 100 عام عن تضخم العواصف الشديدة. تشير النتائج التي توصلنا إليها إلى أن معظم المناطق التي غمرتها السيول تشهد هبوب عواصف سنوية ، وهو ما يفسره انخفاض تضاريس الشواطئ (الحمدانية والبلاغ) وسهول الوديان (الهاسم والبلاغ) بالقرب من الساحل. يُظهر رسم خرائط قابلية تعرض طبقة المياه الجوفية الساحلية في شرشال للتدخل البحري ، استناداً إلى المنهجية المعمول بها (GALDIT) لطبقات المياه الجوفية الساحلية ، تأثير ضعيف إلى متوسط الضعف في أعلى المنبع وقابلية عالية للتأثر قرب الشاطئ. يمكن أن تصل هذه الهشاشة الشديدة إلى بعد 800 عمودياً على خط الشاطئ . ويرجع ذلك أساساً إلى اختلال التوازن الهيدرولوجي الناجم عن بناء سد بوكردين ، مما يقلل من تدفق المياه السطحية.

رسم خرائط الضعف الساحلي لمخاطر التعرية والغرق في ساحل شرشال يجعل من الممكن تسليط الضوء على المناطق المعرضة لهذه المخاطر. فيما يتعلق بالضعف المادي ، فإن ثلث (33%) ساحل شرشال معرض للخطر ، وتتكون بشكل رئيسي من مناطق تراكم رملي ، ومن ناحية الضعف الاجتماعي والاقتصادي ، ما يقرب من نصف (48%) ساحل شرشال معرض للخطر ، وتتميز بمناطق ذات كثافة بشرية عالية.

## الكلمات الدالة

الجيوماتكس ، المخاطر الساحلية ، حركيات السواحل ، الأداء المائي والرسوبي ، الفيضانات البحرية ، التدخل البحري ، غرب البحر الأبيض المتوسط ، منطقة وسط الجزائر ، شرشال ، الحمدانية.

## Table des matières

<b>Introduction générale.....</b>	<b>22</b>
<b>Partie I : Cadre conceptuel.....</b>	<b>28</b>
<b>Chapitre 1 : Synthèse bibliographique.....</b>	<b>28</b>
Introduction.....	29
1. Définition de la géomatique.....	30
2. Définition des risques.....	31
3. Expression d'un risque côtier.....	32
3.1. Nature des risques côtiers.....	33
3.1.1. Risques sociétaux côtiers.....	33
3.1.2. Risques écosystémiques côtiers.....	33
3.2. Les aléas en milieux côtiers.....	33
3.2.1. Les aléas d'expression physique.....	33
3.2.2. Les aléas d'expression anthropique.....	34
3.3. La vulnérabilité côtière.....	34
3.4. Grille de lecture des risques côtiers.....	35
4. La démarche géomatique dans l'étude des risques côtiers.....	36
4.1. Exemples de risques côtiers étudiés sous l'angle de la géomatique.....	39
4.1.1. Etude de risque d'érosion côtière sous l'angle de la géomatique.....	39
4.1.2. Etude de la vulnérabilité côtière sous l'angle de la géomatique.....	39
4.1.3. Etude de risque de submersion marine sous l'angle de la géomatique.....	40
4.1.4. Etude de risque d'intrusion marine sous l'angle de la géomatique.....	40
4.1.5. Simulation de fonctionnement hydro-sédimentaire sous l'angle de la géomatique.....	40
5. Traitement des photos aériennes et des images satellitaires de Google earth sous l'angle de la géomatique.....	41
5.1. Histoire de la photographie aérienne et sources d'erreurs.....	41
5.1.1. Rectifications externes.....	42
5.1.2. Rectifications internes (correction de l'image).....	42
6. Principe de fonctionnement du système GPS.....	43
Conclusion.....	43

<b>Chapitre 2 : Généralités sur la zone d'étude.....</b>	<b>45</b>
Introduction .....	46
1. Cadre administratif et géographique .....	46
2. Cadre géologique.....	47
2.1. Géologie de la région de Tipaza.....	47
2.2. Géologie locale de Cherchell .....	48
2.2.1. Les formations d'âge quaternaire .....	49
2.2.1.1. L'Actuel .....	49
2.2.1.2. L'Holocène.....	49
2.2.1.3. Le Pléistocène .....	49
a) Les formations dunaires consolidées (terrasses marines).....	50
b) Les alluvions anciennes.....	51
2.2.2. Formations d'âge tertiaire .....	51
2.2.2.1. Le Néogène .....	51
a) Le Pliocène Supérieur / Aastien .....	51
b) Le Pliocène inférieur / Plaisancien.....	51
c) Le Miocène Moyen .....	51
2.2.2.2. Le Paléogène .....	51
a) L'Oligocène.....	51
2.2.3. Formations d'âge secondaire.....	52
2.2.3.1. Le Crétacé Supérieur .....	52
2.2.3.2. Le Crétacé Inférieur .....	52
2.2.3.3. Le Trias .....	52
2.2.4. Les formations d'âge primaire .....	52
2.2.4.1. Le Permien .....	52
2.2.4.2. Le Dévonien .....	52
2.2.4.3. L'Ordovicien .....	52
2.3. Sismo-tectonique de la région de Tipaza et ses environs.....	52
2.3.1. Les failles .....	52
a) Faille de Chenoua (Tipaza) .....	53
b) Faille de Menacer .....	53
c) Faille du Sahel.....	53
d) Faille de la Mitidja Sud (Blida).....	54
e) Faille de Kheir Eddine.....	54

2.3.2. La Sismicité.....	54
2.3.2.1. Sismicité historique .....	55
2.3.2.2. Sismicité instrumentale .....	56
a) Séismes d’El Asnam de 1954 et 1980 .....	56
b) Séisme du Mont Chenoua du 29 octobre 1989 .....	56
2.3.3. Sismicité offshore de l’Ouest de l’Algérois .....	56
3. Cadre géomorphologique et topographique .....	57
3.1. Le système montagneux .....	57
3.2. Plaines côtières .....	58
3.3. La côte .....	59
3.3.1. Les falaises .....	60
a) Les falaises entaillées dans des roches dures .....	60
b) Les falaises entaillées dans des roches tendres .....	60
c) Les côtes rocheuses .....	61
3.3.2. Les plages .....	61
4. Cadre Hydro climatologique .....	62
4.1. Le climat.....	62
4.1.1. Les précipitations .....	62
4.1.2. Les températures .....	64
4.2. Hydrologie.....	64
4.2.1. Oued El Hachem .....	64
4.2.2. Oued El Bellaa .....	66
4.3. Hydrogéologie.....	67
5. Cadre hydrodynamique, morpo dynamiques et sédimentologique .....	70
5.1. Hydrodynamisme côtier .....	70
5.1.1. La marée.....	70
5.1.1.1. Marée barométrique .....	70
5.1.1.2. Marée astronomique.....	70
5.1.2. Les vents.....	70
5.1.3. La houle.....	72
5.1.4. Les courants.....	73
5.1.4.1. Le courant méditerranéen.....	73
5.1.4.2. Le courant Algérien.....	73
5.1.4.3. Le courant de dérive littorale .....	74

5.1.4.4. Le courant côtier de retour .....	74
5.2. Cadre morpho dynamique .....	75
5.2.1. Les petits fonds.....	75
5.2.2. Le plateau continental .....	76
5.3. Cadre sédimentologique .....	78
5.3.1. La fraction fine .....	78
5.3.2. La fraction grossière.....	79
Conclusion.....	80
Conclusion de la première partie.....	81
<b>Parti II : Cinématique du trait de côte et fonctionnement hydro-sédimentaire.....</b>	<b>82</b>
<b>Chapitre 1 : Evolution mi- séculaire des plages du rivage de Cherchell et leurs</b>	
<b>devenirs.....</b>	<b>82</b>
Introduction .....	83
1. Données et méthodes.....	83
1.1. Méthodologie adopté pour l'étude de la cinématique côtière .....	83
1.1.1. Sources d'erreurs.....	84
1.1.2. L'outil DSAS.....	85
1.2. Données utilisées pour l'étude de la variation spatio-temporelle du trait de côte.....	87
1.2.1. Photos aériennes .....	87
1.2.2. Images satellitaires .....	88
2. Résultats .....	88
2.1. Évolution de la plage Hamdania entre 1959 et 2017.....	88
2.2. Évolution de la plage Tizirine entre 1980 et 2017 .....	92
2.3. Évolution de la plage Centre entre 1980 et 2017 .....	95
2.4. Évolution des surfaces des plages entre 1959 et 2017 .....	98
2.5. Évolution future des plages entre 2017 et 2067 .....	98
3. Discussion .....	99
Conclusion.....	101
<b>Chapitre 2 : Fonctionnement hydro sédimentaire du littoral Est de Cherchell.....</b>	<b>103</b>
Introduction.....	104
1. Approche méthodologique.....	104
1.1. Paramètres d'entrées.....	105

1.1.1. Le modèle de propagation des houles du large vers la côte MIKE21-Sw .....	105
1.1.2. Le modèle hydrodynamique MIKE21-HD .....	107
1.1.3. Le Modèle de transport des sédiments non cohésifs MIKE21-ST.....	107
1.2. Configuration du modèle.....	107
2. Résultats .....	109
2.1. Simulation des houles de large vers la côte.....	109
2.1.1. Houle de 45°NE .....	109
2.1.2. Houle 360°N.....	110
2.1.3. Houle 315°NW .....	110
2.1.4. Houle 270°W .....	111
2.2. Simulation des courants générés par les houles et les vents.....	111
2.2.1. Houle 45°NE .....	111
2.2.2. Houle 360°N.....	112
2.2.3. Houle 315°NW .....	113
2.2.4. Houle 270°W .....	113
2.3. Simulation des transits sédimentaires sous l'effet de houle et de courant .....	114
2.3.1. Houle 45°NE .....	114
2.3.2. Houle 360°N.....	114
2.3.3. Houle 315°NW .....	115
2.3.4. Houle 270°W.....	115
3. Discussion.....	116
Conclusion.....	117
<b>Partie III : Submersion et intrusion marine.....</b>	<b>119</b>
<b>Chapitre 1 : Inondations marines dues aux niveaux marins extrêmes.....</b>	<b>119</b>
Introduction .....	120
1. Impacts des inondations marines sur les zones côtières.....	121
2. Données et méthodes.....	121
2.1. Méthodologie .....	121
2.2. Scénarios utilisés .....	122
2.3. Détermination et représentation du risque d'inondation aux infrastructures .....	126
3. Résultats .....	126
3.1. Niveaux d'inondation.....	126
3.2. Analyse de risques liés aux infrastructures .....	128

4. Discussion .....	131
Conclusion.....	132

**Chapitre 2 : Intrusion marine dans l'aquifère côtier de Cherchell à l'aide de la méthode GALDIT.....134**

Introduction .....	135
1. Aperçu sur la vulnérabilité à l'intrusion marine des aquifères côtiers .....	136
2. Données et méthodes.....	136
2.1.    Methodologie .....	136
2.1.1. Paramètre G (type d'aquifère ; Groundwater occurrence).....	137
2.1.2. Paramètre A (conductivité hydraulique ; Aquifer hydraulic conductivity).....	137
2.1.3. Paramètre L (profondeur de l'aquifère au-dessus de niveau de la mer ; Depth to groundwater level above sea).....	138
2.1.4. Paramètre D (distance de la mer ; Distance from the shore).....	138
2.1.5. Paramètre I (impact de l'existence d'une intrusion marine ; Impact on existing status of sea water intrusion).....	138
2.1.6. Paramètre T (Épaisseur de l'aquifère ; Thickness of the aquifer).....	139
2.2.    Caractéristiques des paramètres .....	139
2.2.1. Poids de l'indicateur .....	139
2.2.2. Taux d'importance .....	139
2.2.3. La pondération.....	139
2.3.    Critère de décision.....	140
3. Résultats .....	141
3.1.    Type d'aquifère (G).....	141
3.2.    Conductivité hydraulique (A).....	142
3.3.    Profondeur de l'aquifère au-dessus de niveau de la mer (L).....	143
3.4.    Distance de la mer (D) .....	145
3.5.    Impact de l'intrusion marine (I) .....	146
3.6.    Épaisseur de l'aquifère (T).....	148
3.7.    Calcul de l'indice GALDIT pour l'aquifère de Cherchell .....	149
3.7.1. Zones à vulnérabilité élevée .....	149
3.7.2. Zone à vulnérabilité modérée .....	149
3.7.3. Zone à vulnérabilité faible.....	149
4. Discussion .....	150

Conclusion.....	151
<b>Partie IV : Vulnérabilité côtière.....</b>	<b>153</b>
<b>Chapitre 1 : Évaluation de la vulnérabilité physique et socio-économique de la côte de Cherchell face aux risques d'érosion et de submersion.....</b>	<b>153</b>
Introduction .....	154
1. Données et méthodes.....	155
1.1. Indice de vulnérabilité physique .....	155
1.1.1. Méthodologie .....	155
1.1.2. Constitution de la base de données .....	157
1.1.2.1. Variables géologiques .....	157
a) Variable géomorphologie.....	158
b) Variable pente côtière.....	159
c) Variable érosion/accrétion de la ligne du rivage .....	160
1.1.2.2. Variables de forçage de la mer .....	161
a) Variable remontée relative de niveau de la mer .....	161
b) Hauteur significative des vagues à la côte (Hs) .....	162
c) Variable amplitude moyenne de la marée .....	165
1.2. Indice de vulnérabilité socio-économique.....	166
1.2.1. Méthodologie .....	166
1.2.2. Constitution de la base de données .....	167
a) Variables agglomérations .....	167
b) Variable réseau routier et chemin de fer .....	167
c) Variable occupation de sol .....	167
d) Variable patrimoine culturel.....	169
e) Variable statut de protection .....	170
2. Résultats .....	171
2.1. Indice de vulnérabilité physique .....	171
2.1.1. Aspects biophysiques .....	171
2.1.1.1. Variable géomorphologique .....	172
2.1.1.2. Variable pente côtière.....	173
2.1.1.3. Variable taux d'érosion/accrétions des rives.....	175
2.1.1.4. Taux d'élévation du niveau de la mer .....	176
2.1.1.5. Hauteurs significatives des vagues.....	177

2.1.1.6. La marée .....	178
2.1.2. Indice de vulnérabilité physique de la côte de Cherchell.....	179
2.2. Vulnérabilité socio économique.....	181
2.2.1. Variables socio-économiques.....	181
2.2.1.1. Agglomérations .....	182
2.2.1.2. Réseau routier.....	183
2.2.1.3. Chemin de fer .....	184
2.2.1.4. Occupation des sols .....	185
2.2.1.5. Héritage culturel .....	186
2.2.1.6. Statut de protection.....	187
2.2.2. Indice de vulnérabilité socio-économique IVCsocio-éco .....	188
3. Discussion .....	189
Conclusion.....	192
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>194</b>
Perspective d'avenir .....	196
<b>Références bibliographiques.....</b>	<b>198</b>
<b>Annexes.....</b>	<b>212</b>

## Liste des figures

Figure 1 : Schéma illustrant les sources de déformation des photos aériennes.....	42
Figure 2: Localisation géographique et découpage administrative de la commune de Cherchell. ....	47
Figure 3 : Géologie de la région de Tipaza et ces environ extraite de la carte géologique de l'Algérie (1/50000) feuille N° 39 modifié [Flandrin et Claracq, 1952].....	48
Figure 4 : Géologie de la région de Cherchell et ces environ, extraite de la carte géologique de Dahra oriental (1/50000) feuille N° 39 modifié [Flandrin et Claracq, 1952]. ....	49
Figure 5 : Lithologie de la région de Cherchell extraite de la carte géologique de Dahra oriental feuille N°39 modifiée [Flandrin et Claracq, 1952]. ....	50
Figure 6 : Tectonique de la région du Tipaza : la sismicité entre 1970 et 2003 ainsi les grandes failles de la zone [CGS, 2009]. ....	53
Figure 7 : Séismes majeurs de l'Algérie du Nord entre 1365 et 2003 [CGS, 2011].....	55
Figure 8 : Reliefs dominants de la région de Cherchell. ....	58
Figure 9 : Plaine côtière entre Gouraya et Oued El Hachem. ....	59
Figure 10 : Falaise dure de Cap Blanc [PAC, 2016 in DGPC, 2017]. ....	60
Figure 11 : Falaise tendre de Cap Rouge [PAC, 2016 in DGPC, 2017]. ....	61
Figure 12 : Côte rocheuse de Cherchell [PAC, 2016 in DGPC, 2017]. ....	61
Figure 13 : Plages (à gauche Hamdania ; à droite Bellaa) [PAC, 2016 in DGPC, 2017]. ....	62
Figure 14 : Variation des précipitations annuelles au cours de la période 200-2015 dans la région centre de la wilaya de Tipaza [ANRH, 2015 in Mohamed et Bensmaili, 2016]..	63
Figure 15 : Pluviométrie (moyenne annuelle) de la région d'étude [ANRH, 2015 in Mohamed et Bensmaili, 2016].....	63
Figure 16 : Températures (maximales, minimales et moyennes) dans la région de Cherchell [ANRH, 2015 in Mohamed et Bensmaili, 2016]. ....	64
Figure 17 : Emboucheurs d'oueds El Hachem [PAC, 2016 in DGPC, 2017].....	65
Figure 18 : Emboucheurs d'oueds El Bellaa [PAC, 2016 in DGPC, 2017]. ....	66
Figure 19 : Principaux plans d'eau de la région de Cherchell. ....	66
Figure 20 : Localisation de barrage Boukerdene et l'aquifère de Cherchell dans le sous bassin versant d'oued El Hachem. ....	68
Figure 21 : Coupe géophysique dans la partie avale confiné de l'aquifère de Cherchell [Maamar, 2004]. ....	69
Figure 22 : Rose trimestrielle et annuelle des vents au large de la région de Cherchell [https://rp5.ru/]. ....	71

Figure 23 : Rose des houles au large de la région de Cherchell [SSMO in <i>LEM</i> , 2016].	72
Figure 24 : Rose des houles à la côte de la région de Cherchell [SSMO in <i>LEM</i> , 2016].	73
Figure 25 : Circulation générale de surface dans la mer Méditerranée d'après [Arnone et al., 1990; Taupier et Millot, 1988].	74
Figure 26 : Bathymétrie des petits fonds de la région Est de Cherchell [ <i>LEM</i> , 2016].	76
Figure 27 : Bathymétrie des petits fonds de la région Est de Cherchell en 3D.	76
Figure 28 : Bathymétrie des grands fonds de la région de Cherchell [Leclaire, 1972].	77
Figure 29 : Profil de plateau continental dans la région de Cherchell [Leclaire, 1972].	77
Figure 30 : Répartition spatiale de la fraction fine dans la région Est de Cherchell (< 50 $\mu\text{m}$ ) [ <i>LEM</i> , 2016].	78
Figure 31 : Répartition spatiale de la fraction fine dans la région Ouest de Cherchell (< 50 $\mu\text{m}$ ) [in <i>LEM</i> , 2016].	79
Figure 32 : Répartition spatiale des médianes granulométriques dans la région Est de Cherchell [ <i>LEM</i> , 2016].	79
Figure 33 : Répartition spatiale des médianes granulométriques dans la région Ouest de Cherchell [ <i>LEM</i> , 2016].	80
Figure 34 : Photos aériennes de 1980 couvrant les plages ; Hamdania, Tizirine et Centre. ....	87
Figure 35 : Images satellitaires de 2009 couvrant les plages ; Hamdania, Tizirine et Centre.	88
Figure 36 : Évolution de la ligne de rivage de la plage Hamdania entre 1959 et 2017 selon la direction des transects. ....	89
Figure 37 : Variation de trait de côte de la plage Hamdania à une échelle mi- séculaire. ....	89
Figure 38 : Taux net d'évolution de trait de côte de la plage Hamdania sur une période de 58 ans.	90
Figure 39 : Différentes classes d'évolution du trait de côte de la plage Hamdania entre 1959 et 2017.	91
Figure 40 : Corrélation entre la direction des transects et le taux net d'évolution de la plage Hamdania entre 1959 et 2017.	92
Figure 41 : Évolution de la ligne de rivage de la plage Tizirine entre 1980 et 2017 selon la direction des transects. ....	92
Figure 42 : Variation de trait de côte de la plage Tizirine à une échelle mi- séculaire. ....	93
Figure 43 : Taux net d'évolution de trait de côte de la plage Tizirine sur une période de 37 ans.	93
Figure 44 : Différentes classes d'évolution de trait de côte de la plage Tizirine entre 1980 et 2017.	94

Figure 45 : Corrélation entre la direction des transects et le taux net d'évolution de la plage Tizirine entre 1980 et 2017. ....	95
Figure 46 : Évolution de la ligne de rivage de la plage Centre entre 1980 et 2017 selon la direction des transects. ....	95
Figure 47 : Variation de trait de côte de la plage Centre à une échelle mi- séculaire. ....	96
Figure 48 : Taux net d'évolution de trait de côte de la plage Centre sur une échelle de 37 ans. ....	96
Figure 49 : Stabilité de rivage de la plage Centre entre 1980 et 2017. ....	97
Figure 50 : Corrélation entre la direction des transects et le taux net d'évolution de la plage Centre entre 1980 et 2017. ....	97
Figure 51 : Évolution des superficies des plages Hamdania et Tizirine le long de la période d'étude et leurs devenir dans les 50 prochaines années (2017 à 2067). ....	99
Figure 52 : Évolution des largeurs des plages Hamdania et Tizirine le long de la période d'étude et leurs devenir dans les 50 prochaines années (2017 à 2067). ....	99
Figure 53 : Pourcentages des surfaces, accrétés, stables et érodés, des trois plages étudiées. ....	100
Figure 54 : Bathymétrie de la région Est de Cherchell [LEM, 2016]. ....	106
Figure 55 : Maillage triangulaire serré (mesh) de la région Est de Cherchell généré par le module Mike 0. ....	108
Figure 56 : Plan de propagation de la houle de direction 45°NE, Hs=2,5 m, T= 8s. ....	109
Figure 57 : Plan de propagation de la houle de direction 360°N, Hs=3 m, T= 8s. ....	110
Figure 58 : Plan de propagation de la houle de direction 315°NW, Hs=3 m, T= 8s. ....	110
Figure 59 : Plan de propagation de la houle de direction 270°W, Hs=3,5 m, T= 8s. ....	111
Figure 60 : Simulation des courants générés par les houles de secteur 45°NE. ....	112
Figure 61 : Simulation des courants générés par les houles de secteur 360°N. ....	112
Figure 62 : Simulation des courants générés par les houles de secteur 315°NW. ....	113
Figure 63 : Simulation des courants générés par les houles de secteur 270°W. ....	113
Figure 64 : Simulation du transport sédimentaire généré par la Houles 45°NE. ....	114
Figure 65 : Simulation du transport sédimentaire généré par la Houles 360°N. ....	115
Figure 66 : Simulation du transport sédimentaire généré par la Houles 315°NW. ....	115
Figure 67 : Simulation du transport sédimentaire généré par la Houles 270°W. ....	116
Figure 68 : Levé topographique de haute résolution réalisé à l'aide de GPS en mode RTK déterminant l'occupation de sol et la topographie de la région Est de Cherchell [LEM, 2016]. ....	124
Figure 69 : Topographie 3D de la région Est de Cherchell. ....	125

Figure 70 : Occupation des sols de la région Est de Cherchell. ....	125
Figure 71 : Localisation des terres inondées et leurs superficies associées pour les différentes périodes de retours des niveaux marins extrêmes pour la côte Est de Cherchell. ....	127
Figure 72 : Représentation 3D des terres inondables dans la région Est de Cherchell. ....	127
Figure 73 : Risque d'inondation décennale aux infrastructures dans la région de Bellaa. ....	129
Figure 74 : Risque d'inondation cinquantennale aux infrastructures dans la région de Bellaa. ....	130
Figure 75 : Risque d'inondation centennale aux infrastructures dans la région de Bella. ....	131
Figure 76 : Application de la méthode GALDIT à l'aquifère de Cherchell, représentation du paramètre, type d'aquifère (G). ....	141
Figure 77 : Application de la méthode GALDIT à l'aquifère de Cherchell, représentation du paramètre, conductivité hydraulique (A). ....	142
Figure 78 : Distribution des points de mesures (puits) et répartition piézométrique au-dessus de niveau de la mer sur l'aquifère de Cherchell. ....	143
Figure 79 : Application de la méthode GALDIT à l'aquifère de Cherchell, représentation du paramètre, profondeur de l'aquifère au-dessus de niveau de la mer (L). ....	144
Figure 80 : Application de la méthode GALDIT à l'aquifère de Cherchell, représentation du paramètre, distance perpendiculaire par rapport à la mer (D). ....	145
Figure 81 : Distribution des concentrations de Cl <sup>-</sup> sur l'aquifère de Cherchell. ....	146
Figure 82 : Profil de variation des concentrations de Cl <sup>-</sup> par rapport au rivage. ....	147
Figure 83 : Application de la méthode GALDIT à l'aquifère de Cherchell, représentation du paramètre, impact de présence d'une intrusion marine (I). ....	147
Figure 84 : Application de la méthode GALDIT à l'aquifère de Cherchell, représentation du paramètre, épaisseur de l'aquifère (T). ....	148
Figure 85 : Application de l'indice GALDIT à l'aquifère de Cherchell. ....	150
Figure 86 : Découpage du littoral de Cherchell en profils de longueurs identiques 500*500 m selon la méthode de [Hammar-Klose et Thieler, 2001]. ....	157
Figure 87 : Géomorphologie de la côte de Cherchell et ses environs. ....	158
Figure 88 : Topo-bathymétrie de Cherchell. ....	159
Figure 89 : Distribution géographique des vitesses de variation du niveau de la mer entre 1993 et 2006 par les satellites d'altimétrie spatiale Topex/Poséidon et Jason 1 [http://www.legos.obs-mip.fr]. ....	161
Figure 90 : Hauteurs significatives des houles à la côte dans la partie Est de Cherchell (houle 45°NE). ....	162

Figure 91 : Hauteurs significatives des houles à la côte dans la partie Est de Cherchell (360°N).....	162
Figure 92 : Hauteurs significatives des houles à la côte dans la partie Est de Cherchell (315°NW).....	163
Figure 93 : Hauteurs significatives des houles à la côte dans la partie Est de Cherchell (270°W).....	163
Figure 94 : Hauteurs significatives des houles à la côte dans la partie Ouest de Cherchell (45°NE) [ <i>LEM</i> , 2016].....	164
Figure 95 : Hauteurs significatives des houles à la côte dans la partie Ouest de Cherchell (360°N) [ <i>LEM</i> , 2016]. .....	164
Figure 96 : Hauteurs significatives des houles à la côte dans la partie Ouest de Cherchell (315°NW) [ <i>LEM</i> , 2016]. .....	165
Figure 97 : Occupation des sols de la région de Cherchell (image Google earth, 2019). .....	168
Figure 98 : Localisation des sites historique et archéologique dans la ville de Cherchell [ <i>PAC</i> in <i>DGPC</i> , 2017].....	169
Figure 99 : Exemples de quelques sites historiques de la région de Cherchell [ <i>PAC in DGPC</i> , 2016].....	170
Figure 100 : Vulnérabilité de la variable géomorphologie sur le littoral de Cherchell.....	172
Figure 101 : Classification de la variable géomorphologie sur le littoral de Cherchell (longueur et pourcentage relatifs) selon les différentes classes de vulnérabilité physique. .....	173
Figure 102 : Vulnérabilité de la variable pente côtière sur le littoral de Cherchell. ....	174
Figure 103 : Classification de la variable pente côtière sur le littoral de Cherchell (longueur et pourcentage relatifs) selon les différentes classes de vulnérabilité physique. ....	174
Figure 104 : Vulnérabilité de la variable érosion/accrétion sur le littoral de Cherchell. ....	175
Figure 105 : Classification de la variable érosion/accrétion sur le littoral de Cherchell (longueur et pourcentage relatifs) selon les différentes classes de vulnérabilité physique. .....	175
Figure 106 : Vulnérabilité de la variable élévation de niveau de la mer sur le littoral de Cherchell. ....	176
Figure 107 : Vulnérabilité de la variable hauteur significative des vagues à la côte sur le littoral de Cherchell.....	177
Figure 108 : Vulnérabilité de la variable marée sur le littoral de Cherchell. ....	178
Figure 109 : Indice de vulnérabilité côtier (IVCphys) pour le littoral de Cherchell. ....	179

Figure 110 : Pourcentage du littoral de Cherchell pour chaque degré de vulnérabilité physique. ....	180
Figure 111 : Vulnérabilité de la variable agglomération sur le littoral de Cherchell. ....	182
Figure 112 : Vulnérabilité de la variable réseau routier sur le littoral de Cherchell. ....	183
Figure 113 : Vulnérabilité du variable chemin de fer sur le littoral de Cherchell.....	184
Figure 114 : Vulnérabilité de la variable occupation des sols sur le littoral de Cherchell. ....	185
Figure 115 : Vulnérabilité de la variable héritage culturel sur le littoral de Cherchell.....	186
Figure 116 : Vulnérabilité de la variable statue de protection sur le littoral de Cherchell.....	187
Figure 117 : Indice de vulnérabilité côtière (IVCsocio-éco) pour le littoral de Cherchell. ...	188
Figure 118: Superpositions des indices de vulnérabilité côtières (IVCphys et IVCsocio-éco) pour le littoral de Cherchell.....	191

## Liste des tableaux

Tableau 1 : Données de houles par directions et par période de retour [SSMO in <i>LEM</i> 2016]. .....	106
Tableau 2 : Données de houles de tempêtes à la côte pour la région de Hamdania [d'après météo France in <i>LEM</i> , 2016].....	123
Tableau 3 : Indices de risque d'inondation aux infrastructures (routes et bâtiments) [ <i>Simard et al.</i> , 2015] .....	126
Tableau 4 : Paramètres physico-chimiques des eaux souterraines de l'aquifère de Cherchell [ <i>Mohamed et Bensmaili</i> , 2016]. .....	138
Tableau 5 : Paramètres de GALDIT selon [ <i>Chachadi and Lobo-Ferreira</i> , 2007].....	139
Tableau 6 : Niveaux des six variables de la classification côtière faite par l'USGS sur la côte Atlantique des États-Unis [ <i>Hammar-Klose et Thieler</i> , 2001; <i>Thieler et Hammar-Klose</i> , 2000; <i>Thieler et Hammar-Klose</i> , 1999; <i>Thieler et Hammar-Klose</i> , 2000a; b] .....	156
Tableau 7 : représentation des variables retenues pour le calcul du IVC socioéconomique [ <i>McLaughlin et al.</i> , 2002; <i>McLaughlin and Cooper</i> , 2010]. .....	167
Tableau 8 : Valeurs attribuées à l'ensemble des cellules et des six indices influentes la vulnérabilité physique de la côte de Cherchell.....	171
Tableau 9 : Valeurs attribuées à l'ensemble des cellules et des six indices influants la vulnérabilité socio-économique de la côte de Cherchell.....	181

# **Introduction générale**

## **Introduction générale**

L'apport de la géomatique au service de la gestion de la zone côtière et de ses risques permet de faciliter la cartographie des phénomènes étudiés en l'occurrence la vulnérabilité des côtes, l'érosion des côtes, la submersion marine et l'intrusion marine. Ainsi de rendre la compréhension de ces derniers plus faciles pour les acteurs et le public, par leurs évaluations rapides et leur meilleure gestion, c'est donc un moyen de communication efficace [De Pippo *et al.*, 2008]. Durant ces dernières décennies, plusieurs scientifiques intègrent la géomatique dans des travaux liés aux risques côtiers pour estimer la vulnérabilité. L'analyse de la dynamiques des espaces côtiers n'a été faite qu'au début des années 2000 où des couplages entre SIG et modèles de simulation sont institués [Robin *et Gourmelon*, 2005]. Les travaux utilisant la géomatique se multiplient, que ce soit pour estimer la vulnérabilité [Rygel *et al.*, 2006] ou pour modéliser les aléas.

Les zones côtières sont des éléments socio-économiques d'une véritable importance pour le présent et l'avenir [Niazi, 2007]. Les interférences humaines affectent ces milieux fragiles et menacent leurs durabilités [Rabehi *et al.*, 2018]. Les impacts du changement climatique, telles que les faibles précipitations [Tadrist *et al.*, 2016] et l'élévation attendue du niveau de la mer, pourraient accroître la dégradation de ces milieux fragiles [Snoussi *et Tabet-aoul*, 2000].

La côte algérienne abrite la majorité de la population de pays (75%), et constitue un atout pour le développement touristique et économique de pays, qui devient une nécessité et permet de surmonter la crise économique due au déclin des hydrocarbures. Toutefois, l'exploitation et le développement de ces espaces côtiers présentent un certain risque lié aux problèmes d'intrusion marine et l'érosion côtière et d'inondations marines. Ces risques peuvent s'amplifier avec l'élévation relative du niveau de la mer [GIEC, 2014; Jimenez *et Sánchez-Arcilla*, 1997] ces risques constituent un défi majeur pour la côte algérienne dans les années à venir. Il faut rajouter à cela la mauvaise gestion ou parfois la non gestion des espaces côtiers, qui est dû essentiellement aux manques des études détaillées. Cependant, les études menées pour l'évaluation des risques côtiers en Algérie sont rares, principalement en raison de manque de données de base.

Cherchell est l'une des plus anciennes villes côtières d'Algérie, caractérisée par un patrimoine culturel très riche, placée parmi le patrimoine national (les vestiges des ruines romaines, coloniales et antiques), ainsi qu'un patrimoine naturel riche en morphologie (plages, falaises, criques, côtes rocheuses, forêts, plaines alluviales, etc.) et en biodiversité. Ceci constitue pour

le Nord du pays un enjeu socio-économique actuel et futur de première importance, c'est l'une des zones les plus convoitées par l'expansion touristique du littoral algérien.

Annuellement le littoral de Cherchell accueille plus de 24 millions d'estivants, dont 6 millions à la plage Hamdania [*PAC, 2016 in DGPC, 2016*]. Ces sites côtiers ont fait ces dernières décennies l'objet d'occupations humaines qui se sont traduites par des aménagements de toutes sortes ayant plus ou moins réussi. Ceci a été fait à des fins de développement économique (Construction de la route Nationale RN 11 dans sa grande partie dans la bande des 800 m parallèle au rivage) ainsi qu'un chemin de wilaya et l'implantation du barrage Boukerdene dans le lit d'oued El Hachem à environ 11 Km au sud de littoral de Cherchell et à 3 Km de l'aquifère côtier de Cherchell. Ces aménagements ont provoqué les perturbations que connaît la région. La nécessité de préserver la côte de Cherchell contre les risques côtiers, nous a motivé à réaliser ce travail de thèse. Aucune étude de ce genre n'a été réalisée auparavant sur la région de Cherchell.

De cet objectif se dégagent trois questions majeures, pourquoi étudier l'évolution passée du trait de côte, dans ce cas précis, et plus particulièrement les courants de retour, auront-ils un intérêt pour apporter des éléments de réponse sur la problématique de l'érosion côtière et son origine ? À quel niveau l'élévation de niveau de la mer superposé aux houles de tempête extrêmes touche la région ? À quel degré les eaux souterraines de l'aquifères côtières de Cherchell ont été affectées par l'intrusion marine ? La réponse est qu'y a un lien très fort entre ces trois problématiques car on ne peut pas parler de l'aléa submersion sans parler de l'aléa érosion, ainsi la conjugaison de ces deux aléas provoque la contamination des eaux souterraines côtière. Partant de ce principe, d'autres questions secondaires sont posées :

Quelle est la vitesse d'évolution du trait de côte dans la région de Cherchell ? Et quel est le devenir des régions érodé pour les cinquante années prochaines ? Et quelle est l'origine de l'érosion qui a subi ce littoral ?

Quelles sont les zones à risques de perdre pour chaque niveau marin extrême ?

À quel point les eaux souterraines de l'aquifère côtier de Cherchell sont vulnérables à l'intrusion marine ?

À quel degré l'aspect physique et socioéconomique du littoral de Cherchell est vulnérable au risque d'érosion et de submersion marine ?

Les réponses à ces questions ont nécessité de nous de procéder par une approche de cartographie baser sur la récolte de chaque type d'information qui possède une relation avec les risques abordés par cette thématique (photos aériennes, images satellitaires, modèles numériques de terrains) ainsi le traitement des informations à l'aide des systèmes

d'informations géographiques qui convient à chaque type de donnée. Les résultats obtenus vont servir à mieux comprendre la cinématique côtière et l'origine de l'érosion marquée, ainsi les régions les plus affectées par les différents niveaux d'inondation marine sur la côte de Cherchell, et le niveau de vulnérabilité des eaux souterraines côtières à l'intrusion marine, et le degré de sensibilité de la côte de Cherchell physiquement et socio économiquement au risque d'érosion, et de submersion marine.

L'objectif principal de cette thèse est de contribuer à la compréhension de degré de sensibilité de la côte de Cherchell face aux risques côtiers, et ce dans le but de mieux interpréter les scénarios d'érosion, de submersion et d'intrusion marine. Notre démarche est basée sur une approche de cartographie et une approche numérique :

L'approche de cartographie est basée sur une campagne de récolte de données des archives sur une échelle mi- séculaire. À cette échelle de temps, l'objectif est de retracer les traits de côte pour calculer la cinématique côtière, ainsi des modèles numériques de terrains pour extraire d'autre information telle que la géomorphologie côtière, la pente, la nature de sol, la position par rapport au niveau de la mer...etc. afin de cartographier les zones affectées par chaque niveau d'inondation marine ainsi de cartographier les zones vulnérables au risque d'intrusion marine et d'identifier le degré de vulnérabilité du littoral de Cherchell physiquement et socio économiquement aux risques d'érosion et de submersion. L'approche numérique est basée sur l'utilisation de formules empiriques et de modèles numériques de terrain pour modéliser le fonctionnement hydro-sédimentaire (amplitude et direction de propagation des houles de large vers la côte, vitesse et direction des courants à la côte, volume et direction de transit sédimentaire à la côte) vitesse et la direction des courants à la côte afin d'avoir une idée sur l'origine de l'érosion côtière de la plage Hamdania.

Les finalités recherchées permettront de :

- Mettre en lumière sur l'état des plages de ce littoral et l'origine de l'érosion marquée dans la plage Hamdania ;
- Situer les zones les plus affectées pour chaque niveau d'inondation due aux niveaux marins extrêmes pour chaque période de retour ;
- Identifier la sensibilité de l'aquifère côtier de Cherchell à l'intrusion marine ;
- mettre l'accent sur les régions les plus affectées par les risques d'érosion et de submersion.

Ce manuscrit s'articule en quatre parties :

La première partie comprend deux chapitres ;

- Le premier chapitre, est consacré à la synthèse bibliographique traitant les termes de la géomatique et des risques côtiers.
- Le deuxième chapitre est consacré aux généralités sur le site d'étude « cadre géographique, géologique, sismotectonique, géomorphologique, bioclimatique, hydrologique, hydrogéologique, hydrodynamique, morphodynamique et sédimentologique de la côte de Cherchell ».

La deuxième partie contient deux chapitres :

- Le premier est consacré à retracer l'évolution passée des plages du littoral de Cherchell (une étude rétrospective a été effectuée à partir de l'analyse des changements morphologiques du trait de côte durant environ un demi-siècle). Ceci permet de dégager la tendance évolutive du rivage et d'estimer l'évolution futur ;
- Le deuxième est consacré à la simulation numérique de fonctionnement hydro sédimentaire, on cherche à détecter la présence d'un courant de retour et les directions dominantes de transit sédimentaire, pour identifier les causes de l'érosion marquée sur la plage Hamdania (naturelle ou anthropique).

La troisième partie contient deux chapitres :

- Le premier chapitre présentera la cartographie des zones susceptibles d'être inondées due à des événements marins extrêmes pour chaque période de retour (annuelle, décennale, cinquantennale et centennale).
- Le deuxième chapitre est consacré à l'évaluation de la vulnérabilité de l'aquifère côtier de Cherchell à l'intrusion marine, en se basant sur la méthode GALDIT élaborée par *Chachadi et Lobo-Ferreira* [2001b].

La quatrième partie contient un seul chapitre :

Ce chapitre est consacré à l'évaluation de la vulnérabilité côtière de la côte de Cherchell face aux risques d'érosion et de submersion marine. L'évaluation de la vulnérabilité physique est effectuée par la méthode développée par *Gornitz* [1991] et améliorée par *Thieler et Hammar-Klose* [1999] alors que l'évaluation de la vulnérabilité socio-économique a été faite par la méthode de *McLaughlin et al* [2002] et améliorée par *McLaughlin et Cooper* [2010].

Le travail se termine par une conclusion, où sont citées quelques perspectives concernant les lacunes de la recherche effectuée afin de guider les futurs axes de recherche traitant la problématique « étude des risques côtiers dans le littoral de Cherchell ».

Les cartes de vulnérabilités obtenues de la côte de Cherchell, servent à identifier les zones les plus vulnérables nécessitant une intervention urgente pour chaque risque, et forment un outil

de base pour les gestionnaires d'espace et les décideurs locaux, d'adapter des pratiques et des politiques de planification pour une meilleure occupation et préservation de ces espaces fragiles ainsi pour les futures décisions de gestion et de protection de la région de Cherchell face à chacun des risques côtiers cité précédemment.

# **Partie I : Cadre conceptuel**

## **Chapitre 1 : Synthèse bibliographique**

**Introduction**

Les risques se situent au niveau d'une confrontation systémique entre un système social et un système « naturel » à un instant donné, fondement même de la gestion intégrée de la zone côtière [Ojeda, 2002]. Ils sont traditionnellement décrits comme le produit d'un ou plusieurs aléas par la vulnérabilité. Les risques analysés sont généralement classés en fonction des aléas [Burton et al, 1993 ; Smith, 1996] et plus rarement en fonction de la vulnérabilité. La globalisation du risque au niveau mondial engendre une prise de conscience planétaire et l'émergence de nouvelles attitudes générales destinées à concilier l'usage de plus en plus pressant de la zone côtière [Green et Penning-Rowsell, 1999] et sa protection [Carter, 1991]. Il importe alors de bien dissocier génétiquement les deux facettes du risque côtier : le risque sociétal et le risque écosystémique côtier.

L'utilisation des outils de la géomatique devient rapidement nécessaire pour l'appréhension globale du risque vu sous l'angle spatial (localisation de la zone à risque), systémique (étude du processus à l'origine du risque) ou socio-économique (étude de la genèse d'attitude face au risque, conséquences induites sur l'espace). On peut s'en rendre compte à la lecture des documents cartographiques réglementaires traitant du problème.

On peut envisager l'utilisation de l'outil selon une philosophie systémique. Deux approches complémentaires se dessinent alors : il s'agit d'un côté de la connaissance par la mesure directe des aléas et de la vulnérabilité (résistance/résilience). C'est l'approche inventaire. Il s'agit de l'autre côté de la modélisation des processus physiques et humains en œuvre. Dans les deux approches, l'objectif est la proposition de réduction du risque directement dans le cadre de la prévention. Les outils peuvent ainsi devenir de véritables outils de gestion des risques en jouant sur les paramètres définissant la résistance/résilience des zones (défenses côtières par exemple) ou en soustrayant des zones initialement constructibles à l'emprise d'aléas soit par modification du statut juridique de la zone côtière (zone non constructible), soit en déplaçant des zones bâties avec indemnisation (au sens de l'amendement qui propose des dédommagements aux habitants des zones à très haut risque en bordure de rivage en contrepartie de l'abandon de l'habitation, [Crowell et al, 1999]).

La géomatique va mettre au service des gestionnaires des territoires un ensemble de données et de méthodologies que cette thèse propose d'aborder.

## **1. Définition de la géomatique**

La géomatique est la combinaison syntaxique de deux mots : Géographie et Informatique. La définition de la géomatique est différente d'un auteur à l'autre. C'est un domaine qui fait appel aux sciences, aux technologies de mesure de la terre ainsi qu'aux technologies de l'information pour faciliter : l'acquisition, le traitement, et la diffusion des données sur le territoire (aussi appelées "données spatiales", "données géo-spatiales", ou "données géographiques" (*INGEO* (<http://www.sig-geomatique.fr/sig-geomatique.html>)). Cette discipline a pour objet la gestion des données à référence spatiale par l'intégration des sciences et technologies reliées à leur acquisition, leur stockage, leur traitement et leur diffusion [*Regrain, 2016*].

La géomatique, est fondée sur l'informatique dont la gestion des données se rapportant à la surface terrestre, donc l'informatique se trouve au cœur de la géomatique, car elle conceptualise et instrumente la nature numérique des données à traiter. La géomatique prend en charge la dimension informatique des autres sciences de l'information géographique. La géomatique pourrait donc être vue comme une nouvelle discipline qui intègre les sciences de l'information géographique. Le caractère numérique des données rend compatibles des méthodes et des techniques qui restaient auparavant isolées [*Regrain, 2016*]. C'est la constitution progressive d'un champ de pratiques et de savoirs à partir de la prise de conscience progressive que des formes distinctes d'information convergent vers une structure numérique commune. Plus la numérisation des technologies de l'information à référence spatiale avance, plus aisée devient la connexion entre les différentes applications et métiers liés à cette information [*Joliveau, 2004*]. L'arrivée de l'informatique marque l'aube de la géomatique [*Regrain, 2016*].

La photographie aérienne a beaucoup participé à la multiplication des usages de la géomatique. La géomatique étant liée à l'informatique, son application passe par l'utilisation d'outils informatiques que l'on nomme les SIG (Systèmes d'Informations Géographiques).

Les SIG tiennent une place centrale dans la géomatique, puisqu'ils sont les outils informatiques permettant la représentation et l'analyse des données. Les applications des SIG sont diversifiées et multipliées à partir des années 1990 [*Regrain, 2016*].

La méthode de travail s'articule autour de 4 grandes phases :

Phase 1 : Collecte de données géographiques et documentaires qui concernent le domaine côtier (images satellitaires, photographies aériennes, levés GPS, etc.) ;

Phase 2 : Organisation, normalisation et analyse des données ;

Phase 3 : Création d'une base de données géographiques composée de tableaux contenant des données alphanumériques et géographiques ;

Phase 4 : Développement d'une application web qui utilise des technologies libres pour la consultation du système.

## **2. Définition de risque**

L'UNESCO a proposé la définition suivante : « le risque est le croisement de l'aléa et de la vulnérabilité,  $\text{Risque} = \text{aléa} * \text{vulnérabilité}$  ». L'aléa est tout élément objectif d'origine externe ayant un caractère prévisible ou imprévisible. La vulnérabilité est inhérente à la présence d'activités humaine. Cela revient à dire qu'en dehors d'une zone humainement exploitée, le risque est nul, car il n'y a pas de vulnérabilité. La prise en compte des risques dans la société est nécessaire à tous ces stades et à tous les niveaux d'organisation.

L'approche du risque doit être globale. Elle comporte trois phases principales :

- La prévention : connaissance des risques, parades, prise en compte du risque dans l'aménagement, surveillance ;
- La protection : alerte, plans de secours, gestion de crise ;
- L'information et la formation des milieux professionnels, du système éducatif.

Selon le guide pour l'élaboration des plans de prévention et des plans d'organisations des interventions et secours en cas de catastrophe parut le 02 novembre 1985 promulguées à partir des décrets suivants :

Le décret N°85-231 du 25 août 1985 fixant les conditions et modalités d'organisation et de mise en œuvre des interventions et secours en cas de catastrophe. Le décret N°85-232 du 25 août 1985 relatif à la prévention des risques de catastrophes.

L'Algérie décide de classer les risques en quatorze (14) classes. En matière de renforcement législatif et réglementaire, la loi 04-20 du 03 décembre 2004 relative à la prévention des risques majeurs et à la gestion des catastrophes dans le cadre du développement durable a été révisée et a permis une meilleure classification regroupant les risques dans dix (10) familles. Parmi ces risques on trouve les catastrophes maritimes, et malheureusement les risques d'érosion côtière, submersion marine et intrusion marine ne sont pas bien définies et donc l'Algérie ne possède pas de plans de prévention pour réagir si l'un de ces risques se produit, cela implique des dégâts intenses suite à de tel risque, due la nécessité d'effectuer des études détaillées sur ces risques.

Selon [Lévy et Lussault, 2013], le risque se définit comme « la probabilité d'un danger menaçant ou portant atteinte à la vie ». Ainsi, cette définition admet que le risque est une

combinaison de deux composantes : l'aléa et les enjeux. L'aléa est l'évènement en lui-même. Il peut être d'origine naturelle ou anthropique. Il est caractérisé par une probabilité d'occurrence et une intensité. Les enjeux désignent les éléments exposés à l'aléa et qui représentent une valeur humaine, économique ou environnementale : ces enjeux peuvent être des biens ou des personnes [Hénaff et Philippe, 2014; Robin, 2002]. Dans les études sur le risque, la question des enjeux est souvent abordée du point de vue de leur vulnérabilité. Lévy et Lussault, [2013] définissent la vulnérabilité « une exposition intrinsèque à l'endommagement de toute organisation spatiale ». La vulnérabilité concerne l'exposition des enjeux mais il est aussi question de leur sensibilité : c'est la « propension à l'endommagement ou au dysfonctionnement de différents éléments exposés (biens, personnes, activités) constitutifs d'un territoire et d'une société donné » [Leone et Vinet, 2006].

L'approche du risque privilégiant exclusivement l'aléa est encore présent dans le début des années 2000. Cela est dû au fait que le concept de vulnérabilité entre tardivement comme composante du risque et peine à être pris en compte [Leone et Vinet, 2006; Morel, 2006]. L'aléa reste largement présent dans les politiques publiques au détriment de la question des enjeux qui n'est pas trop développée et celle des représentations qui est rarement évoquée [Hénaff et Philippe, 2014].

De plus en plus, la compréhension des risques est aussi abordée à travers le regard croisé d'une approche pluridisciplinaire. La compréhension du risque est maintenant obtenue à partir de l'analyse de plusieurs aspects : l'approche spatialisée des aspects physiques et humains (par le biais de l'analyse spatiale), la dimension historique, la perception et la prise en compte du risque. La réflexion pluridisciplinaire intervient aussi dans l'élaboration de politiques de prévention et de gestion des risques. Elle est de plus en plus sollicitée par les pouvoirs publics à travers des programmes de recherche [Leone et Vinet, 2006].

### **3. Expression d'un risque côtier**

On peut représenter le risque R sous la forme d'une expression du type :

$$R = f(A, V)$$

où A = l'aléa ou la combinaison d'aléas directs et/ou induits

V = vulnérabilité d'origine naturelle ou artificielle, de position et/ou de qualité

Cette expression constitue le modèle conceptuel du risque et exige, pour être traduite dans un formalisme mathématique, la connaissance des modalités de l'aléa et de celles de la vulnérabilité. Il est important de noter que les variables peuvent se combiner entre elles pour former des « super-variables ». Par exemple, soit la variable vulnérabilité « distance au trait

de côte » qui est une variable de position  $f(d)$  où  $d$  est la distance au trait de côte et la variable « altitude » qui est aussi une variable de position  $f(a)$  où  $a$  est l'altitude par rapport à un niveau de référence topographique (0 NGF) ou hydrologique (0 hydrologique).  $f(d)$  marque le risque d'érosion qui décroît lorsque  $d$  augmente. En revanche,  $f(d)$  ne marque pas correctement le risque submersion marine qui n'est pas forcément fonction de  $d$  : la relation fonctionnelle peut se vérifier parfaitement sur certains segments côtiers mais ne se vérifie pas sur tous [Robin, 2002].

### **3.1. Nature des risques côtiers**

#### **3.1.1. Risques sociétaux côtiers**

Les risques sociétaux sont les risques encourus sur le littoral par la société soumise d'une part aux aléas météo-marins, et d'autre part à des comportements sociaux qui peuvent modifier la magnitude de ces aléas et par là même, modifier, en l'aggravant, le degré du risque encouru. Les aléas agissent ainsi par action et rétro-action sur le territoire côtier. L'érosion côtière constitue alors un risque pour l'urbanisation construite près du trait de côte. La protection côtière peut aussi générer un surplus de risque en déstabilisant un système hydro-sédimentaire et aggraver localement l'érosion. On entre alors dans la seconde catégorie de risques.

#### **3.1.2. Risques éco-systémiques côtiers**

Inversement, le risque que fait peser l'homme sur l'environnement est très important. De multiples programmes internationaux destinés à modéliser l'action de l'homme sur le milieu (forçage anthropique) et les réponses du milieu aux actions de l'homme en témoignent. Par exemple, il a pu être estimé que 70 % des plages du monde reculent plus vite que la normale en raison des diverses activités humaines sur les littoraux [Agardy, 1997].

### **3.2. Les aléas en milieux côtiers**

#### **3.2.1. Les aléas d'expression physique**

En domaine côtier, on peut globalement lister l'ensemble des principaux aléas possibles, en les classant par famille de processus. On peut aussi les classer plus spécifiquement selon un système de filiation ou d'héritage. On distingue en milieu côtier au moins trois niveaux induits permettant de classer l'ensemble des aléas [Caude et Mazzolini, 1987]. Il existe toutefois des aléas que l'on peut surnommer « aléas indépendants » et qui présentent la propriété d'être présents à certains niveaux (connexion en gris) mais sans liens génétiques obligatoires entre eux. Il existe aussi des aléas « anthropiques » pouvant influencer les aléas

induits voire les induire et devenir ainsi des aléas génériques [Lovelock, 1995]. Nous faisons référence à cette théorie qui propose le cadre général d'un système auto-régulé à l'échelle de la planète. Dans ce système, caractérisé par une résistance et une résilience, la moindre perturbation déséquilibre le système qui peut ou ne peut pas compenser l'effet du déséquilibre. Les modifications générales du système terre sont d'origine naturelle et aussi en partie anthropique. Ces modifications générales constituent le niveau A1 (la modification du climat). Les aléas induits (A2) par l'aléa A1 sont, en milieux côtiers, l'élévation du niveau de la mer d'une part (eustatisme) et, d'autre part, la modification du régime des perturbations (magnitude, trajectoire, fréquence). Ces deux aléas A2 génèrent à leur tour des aléas induits de niveau 3 (A3) qui sont, en milieu côtier, la multiplication des surcotes d'une part et d'autre part, la modification du régime des houles (amplitude, direction, fréquence) avec les conséquences induites sur le rythme de l'érosion côtière, inondation marine et l'intrusion marine des aquifères côtiers [Robin, 2000]. Les aléas indépendants peuvent être aussi illustrés avec un simple exemple : un séisme est un aléa indépendant qui peut générer un tsunami, venant se connecter à l'aléa submersion par surcote (connexion A3) et l'aléa intrusion marine des aquifères côtiers [Robin, 2002].

### **3.2.2. Les aléas d'expression anthropique**

La société influe de façon multiforme sur le milieu physique à différents niveaux scalaires et il serait fastidieux de décomposer systématiquement cette influence. La construction en général : urbanisation, industrialisation, artificialisation du trait de côte, modification de l'hydrodynamisme, due à l'extraction licite ou illicite de sable des plages et celui des lits d'oueds. Illustré par un exemple anodin mais lourd de conséquence pour l'équilibre d'un milieu.

### **3.3. La vulnérabilité côtière**

L'estimation d'un degré de vulnérabilité (coût des dommages potentiels) repose généralement sur plusieurs phases nécessaires :

- recensement et estimation chiffrée des biens de la zone exposée à d'éventuels aléas ;
- recensement de l'intensité des aléas potentiels susceptibles de s'exercer sur la zone ;
- établissement de scénario modulant le degré de vulnérabilité soit par l'atténuation des effets des aléas menaçant ; soit par le transfert hors zone des biens menacés (notion de prévention).

En tout état de cause, on fera la distinction entre un groupe de variable de position et un groupe de variable d'usage, les deux groupes étant liés. Le croisement entre ces deux groupes génère la carte de la vulnérabilité. La vulnérabilité est donc un coût fonction de la nature de la surface concernée et de sa position dans l'espace XYZ, le tout inséré dans un espace socio-culturel donné, la perception de la vulnérabilité variant d'un lieu à l'autre.

En zone côtière, on note une augmentation de la vulnérabilité du fait de l'augmentation de la pression anthropique sur les littoraux et du fait d'une modification des usages de la zone côtière.

### **3.4. Grille de lecture des risques côtiers**

Il est nécessaire de se référer à une grille de lecture des risques côtiers de façon à pouvoir les classer génétiquement et de les quantifier spatialement. En première approximation, la dimension temporelle permet de classer les types de risques en fonction des aléas générateurs. Par exemple, une grille simple peut être proposée compte tenu de l'échelle temporelle : sur le court terme (la journée au mois) : tempêtes et surcotes, inondation ; sur le moyen terme (l'année à la dizaine d'année) : érosion/accumulation ; sur le long terme (la centaine d'année) : eustatisme et divers effets induits [Sims, 1998]. Toutefois, l'appréhension du risque côtier nécessite une grille de lecture plus complète croisant diverses variables utiles à sa classification. Les variables à utiliser dans cette grille de lecture sont a priori multiples. *Kervern et Rubise* [1991] assimilent le risque à des courbes dans un espace bi-dimensionnel référencé par un axe « gravité » et un axe « probabilité ». On peut s'inspirer de cette figuration en rajoutant toutefois un axe introduisant l'échelle dans cette grille. On peut donc distinguer trois variables :

— une variable « emprise spatiale »  $E_s$  correspondant à la superficie de la zone exposée à des risques. Cette variable peut aussi contenir le niveau d'agrégation de l'information en cas de synthèse spatiale (travail à la parcelle foncière : approche opérationnelle de type Plan de Prévention des Risques ; jusqu'au travail au niveau d'un état : approche opérationnelle de type FAO).

— une variable « magnitude » correspondant à la combinaison intensité (i)/durée (d)/occurrence (o).

— une variable « vulnérabilité »  $V_u$  : cette variable doit chiffrer autant que faire se peut le coût que représentent les enjeux territoriaux exposés aux aléas.

#### **4. La démarche géomatique dans l'étude des risques côtiers**

La vulnérabilité des zones côtière résulte conjointement de dynamiques liées au milieu naturel et à l'élément humain et social qui façonnent le système socio-écologique. Pour tenir compte de cette dualité, des approches théoriques ont été développées, telles que le couple exposition/sensibilité dans le développement d'indices de vulnérabilité climatique ou le couple aléa/enjeux dans le domaine de la gestion du risque [Regrain, 2016]. Souvent, ces approches ne s'appliquent que de manière instantanée et l'évolution temporelle de la vulnérabilité. Nous nous intéressons à l'importance de la vulnérabilité de la zone côtière de Cherchell, elle-même fonction de facteurs démographiques, économiques, environnementaux, sociaux et culturels qui se sont mis en place sur différentes échelles de temps, séculaires pour certains, récentes pour d'autres. Nous constatons que différentes trajectoires historiques, comme le développement du tourisme côtier, l'évolution d'activités économiques côtières, ou encore les changements démographiques peuvent rendre un littoral sensible.

Avec 1622 kilomètres de linéaire côtier, l'Algérie est particulièrement concernée par toutes les évolutions qui concernent ou vont affecter le littoral. Espaces exceptionnellement denses, d'une grande richesse écologique, plus vulnérables et convoités que d'autres, les zones littorales sont d'ores et déjà un enjeu majeur de développement durable pour notre pays. Cela sera encore plus le cas dans le futur avec la perspective attendue de développer de plus de quatre millions d'habitants supplémentaires d'ici 2040 et le développement prévisible de nouvelles activités liées à l'urbanisation, au tourisme, aux énergies renouvelables, à l'aquaculture, au transport maritime [Djabri et al., 2019]. C'est dans ce contexte de forte croissance démographique et économique qu'il faut d'ores et déjà anticiper un autre facteur de perturbation et d'évolution – appelé lui aussi à jouer un rôle majeur – qui est le changement climatique.

Les espaces littoraux sont particulièrement exposés à des risques naturels majeurs [GIEC,2014] et que le changement climatique va sensiblement amplifier ce potentiel de risques : la montée du niveau moyen des mers, des houles plus fréquentes et plus fortes, le réchauffement et l'acidification des océans, la modification des courants marins, auront pour effet une accélération du recul de certaines parties du littoral, des submersions plus fréquentes, une fragilisation des cordons dunaires et des ouvrages de protection, une dégradation des écosystèmes maritimes et côtiers. Tout cela aura naturellement des répercussions non négligeables sur les dynamiques de développement de ces territoires. Même s'il existe aujourd'hui encore beaucoup d'incertitudes sur le rythme de modification future des climats. Les connaissances ont cependant suffisamment progressé pour que l'on

puisse sans attendre commencer à intégrer la variable climatique dans la prospective territoriale. C'est la perspective dans laquelle se situe le présent ouvrage ; et à laquelle il apporte une contribution à ce stade très modeste : faire un état des lieux des savoirs scientifiques sur les risques naturels auxquels sont exposés les espaces littoraux et sur les conséquences physiques attendues. Les risques pour le littoral sont d'autant plus difficiles à prévoir que les phénomènes sont interdépendants et leurs effets se combinent : une élévation du niveau marin peut, par exemple, se conjuguer avec des survenues de tempêtes et des phénomènes de forte marée. Ce sont ces combinaisons de phénomènes qui vont configurer les menaces de submersion, d'érosion et de salinisation des sols et des aquifères, qui constituent les trois principales conséquences de l'élévation du niveau de la mer [Achab et al., 2014]. La conjugaison de ces menaces induira des impacts sur les milieux marins et littoraux, sur les ressources (eau, espace, biodiversité...), et enfin sur les activités humaines qui en dépendent. Il existe donc une chaîne d'impacts très active qui explique pourquoi les grandes tendances climatiques (température, précipitation, niveau de la mer) menacent la vie des hommes sur les littoraux du monde. Une telle situation, combinée avec les incertitudes économiques et démographiques, induit un besoin de travaux de prospective territoriale, pour apprécier les risques potentiels et se prémunir de leurs conséquences.

Les nappes phréatiques côtières constituent un enjeu majeur pour l'alimentation en eau potable des populations locales, pour l'irrigation, mais aussi pour les équilibres des écosystèmes de surface qui en dépendent. Pour ces masses d'eau stratégiques, l'avènement du changement climatique est une source d'inquiétude croissante à plusieurs titres : les modifications annoncées de la pluviométrie affecteront la balance recharge-prélèvements des nappes, tandis qu'elles pourraient accroître dans le même temps les besoins sociétaux en eau – par le fait d'une irrigation accrue notamment [Niazi, 2007]. Cette approche a été effectuée dans la région de Cherchell pour voir l'impact de l'intrusion marine sur l'aquifère. De plus l'élévation du niveau de la mer pourrait majorer le risque d'intrusions marines dans les nappes. Ce travail s'est appuyé au préalable sur une caractérisation des sites d'étude, marqués par la présence aquifère exploitée pour l'eau potable et l'irrigation.

L'approche des études effectuée dans ce travail est basée sur la géomatique qui est définie comme étant : « l'ensemble des applications de l'informatique au traitement des données géographiques, et en particulier à la cartographie » (Glossaire français de cartographie). Etymologiquement, le mot est formé du préfixe géo, qui veut dire la Terre, ou diminutif de géographie – et du suffixe matique – provenant du mot informatique (ou encore automatique).

Son champ est celui du traitement de l'information géographique, depuis l'acquisition jusqu'à la *restitution, l'affichage, l'édition, la communication* des données. Le terme géomatique est encore peu connu parce que de création récente. Il a été créé à l'Université Laval (Québec) au Canada au début des années 1980;

Ce concept s'est développé dans un contexte caractérisé par des développements technologiques dans de nombreux domaines relatifs à la collecte, le traitement, l'analyse, et la diffusion des données et de l'information géographiquement référencées notamment,

Le développement de l'informatique, et en particulier de la micro-informatique, le lancement des satellites à haute résolution spatiale, spectrale, radiométrique et temporelle, l'accès au système de positionnement global (GPS, etc.), la numérisation de l'information, le développement d'Internet et des réseaux de transmission des données à grande vitesse etc. ;

Ces progrès technologiques ont provoqué une augmentation extraordinaire dans la quantité de données sur l'espace terrestre (ou géographique). Une telle quantité de données doit être organisée, traitée, manipulée et utilisée rapidement pour une représentation exacte de la situation du territoire, pour l'aide à la décision, et c'est l'informatique qui permet de s'acquitter de cette tâche.

C'est donc l'intégration de l'informatique aux sciences de la terre qui a bouleversé le fondement même des sciences *cartographiques et géodésiques*, et a engendré la naissance d'une nouvelle science, la géomatique, appelée aussi *science de l'information géographique (Geospatial science)*.

La géomatique couvre donc un vaste éventail de disciplines qui, regroupées, peuvent brosser un tableau détaillé de la réalité de notre monde physique et de notre position dans celui-ci. Parmi ces disciplines figurent : (i) l'informatique; (ii) la géodésie; (iii) la télédétection; (iv) les systèmes d'information géographique (SIG); (v) le système de positionnement global (GPS), etc.

En Algérie plus qu'ailleurs la zone côtière se caractérise par une forte densité de population (croissance démographique, littoralisation accrue, etc.) et par une forte concentration d'activités économiques et tous les problèmes que cela engendre, consommation de ressources (sol, air, eau, etc.), de gestion des déchets et de risques de toutes sortes (naturels, technologiques, etc.).

La zone côtière est également le réceptacle de tous les flux de déchets d'origine hydrique, principalement attribuables à l'agriculture, à ses engrais et produits agrochimiques, et de toutes les eaux usées traitées et non traitées de l'arrière-pays dans leur bassin respectif. Ils sont

tous drainés vers les eaux côtières. Par conséquent, il existe un besoin urgent d'une gestion intelligente de la zone côtière, nécessitant l'accès à des données à jour, exactes et au moment voulu, ces données, c'est la géomatique qui les fournit.

#### **4.1. Exemples de risques côtiers étudiés sous l'angle de la géomatique**

Elle va consister à exploiter au mieux l'information disponible pour effectuer une segmentation de l'espace à fondement probabiliste. Diverses solutions sont envisageables, depuis une mise en relation d'informations les unes avec les autres jusqu'au recours à de la modélisation. Le choix porte aussi sur le degré d'intégration de l'information géographique : information à l'objet ou à la zone. Quelques démarches sont évoquées ci-après. Leur présentation repose sur une logique utilitaire depuis une assistance machine faible dans le processus de prise de conscience puis de décision jusqu'à une assistance informatique totale depuis la prise de conscience jusqu'à la décision.

##### **4.1.1. Etude de risque d'érosion côtière sous l'angle de la géomatique**

L'unique valeur est la distance simple au trait de côte  $dR$  et les surfaces sont déclarées à risque lorsqu'elles se situent à  $x$  distance du trait de côte reculant en fonction du temps  $dT$  à la vitesse  $dR/dT$ , cette vitesse étant en fait une distance-temps ( $dR/dT$ ).

La création de cet indice repose sur plusieurs étapes. D'abord, le recul côtier est cartographié à plusieurs dates. Ensuite, le recul est extrapolé raisonnablement dans un futur proche de façon linéaire et selon une métrique euclidienne (création d'un buffer). Il est enfin intersecté avec une cartographie d'occupation du sol. Chaque classe d'occupation du sol reçoit, par cette intersection, une valeur fonction de sa distance au trait de côte et entre, ou non, dans la bande risque face au recul côtier. Des statistiques peuvent ainsi être construites en comptabilisant les surfaces se trouvant à  $x$  m de l'actuel trait de côte et de ce fait exposées à un risque. Chaque objet est caractérisé par un attribut distance et un attribut thématique.

##### **4.1.2. Etude de la vulnérabilité côtière sous l'angle de la géomatique**

Prenons l'exemple du CVI (Coastal Vulnerability Index) imaginé par Gornitz V. (1991). Une base de données est constituée de 6 variables : la géomorphologie côtière, la pente de la côte, la variation relative du niveau de la mer, la variation transversale du trait de côte (érosion / accrétion), l'amplitude de la marée, la hauteur des vagues. Chaque variable est codée en 5 niveaux ordinaux, de 1 (faible risque) jusqu'à 5 (très haut risque).

Le travail, appliqué sur la côte de Cherchell, permet de dégager des segments côtiers homogènes face au risque d'érosion et de submersion marine. La démarche est intéressante et le nombre de variables peut être augmenté en intégrant des variables socio-environnementales. De nombreuses études s'orientent vers ces pondérations pour définir des indices de sensibilité.

L'indice de sensibilité des littoraux face au risque anthropique et s'appuyant sur la combinaison de 6 variables : agglomération, occupation des sols, réseau routier, chemin de fer, patrimoine culturel, statut de protection. La cartographie résultante, permet le classement des littoraux par segments homogènes. Par exemple, les littoraux exposés à une grande menace sont ceux situés le long ou à proximité d'une grande ville côtière, ou dans une zone à forte densité de population avec un dense réseau routier.

#### **4.1.3. Etude de risque de submersion marine sous l'angle de la géomatique**

L'aléa inondation/surcote est déduit grâce à la cartographié et cela par la combinaison entre un MNT précis et la hauteur maximum des niveaux d'eau prédite. La vulnérabilité est traitée de même à l'intérieur d'une grille similaire et correspond à divers critères pondérés : densité du bâti, âge et nature (résidence principale / secondaire) du bâti, densité du réseau routier, nature du milieu non bâti (milieux naturels sensibles). Les niveaux du risque sont simplifiés en 6 niveaux correspondant aux risques 0 à 5 de la grille de lecture présentée précédemment.

#### **4.1.4. Etude de risque d'intrusion marine sous l'angle de la géomatique**

Pour illustrer les deux étapes délicates de la standardisation et de la pondération, on prend un exemple qui est développé selon une autre logique concernant l'intrusion marine. Dans l'évaluation du risque lié à l'intrusion marine, divers critères sont utilisés : distance perpendiculaire de l'aquifère par rapport au trait de côte, niveau piézométrique par rapport au niveau de la mer, épaisseur de l'aquifère. Après consultation d'experts et d'acteurs, les critères : type d'aquifère, conductivité hydraulique de l'aquifère et impacte d'existence d'une intrusion marine arrive en deuxième position par ordre d'importance avec les valeurs de pondération de 1 à 4. La quantité de risque associée à ces critères décroît ainsi progressivement avec l'éloignement de la côte.

#### **4.1.5. Simulation de fonctionnement hydro-sédimentaire sous l'angle de la géomatique**

La tendance actuelle en matière de SIG est d'établir d'une part des passerelles entre les outils de simulation et les SIG de façon à les rendre plus dynamiques, et d'autre part de transférer le

« porter à connaissance » vers le citoyen par la mise à disposition, via internet, des bases de données et des outils nécessaires à la constitution de cartes informatives sur le niveau du risque encouru par le citoyen (mais aussi dans un proche avenir pour l'assureur désireux de fixer a priori le niveau de la police d'assurance).

- Récupération des résultats de simulation dans un SIG : Ce premier niveau n'exige que le développement d'une passerelle entre un outil de modélisation et un SIG de façon à récupérer sous forme de points ou d'images les résultats de la simulation et les faire entrer comme couche d'information dans le SIG.
- Activation de simulation dans un SIG et récupération des simulations : Ce second niveau exige une parfaite intégration des outils de modélisation dans le SIG. On commence à trouver sur le marché des outils proposant ce genre de produit sans exigence particulière de développement. C'est notamment le cas de MIKE INFO Coast (MIC) développé par l'Institut Hydraulique Danois (*Danish Hydraulic Institute*). Ce produit, sur la base du système ArcView, permet d'entrer, de modifier, d'analyser, de visualiser plusieurs sources de données sur le milieu côtier et surtout de communiquer avec les modèles MIKE 21 et LITPACK du DHI. Ces modèles permettent de prédire la houle et les courants associés, le transport de sédiments non cohésifs par la houle et le courant, le transport par dérive littorale, l'évolution du trait de côte, le développement de profils en zone côtière. Le couplage entre le SIG et le modèle est transparent dans les deux sens : les modèles peuvent recevoir les données pour le calage d'un modèle numérique de terrain et en retour transmettre les résultats de la modélisation (par exemple l'évolution du trait de côte).

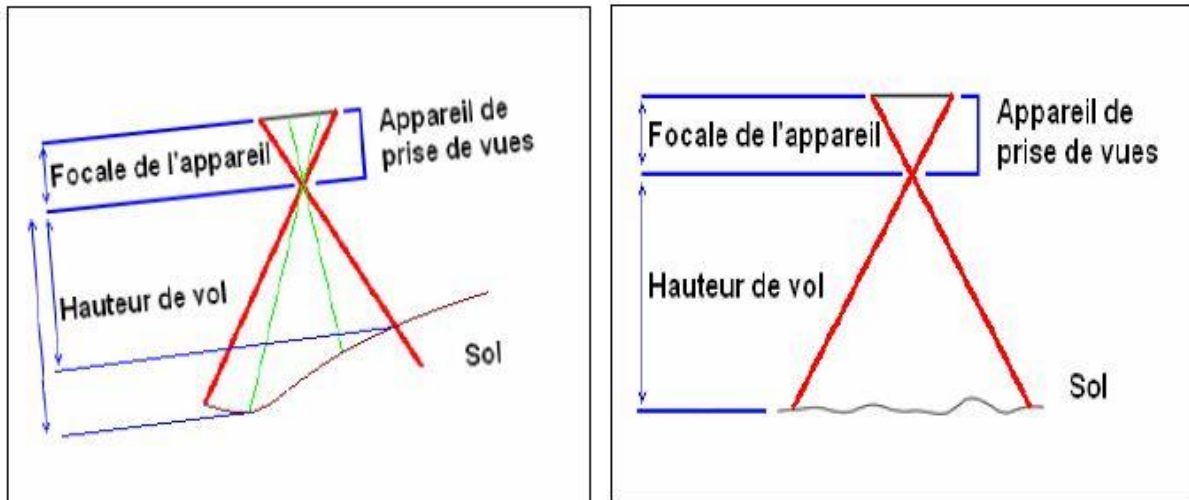
## **5. Traitement des photos aériennes et des images satellitaires de Google earth sous l'angle de la géomatique**

Le thème choisi nous a amené proposer et à sélectionner un certain nombre de techniques fiable pour l'élaboration de ce travail. Ces techniques sont présentées de manière globale.

### **5.1. Histoire de la photographie aérienne et sources d'erreurs**

La photographie aérienne constitue un outil de base pour la compréhension et l'interprétation des différentes positions de la ligne de rivage. Cette méthode a été déjà prouvée par plusieurs auteurs dans leurs travaux de recherches [[Bouakline, 2009](#) ; [Rabehi, 2018](#)], elle nécessite une mise en œuvre de techniques de traitement et d'analyse dont les principales étapes sont décrits brièvement comme suit :

- Les photographies aériennes représentent en général des distorsions qui peuvent avoir plusieurs causes (Fig.1) et qui sont dues à des changements d'altitude d'avion, déterminant des variations d'échelle d'une photo à l'autre, les variations des reliefs entraînant une distorsion radiale et l'inclinaison de l'axe optique par rapport à la surface terrestre.



**Figure 1** : Schéma illustrant les sources de déformation des photos aériennes.

### 5.1.1. Rectifications externes

Les images numérisées contiennent diverses déformations inséparables au mécanisme de prise de vues, à l'altitude de l'avion et au relief survolé, qu'il est nécessaire de les corriger afin de comparer les traits de côte extraits les uns aux autres. La rectification planimétrique (2D) corrige les distorsions radiales liées à l'optique et celles causées par les mouvements de l'avion (tangage, roulis, changement d'altitude [Moore, 2000]). Elle implique l'application d'un modèle de rectification par la saisie de points homologues (amers) entre deux images, l'une étant l'image à corriger, l'autre une image déjà géo-référencée.

Les ortho-photographies résultent d'une rectification 3D qui corrige les déformations verticales liées au relief, importantes en milieu continental, modérées sur le littoral [Bouakline, 2009].

### 5.1.2. Rectifications internes (correction de l'image)

La représentation d'une image sur écran est importante pour une bonne photo-interprétation d'où l'importance de l'amélioration radiométrique d'une image dans l'amélioration de son aspect visuel.

Les améliorations sont basées sur l'examen de l'histogramme de chaque image afin d'atténuer les effets indésirables pour les images satellitaires de Google Earth téléchargées à l'aide de logiciel terra-incognita.

## **6. Principe de fonctionnement du système GPS**

Le système GPS fournit le positionnement d'un point dans un référentiel géodésique. Son principe repose sur la réception et l'exploitation de messages émis par un ensemble de satellites. Dans un premier temps, un récepteur GPS capte les signaux émis depuis l'espace.

Ensuite, il décode et interprète ces informations pour calculer une position. Ce calcul est basé sur l'estimation de la distance  $D$  séparant le récepteur GPS d'un satellite observé. Le point GPS se situera donc sur la sphère de rayon  $D$ , centrée sur le satellite. L'intersection de trois sphères de ce type permet, en théorie, de déterminer une position dans les trois dimensions du repère avec une précision de l'ordre métrique [*Desmazes, 2005*].

Cette précision du GPS peut en outre être accrue en faisant intervenir une station de référence (un récepteur GPS installé sur un point dont les coordonnées sont connues avec précision).

Les mesures d'un mobile (un récepteur GPS itinérant) sont corrigées a posteriori (au cours d'un post-traitement), de sorte qu'une précision de quelques centimètres peut être atteinte, selon le type des récepteurs GPS employés. Cette méthode différentielle peut également être utilisée en temps réel. Elle suppose cependant que l'on dispose d'un moyen de communication (radio, Natel / GSM, etc.) entre la station de référence et le mobile selon le type des mesures GPS employées (code ou phase), on parle alors de GPS différentiel (ou DGPS) d'une précision de niveau métrique ou de cinématique en temps réel (Real-Time Kinematic, RTK) d'une précision de niveau centimétrique.

## **Conclusion**

L'insertion de la géomatique dans l'étude des risques permet de rationaliser l'approche risque depuis les niveaux locaux jusqu'à des niveaux régionaux. L'objectivité de l'approche met au service de la collectivité des arguments fiables pour connaître et gérer le risque en s'appuyant sur des données multi-scalaires de plus en plus précises améliorant les prévisions, l'information auprès des citoyens et la localisation plus judicieuses des biens et des personnes, voire leur déplacement dans certains cas.

De la connaissance à la gestion, l'ensemble du processus décisionnel se trouve optimisé par le recours aux outils de la géomatique qui imposent un renouveau méthodologique et une vision

plus quantifiée de l'espace géographique et des systèmes générateurs d'espaces géographiques.

## **Chapitre 2 : Généralités sur la zone d'étude**

**Introduction**

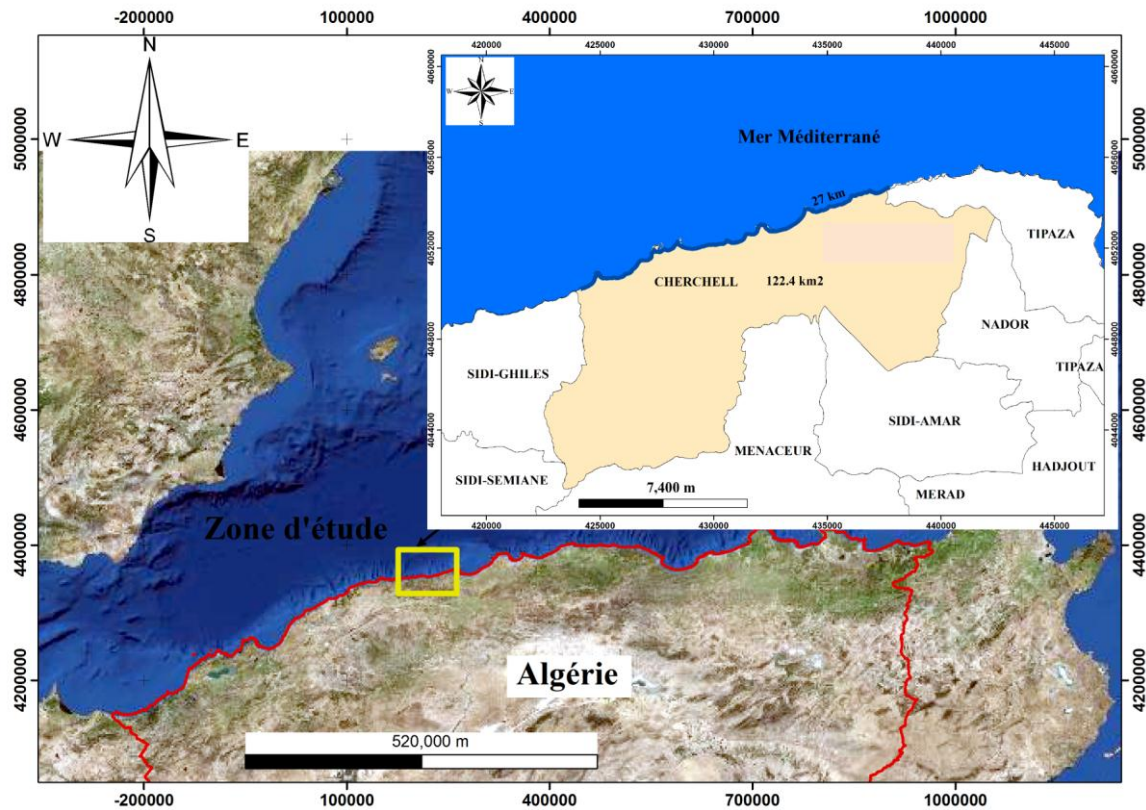
Le but principal de ce chapitre est de décrire et caractériser la zone d'étude sur tous les plans. Pour ce faire, il est nécessaire de replacer la zone d'étude dans son contexte géographique, géomorphologique, géologique, sismo-tectonique, climatique, hydrologique, hydrogéologique, hydrodynamique, morpho dynamique et sédimentologique afin de pouvoir recenser les processus responsables de son évolution. L'étude de ses composantes nous renseigne sur les conditions subaériennes ou continentales ainsi que les conditions marines générales responsables de l'évolution des unités géomorphologiques disposées le long du littoral.

**1. Cadre administratif et géographique**

Cherchell est une commune côtière, située à environ 76 Km à l'Ouest de la capitale Alger et à 19 km de Tipaza son chef-lieu de wilaya, considérée comme l'une des anciennes villes d'Algérie, dont une grande partie est montagneuse, avec une façade maritime de 27 km, dont 7 km environ urbanisé, son domaine littoral est de 6138,90 ha. Son linéaire côtier est réparti en falaises hautes et côtes rocheuses (70%) et de petites criques et plages (30%).

Administrativement, Cherchell est le chef-lieu de daïra et les communes lui incombant sont : Cherchell à l'Est, Sidi Ghiles au centre, Hadjret Ennous à l'Ouest et Sidi Semiane au Sud. La commune de Cherchell est limitée au Nord par la mer Méditerranéenne, au Sud par les communes de Menacer et Sidi Amar, à l'Est par Tipaza et Nador et à l'Ouest par Sidi Ghiles et Sidi Semiane (Fig.2).

La commune de Cherchell est constituée d'un patrimoine historique important et plusieurs infrastructures. La conjugaison des formes géomorphologiques ; plages, criques, baies, côtes rocheuses et falaises offrent à ce rivage d'indéniables possibilités touristiques. Ces dernières années, la commune de Cherchell assiste à un développement considérable concernant l'extension urbaine avec des infrastructures et aménagement nouveaux.



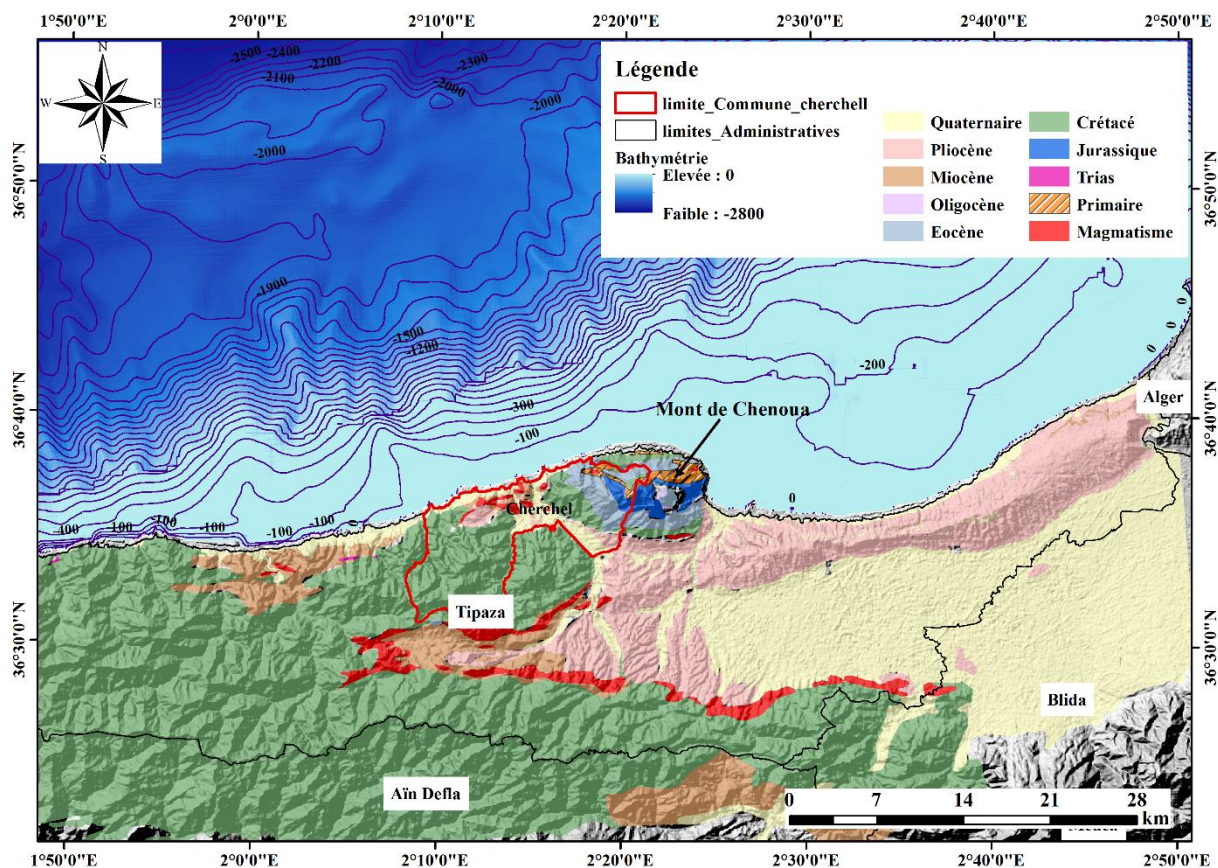
**Figure 2:** Localisation géographique et découpage administratif de la commune de Cherchell.

## 2. Cadre géologique

### 2.1. Géologie de la région de Tipaza

La région de Tipaza, du point de vue géologique, renferme des formations allant du paléozoïque à l'Actuel. Elles sont de natures métamorphique, magmatique et sédimentaire. Les formations d'âge quaternaire et Pliocène domine à l'Est (Fig.2). Cette partie est tectoniquement moins affectée, et sa morphologie est presque plate, la largeur importante de la marge continentale de la partie Est de Tipaza est probablement responsable de cette configuration, due à la présence du bloc sous-marin en face du sahel, qui absorbe une bonne partie de l'activité tectonique de la région, ce bloc est connue sous le mon la Banc de Kheir EL Dine.

Les formations d'âge crétacé domine à l'ouest avec des affleurements du Jurassique et du Primaire dans le massif de Chenoua (Fig.3), cela témoigne de la tectonique active de la partie ouest où de nombreux reliefs à pente raide apparaissent, ce qui a favorisé l'érosion des couches surfaciques d'âge moi-plio-quaternaire. La tectonique active de la région ouest de Tipaza marque une continuation en mer ou les isobathes sont très serrés, et la marge continentale est très étroite (< 4 km).



**Figure 3 :** Géologie de la région de Tipaza et ces environs extraite de la carte géologique de l'Algérie (1/50000) feuille N° 39 modifié [Flandrin et Claracq, 1952].

## 2.2. Géologie locale de Cherchell

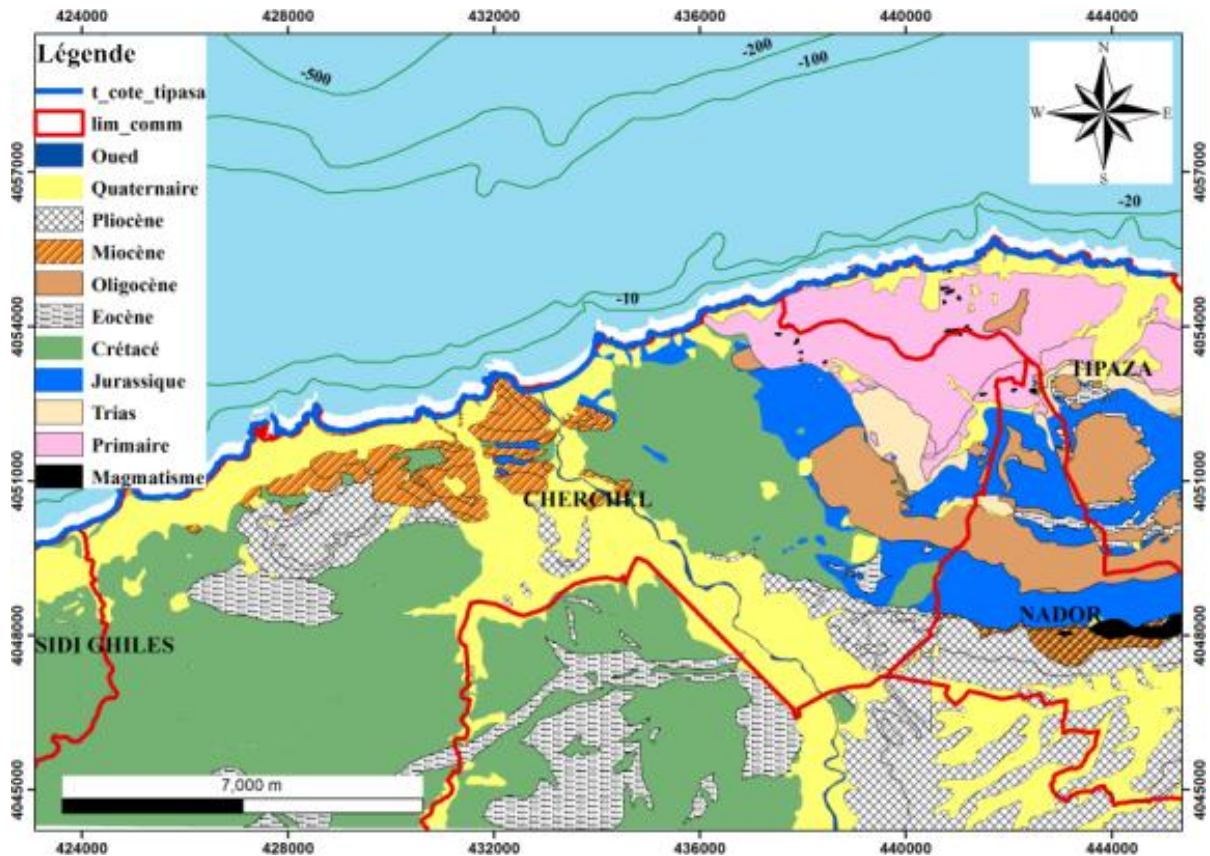
La connaissance de la géologie et de la géomorphologie locale de la zone d'étude permet de définir sa sensibilité face aux agressions marines. Du point de vue géologique, on distingue quatre formations dominantes [CGS, 2009] (Fig.4, 5) :

Les formations d'âge quaternaire et actuel sont constituées par des dépôts d'oueds et sables de plages, alluvions récentes, formations dunaires consolidées (terrasses marines) et alluvions anciennes.

Les formations d'âge tertiaire, représentées par les dépôts néogènes (pliocènes et miocènes moyens et inférieurs) et paléogènes (Oligocènes).

Les formations d'âge secondaire, représentées essentiellement par les formations du Crétacé (supérieur et inférieur), Jurassique et Trias.

Les formations d'âge primaire, représentées essentiellement par le Permien (conglomérat, grès et argiles) et le Dévonien (schistes noirs et roches éruptives).



**Figure 4 :** Géologie de la région de Cherchell et ces environs, extraite de la carte géologique de Dahra oriental (1/50000) feuille N° 39 modifié [Flandrin et Claracq, 1952].

### 2.2.1. Les formations d'âge quaternaire

#### 2.2.1.1. L'Actuel

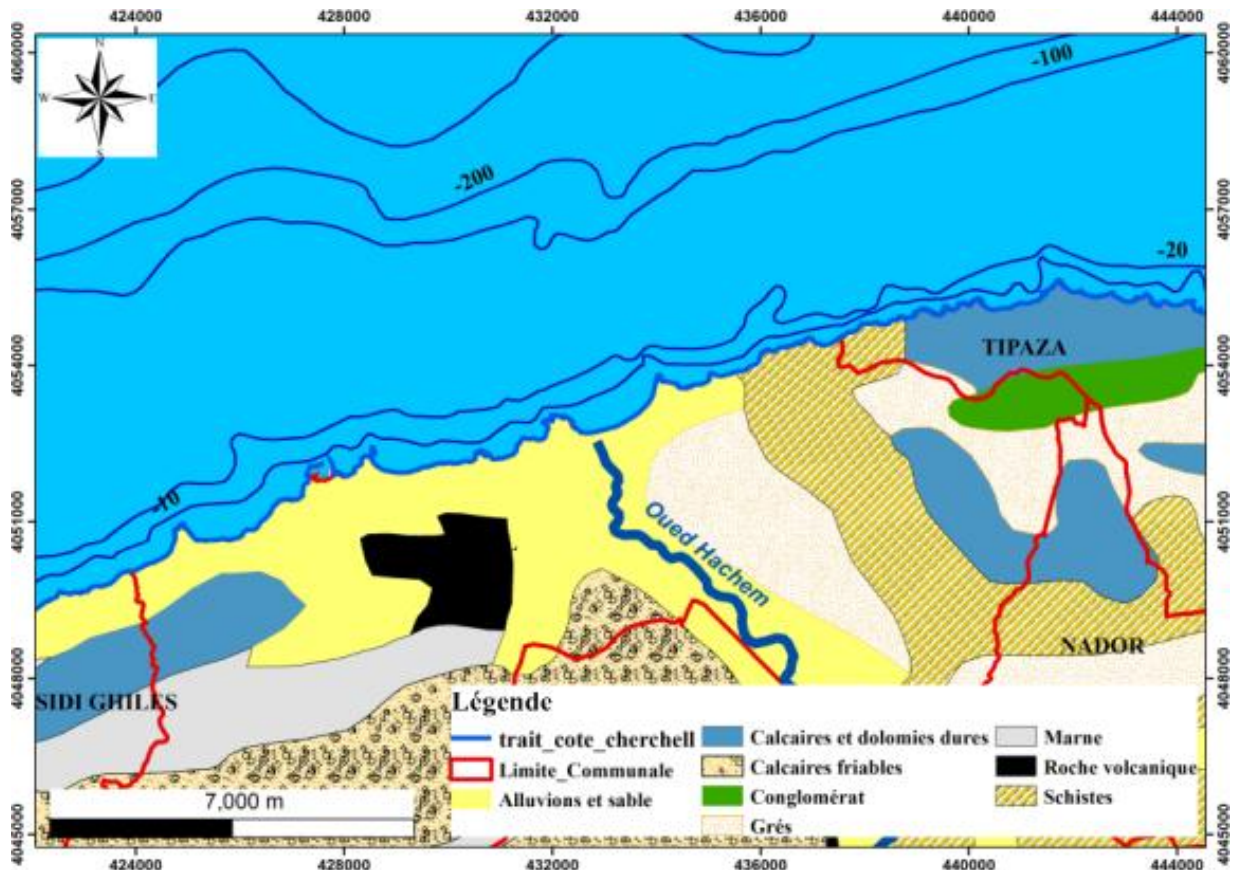
On rencontre les sables de plages, pratiquement tout au long de la côte et des dépôts d'oueds, des limons et cailloutis (Oued El Hachem et Oued El Bellaa) [Flandrin et Claracq, 1952].

#### 2.2.1.2. L'Holocène

Représenté par des alluvions récentes, ce sont des alluvions de fond des vallées d'Oued El Hachem et Oued El Bellaa, formées de limons, de sables, d'argile et de graviers. Ces dépôts peuvent atteindre 30 mètres d'épaisseur [Flandrin et Claracq, 1952].

#### 2.2.1.3. Le Pléistocène

Représenté par des formations dunaires consolidées (terrasses marines) et alluvions anciennes [Daloni, 1940].



**Figure 5 :** Lithologie de la région de Cherchell extraite de la carte géologique de Dahra oriental feuille N°39 modifiée [Flandrin et Claracq, 1952].

**a) Les formations dunaires consolidées (terrasses marines)**

Sont des formations d'origine marine tyrrhéniennes, siciliennes et calabriennes. Dans le site d'étude, ces terrasses marines sont décrites en trois niveaux selon l'altitude. On rencontre des terrasses tyrrhéniennes à 15 et 20 mètres d'altitudes, siciliennes à 30 – 60 mètres et calabrienne 90 – 100 mètres. Elles sont formées de grès, poudingues et mollasses à coquilles marines. Ces terrasses marines représentent d'anciennes lignes de rivage (la terrasse 90 – 100 mètres représentant les traces du rivage de la mer calabrienne). Ces terrasses marines présentent des petits affleurements le long de la côte [Betrouni, 1983].

**b) Les alluvions anciennes**

Elles sont représentées par des terrasses alluviales et dépôts de pente formées de cailloutis appartenant à des cônes de déjection. Ces cailloutis composés de matériel provenant de l'Atlas, probablement d'âge villafranchien correspondant à la phase de remblaiement de la fin du cycle pliocène, son équivalent marin est le Calabrien. Ces formations se rencontrent essentiellement sur la bande côtière de Cherchell, limitées au sud par des formations tertiaires ou secondaires [*Betrouni, 1983*].

**2.2.2. Formations d'âge tertiaire**

On distingue les formations néogènes et paléogènes [*Flandrin et Claracq, 1952*].

**2.2.2.1. Le Néogène**

**a) Le Pliocène Supérieur / Aastien**

Formé par des bancs calcaires sableux, jaunâtres, friables avec des lits plus sableux, calcaires coquilliers avec Lamellibranches. Il affleure au sud de Cherchell sur un plateau à plus de 150 mètres d'altitude. On rencontre également le faciès de l'astien sur la rive droite d'Oued El Hachem au Sud du massif de Chenoua et entre Oued El Hachem et Oued El Bellaa [*Flandrin et Claracq, 1952*].

**b) Le Pliocène inférieur / Plaisancien**

Caractérisé par des marnes bleues dont l'affleurement est restreint, au Sud de Cherchell. Le pliocène (Astien et Plaisancien) représente la terminaison Ouest du sahel, d'où l'on remarque l'extension restreinte de ces formations qui laisse place à la prédominance du miocène post-nappe et les formations secondaire et primaire (les flyschs et nappes telliennes) [*Flandrin et Claracq, 1952*].

**c) Le Miocène Moyen**

Il est formé d'un faciès grés-conglomératique et marneux associé à des formations volcano sédimentaires et volcaniques. Il s'agit de tufs volcaniques et de coulées. Ces formations affleurent dans la partie centro-Ouest et sur le littoral du site d'étude [*Flandrin et Claracq, 1952*].

**2.2.2.2. Le Paléogène**

**a) L'Oligocène**

L'oligocène occupe une large étendue au niveau du massif de Chenoua. Dans la zone d'étude il est représenté par des grès et des marnes sableuses à l'Est et des marnes et calcaire à l'Ouest [*Flandrin et Claracq, 1952*].

### **2.2.3. Formations d'âge secondaire**

#### **2.2.3.1. Le Crétacé Supérieur**

Ce sont des formations de flyschs, composées d'un faciès monotone de marnes schistoïdes et de lentilles calcaires, affleurant en majeure partie à l'Est du site d'étude. Ces formations sont sujettes aux instabilités de terrain [*Flandrin et Claracq, 1952*].

#### **2.2.3.2. Le Crétacé Inférieur**

C'est un faciès Tellien de l'unité supérieure, ce sont des terrains d'âge crétacé inférieur (Néocomien à Albien), il s'agit de niveaux les plus anciens, marqués par une schistosité. Le crétacé inférieur occupe une large étendue dans la partie ouest du site d'étude [*Flandrin et Claracq, 1952*].

#### **2.2.3.3. Le Trias**

Il est formé d'argiles et pélites rouges avec calcaires, il affleure à l'Est du site d'étude. C'est un faciès rencontré dans le massif de Chenoua [*Flandrin et Claracq, 1952*].

### **2.2.4. Les formations d'âge primaire**

On rencontre les formations du Permien, Dévonien et Ordovicien [*Flandrin et Claracq, 1952*].

#### **2.2.4.1. Le Permien**

Il est formé de conglomérats à éléments siliceux, grès variés et argiles rouges. Il affleure dans la partie Est de la zone d'étude. C'est un faciès du massif de Chenoua [*Flandrin et Claracq, 1952*].

#### **2.2.4.2. Le Dévonien**

Il est formé de schistes noirs, micro-brèches à tentaculites, il affleure à l'Est et sur le littoral du site d'étude. Ces formations présentes des pentes assez fortes [*Flandrin et Claracq, 1952*].

#### **2.2.4.3. L'Ordovicien**

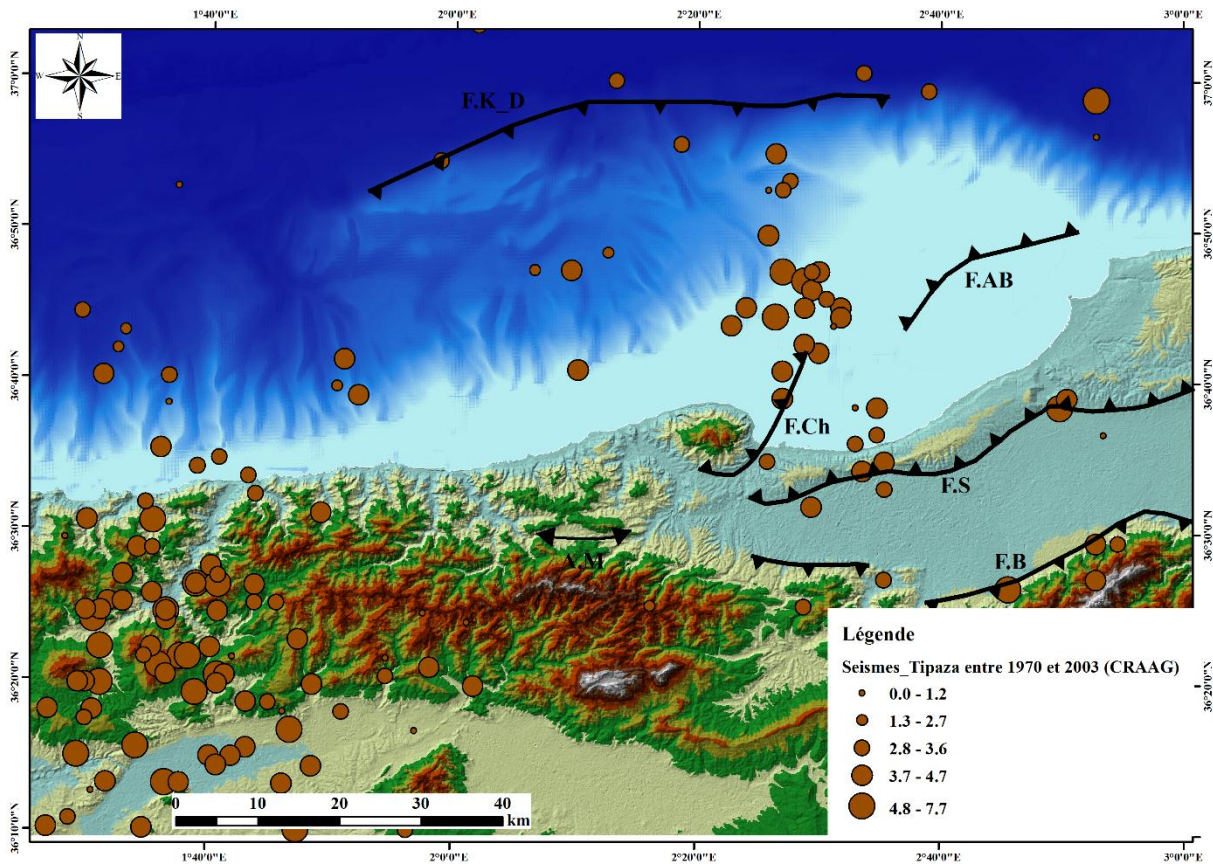
Représenté par des roches volcaniques (dolérites), affleurent en petites auréoles près du littoral dans les formations du dévonien [*Flandrin et Claracq, 1952*].

### **2.3. Sismotectonique de la région de Tipaza et ses environs**

Du point de vue tectonique, la zone d'étude appartient au domaine de Dahra oriental, où l'on rencontre des terrains allant de l'Actuel aux primaires. La zone d'étude est affectée par trois phases de plissements : d'âge Éocène, Oligo-miocène et Plio-quatenaire [*CGS, 2009*].

### 2.3.1. Les failles

La région de Tipaza est bordée par plusieurs failles, mais on s'intéresse à celles qui traversent la zone d'étude et qui sont : la faille de Menacer au sud, la faille dite Sud Mitidjien au sud-est, la faille du Sahel à l'Est, et la faille de Chenoua à l'ouest et la faille de Kheir Eddine en mer [CGS, 2009] (Fig.6).



**Figure 6** : Tectonique de la région du Tipaza : la séismicité entre 1970 et 2003 ainsi les grandes failles de la zone [CGS, 2009].

#### a) Faille de Chenoua (Tipaza)

Elle constitue la limite entre la morphostructure de surrection de Chenoua et le bassin de subsidence de la Mitidja. Cette faille à une orientation NE – SW [Maouche, 2002], s'étend sur une longueur d'environ 50 km [Domzig, 2006].

#### b) Faille de Menacer

Elle est interprétée comme un système de failles aveugles. Elle aurait une longueur de 46 km, sa longueur de rupture doit être supérieure à 20 km. Les magnitudes maximales assignées à cette faille sont comprises entre  $M=6,5$  et  $M=7,3$  [Maouche, 2002].

**c) Faille du Sahel**

Marque l'interface entre le bassin de Mitidja au sud et le Sahel d'Alger au Nord. Sa longueur est de 63 km et se prolonge depuis le mont Chenoua, jusqu'au massif de Bouzaréah [*Boudiaf, 1996; Glangeaud et al., 1952; Saoudi, 1989*].

**d) Faille de la Mitidja Sud (Blida)**

Représente la partie orientale de la frontière nord du domaine de Boumaad-Medea-Isser. Sa longueur est d'environ 50 km. Cette faille est segmentée et la longueur des segments varié entre environ 7 à presque 20 km. Les magnitudes maximales des séismes probables à cette faille sont comprises entre  $M=6,5$  et  $M=7,3$  [*Maouche, 2002*].

**e) Faille de Kheir Eddine**

S'étend au pied de la marge au large de Tipaza et représente la plus grande structure active de la zone, sa longueur est de 80 km. Le plus fort taux de raccourcissement horizontal à long terme est celui de la faille de Kheir Eddine et est estimé à  $0,41 \pm 0,1$  mm/an, avec une magnitude maximale de 7,3, ce qui fait de ce chevauchement l'une des structures avec un des plus forts potentiels sismogéniques de la région [*Domzig, 2006*].

La plupart des failles cartographiées dans la région de Tipaza représentent un véritable danger en matière d'aléa sismique mais aussi des aléas associés tels que les tsunamis et les glissements.

**2.3.2. La Sismicité**

Le Sahel marque une zone sismique très active de l'Algérie du Nord. Il a connu dans son passé des séismes majeurs destructeurs et meurtriers (1365, 1674, 1716, 1825, 1867, 1924) faisant des dizaines de milliers de morts. Par ailleurs, avec ses plus récents séismes, Mont de Chenoua (1989), Tipaza (1990), Alger (1996) et Boumerdes (2003) (Fig.7), de nouvelles sources sismogènes sont déterminés, mettant ainsi, l'accent sur le risque majeur que peuvent encourir toutes les villes limitrophes et plus particulièrement la capitale du pays. De plus l'activité sismique enregistrée ces dernières années entre Alger-Tipaza est particulièrement concentrée en mer, témoignant d'un prolongement des failles actives vers la marge continentale [*CGS, 2011*].

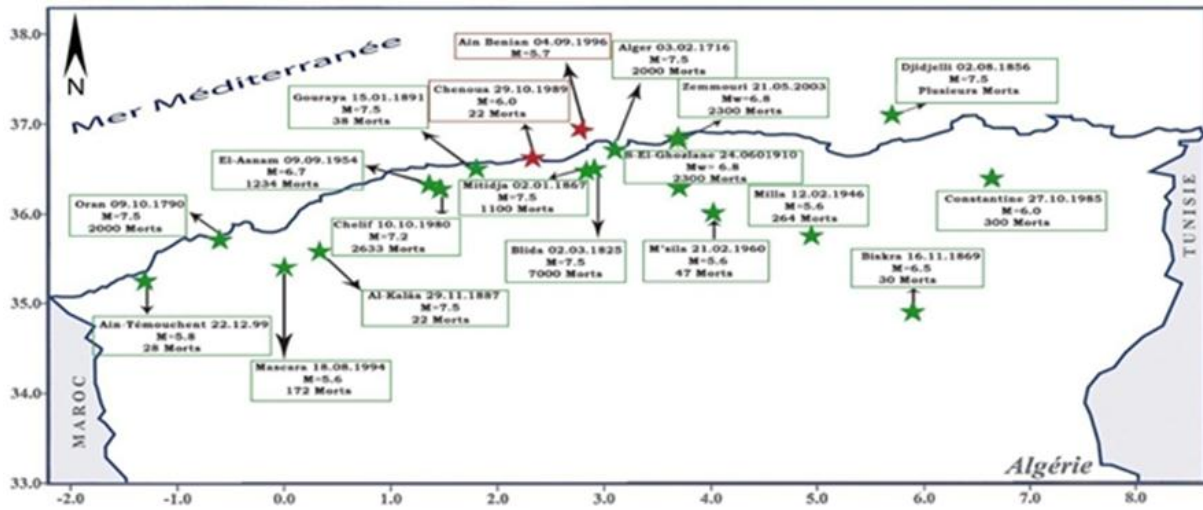


Figure 7 : Séismes majeurs de l'Algérie du Nord entre 1365 et 2003 [CGS, 2011].

### 2.3.2.1. Sismicité historique

La sismicité historique montre que la région de Tipaza a été le siège d'une sismicité modérée parfois destructive. On citera les événements de Cherchell en 3 décembre 1735 qui auraient causé la mort de 250 personnes, Hadjout en 1756, Kolea en 1802 et 18 juin 1847, Gouraya 1891, Cherchell le 19 août 1966 fortement ressentis dans cette zone. Ces séismes ont occasionné des dégâts le long de la côte entre Alger et Tipaza. Cette sismicité est souvent accompagnée par des glissements de terrain et des éboulements [Meghraoui, 1991].

Certains de ces séismes en engendrer des tsunamis affectant les cotes algériennes qu'au européennes. Parmi les séismes qui ont engendré des tsunamis : le séisme du 2 janvier 1365 qui a inondé la ville d'Alger [Ambraseys et Vogt, 1988], et plusieurs d'entre eux furent localisés dans la région de Cherchell-Tipaza, séisme de 17/3/1756 (Intensité VII-VIII), 8/11/1802 (Intensité VIII) et 18/6/1847 (Intensité VII). Ces séismes sont supposés avoir eu lieu sur la même structure : Mont du Chenoua [Meghraoui, 1991]. La récurrence de ces séismes sur la région d'Alger semble de l'ordre de 20 à 50 ans pour les séismes modérés (Intensité < IXe) alors que les gros séismes, d'intensité > IXe, semblent se produire tous les ~350 ans [Meghraoui, 1991].

Plus à l'ouest, on peut également mentionner le séisme du 15 janvier 1891 à 3 h 55 minutes, d'intensité XI, localisé en mer [Maouche, 2002]. Ce séisme endommagea très fortement les villes de Gouraya et Larhat ainsi que toutes les localités environnantes, provoquant également de nombreux glissements de terrain et éboulements.

### 2.3.2.2. Sismicité instrumentale

#### a) Séismes d'El Asnam de 1954 et 1980

Les séismes déstructurent qui ont lieu au Nord d'Orleansville (actuellement Ech Cheliff) le 09/09/1954, de magnitude  $M : 6,7$  [Rothé, 1955] et d'intensité X, et de 10/10/1980 de magnitude  $M_s: 7,3$  suivis d'une réplique également destructrice de magnitude  $M_s : 6,1$  [Campos, 1991], des tsunamis ont également eu lieu après les 2 séismes de 1954 et 1980, et touchèrent les côtes espagnoles. Dans ce cas, ce n'est pas le déplacement cosmique qui serait à l'origine du tsunami, la faille étant trop loin de la mer, mais le déplacement des sédiments en mer.

#### b) Séisme du Mont Chenoua du 29 octobre 1989

Près d'Alger, un séisme toucha le mont Chenoua le 29/10/1989 à 19 h 09 minutes ( $M_s=6,1 \pm 0,2$ , CRAAG,  $M_s: 5,9$  USGS) où l'intensité  $I_e=VIII$  (MSK) a été atteinte avec une direction NE-SO [Ambraseys et Vogt, 1988]. Toute la région de Tipaza (76 km d'Alger) fut touchée et il y eut 22 morts et 227 blessés, ainsi 50000 personnes sinistrées à Nador, où la plupart des bâtiments furent détruits [Bounif et al., 2003; Yelles et al., 2006]. D'importants dégâts eurent lieu également dans les villes de Cherchell et Tipaza. Des mouvements verticaux furent ressentis et des glissements de terrain eurent lieu. Le rayon de perceptibilité est de 160 km. Une vague anormale en mer fut aussi observée ainsi qu'un petit retrait de la mer (1 m) au port de Tipaza.

### 2.3.3. Sismicité offshore de l'Ouest de l'Algérois

L'activité sismique en mer est beaucoup plus difficile à cerner, en raison de la très faible densité du réseau sismologique permanent installé et du faible nombre d'études structurales détaillées. En effet, la carte sismotectonique de Meghraoui, [1988], ignore la déformation sous-marine. Les archives et les catalogues de sismicité [Ambraseys et Vogt, 1988; Benhallou, 1985; Rothé et al., 1955; Roussel, 1973; Vogt et Ambraseys, 1991] montrent que de nombreux et d'importants séismes se sont produits au large (environ 20 séismes entre 1365 et 1999 de magnitude estimée supérieure à 5). Dont on cite :

**Gouraya, 15 janvier 1891** : Il s'agit de deux chocs majeurs séparés de 12 secondes (Gouraya est à mi-chemin sur la côte entre Cherchell et Ténès). Plusieurs maisons se sont effondrées et il y a eu environ 40 morts. Sa magnitude a été estimée à 5,7 et son intensité maximale à IX [Maouche, 2002].

### **3. Cadre géomorphologique et topographique**

#### **3.1. Le système montagneux**

C'est un ensemble de reliefs et de plateaux continus et généralement homogènes, qui ne s'interrompent et ne s'atténuent qu'au niveau de ses extrémités sous des formations néogènes. L'ensemble de Bou Zerou (1097 m), commence à partir de l'oued Damous à l'ouest et se termine par Djebel Boumâad à l'Est formé par des reliefs plus étroits. L'ensemble de Boumâad (1415 m) et les reliefs littoraux de Cherchell se caractérisent d'abord par son enclavement, par l'étroitesse des lignes de crête, par la brutalité des pentes (généralement supérieures à 30%) et par la densité du couvert végétal. Les reliefs de cette zone sont relativement élevés, l'altitude varie ici de 700 à 1200 m, mais ils peuvent atteindre des valeurs de l'ordre de 1300 m et plus, exp de Djebel Boumâad (1415 m). Vers le littoral de Cherchell, les altitudes sont généralement assez faibles, elles descendent à moins de 500 m.

La topographie de cette unité est fortement marquée par le caractère accidenté des reliefs, ceci est sans doute le résultat des fortes dénivellations entre les sommets qui atteignent des altitudes de l'ordre de 700 à 800 m et les bas-fonds d'oueds ou bien la mer qui se trouve juste en contrebas des versants abrupts. Le relief dans cette unité culmine à 904 m d'altitude dans le Djebel Lalla Tefouredj. Au sud du Chenoua et au contact des oueds Nador et El Hachem, le relief s'estompe et donne lieu à de vastes vallées, tandis qu'au nord ce niveau est interrompu brutalement par la mer ou par des niveaux de terrasses marines développées sur des terrains d'altitude variable allant de 10 à 80 m (Fig.8).

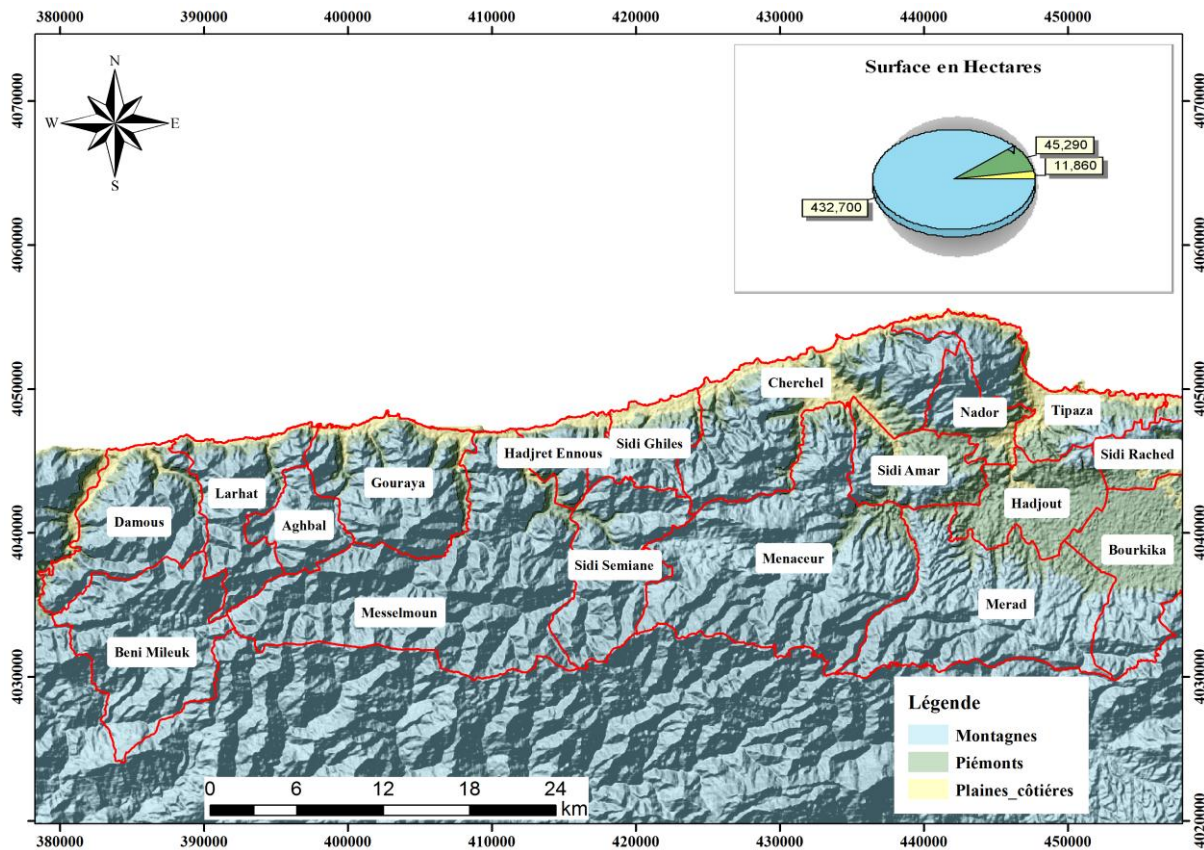
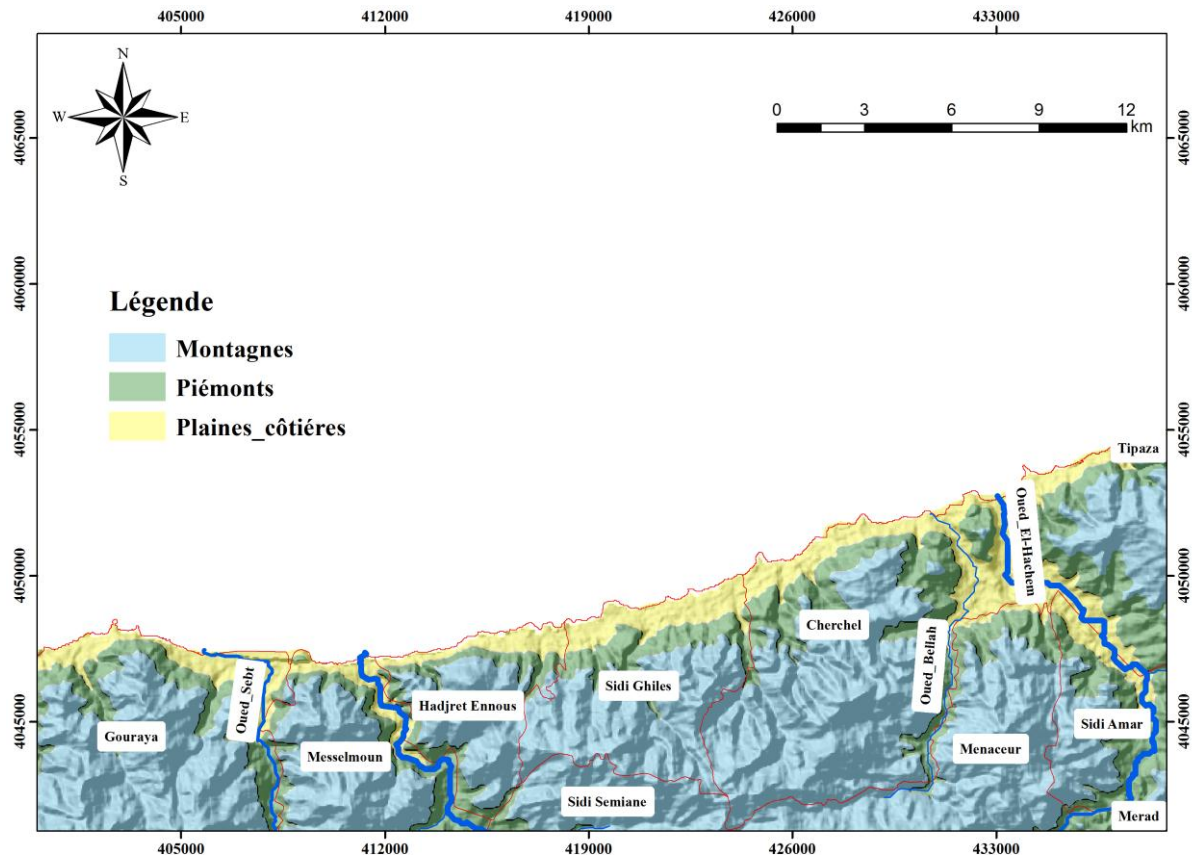


Figure 8 : Reliefs dominants de la région de Cherchell.

### 3.2. Plaines côtières

Le long de la côte entre oued El Hachem et Gouraya, c'est-à-dire sur près de 40 km, une plaine côtière basse, dont l'étendue perpendiculairement au rivage peut atteindre 1000 m, elle est faiblement inclinée vers la mer et se termine au-dessus d'elle par des falaises à pic de 10 à 20 m ; cette faible inclinaison contraste d'une façon saisissante avec la raideur des pentes qui la dominant au Sud. L'altitude du bord supérieur est d'ailleurs variable et peut dépasser 40 mètres.

La plaine d'oued El Hachem du type alluvial, issue des dépôts provenant des versants de l'ensemble du Chenoua et les reliefs littoraux du Cherchell, correspond à un chenal à remplissage quaternaire qui repose en discordance sur un substratum marneux créacé ou calcaire Éocène et qui se termine par la plage Hamdania (plage des trois îlots) (Fig.9).



**Figure 9 :** Plaine côtière entre Gouraya et Oued El Hachem.

### 3.3. La côte

La façade maritime du littoral de Cherchell s'étend sur 27 Km, elle est dominée par des côtes rocheuses à hautes falaises sur environ 70% du littoral, et de nombreuses petites plages (30%), offrant un aspect contrasté dans l'organisation de ses structures et de ses paysages morphologiques.

Malheureusement la côte Est de Cherchell, particulièrement la région de Hamdania et Bellaa, est choisie comme une assiette pour la construction de futur méga port Centre. Ce projet diminuera les capacités touristiques de la région mais aussi de dénaturer complètement le site, dans ce cadre, l'étude de réalisation du port prévoit la déviation du cours des deux oueds El Hachem et El Bellaa. Ces derniers se déversent au niveau des plages Hamdania et Bellaa, ce qui provoquera forcément d'autres contraintes d'érosion, et détruit l'aspect naturel de la région.

### **3.3.1. Les falaises**

Dans notre zone d'étude, deux types de falaises peuvent être mis en évidence selon la lithologie : les falaises entaillées dans des roches dures et celles des falaises entaillées dans des roches tendres.

#### **a) Les falaises entaillées dans des roches dures**

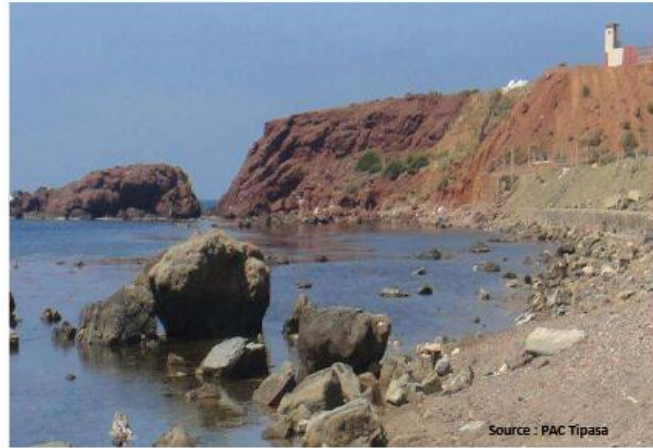
Elles sont entaillées dans des roches dures du type calcaire gréseux, coulées et tufs, hautes de 10 m à 40 m, on les rencontre d'Est en Ouest au niveau de Rochers Blancs, Pointe Riad, et Cap Tizirine. Ces falaises sont vives, malgré leur apparence de dureté, elles sont très affectées par les variations de température, les pluies et les vagues de tempête, ces falaises laissent devant elles de petites plages (encoches ou crique) (Fig.10).



**Figure 10** : Falaise dure de Cap Blanc [*PAC, 2016 in DGPC, 2017*].

#### **b) Les falaises entaillées dans des roches tendres**

Ces falaises sont entaillées dans des marnes et grés du miocène, sont rencontrées près de la ville de Cherchell et de Cap Rouge ; leurs hauteurs sont respectivement de 10 m et 20 m, et sont affectées par la gravité et l'infiltration d'eau de pluie et sont propices aux glissements de terrain, effondrements, et éboulements (chutes de blocs et de pierres) favorisant l'alimentation des plages (Fig.11).



**Figure 11** : Falaise tendre de Cap Rouge [*PAC, 2016 in DGPC, 2017*].

### c) Les côtes rocheuses

Les côtes rocheuses sont localisées dans la partie Est du site d'étude ; leurs longueurs varient entre 400 m à 1500 m, avec une altitude moyenne de 7 m, on retrouve d'Est en Ouest, la côte rocheuse d'Oumazar, côte rocheuse de Hamdania, côte rocheuse de Bellaa et la côte rocheuse de Sidi Braham (Fig.12).



**Figure 12** : Côte rocheuse de Cherchell [*PAC, 2016 in DGPC, 2017*].

### 3.3.2. Les plages

Le secteur de Cherchell est composé de 8 plages, d'une longueur qui varie entre 350 m et 2250 m et d'une largeur qui varie de 40 m à 100 m, avec des pentes faibles (moins de 2 %) et des altitudes qui varient de 0 et 5 m. Les plages du secteur de Cherchell se caractérisent par des sables moyens, parfois accompagnés de matériaux grossiers. Ces sédiments parviennent sur les plages soit par les Oueds, la dérive littorale, ou bien par l'érosion des falaises. Ses plages sont d'Est en Ouest : Oumazar, Hamdania, Bellaa, Bourdj El Ghoula, Tizirine, Parc, Pointe Rouge et Centre (Fig.13).

Généralement les plages sont en forme de baie car elles sont toujours limitées par des caps, à l'exception des plages Tizirine et Parc qui sont rectilignes. La plage Hamdania est bordée de vestiges de dunes à la limite de disparition, en raison des installations touristiques (parkings) et des extractions de sable de lit d'oued et de la plage.



Figure 13 : Plages (à gauche Hamdania ; à droite Bellaa) [[PAC, 2016](#) in [DGPC, 2017](#)].

#### 4. Cadre Hydro climatologique

##### 4.1. Le climat

Le climat algérien est un climat de transition entre le climat tempéré humide et le climat désertique. Il varie de manière contrastée du type méditerranéen et semi-aride dans le nord vers le type désertique dans le Sahara. Le bassin algérois est sous l'influence de trois régimes climatiques : climat tempéré littoral, climat de l'atlas tellien et climat des hauts plateaux.

La région de Cherchell comme l'ensemble de la côte algérienne caractérisée par un climat méditerranéen subhumide ; relativement froid et humide en hiver, chaud et sec en été.

##### 4.1.1. Les précipitations

Le territoire de la wilaya de Tipaza du Nord au Sud reçoit des précipitations abondantes, irrégulières et inégalement réparties à la fois dans le temps et dans l'espace, parfois très violentes selon les mois et parfois les années, avec un volume et une intensité qui augmentent avec l'altitude et l'exposition. La zone côtière objet de notre étude est plus arrosée par rapport au reste du territoire de la wilaya, à cause de son exposition aux flux maritimes venant du Nord.

La répartition mensuelle des précipitations est caractérisée par l'irrégularité de leurs quantités ainsi que de leur intensité, une période pluvieuse qui s'étalant du mois de septembre au mois de mai ou le maximum de précipitation est enregistré au mois de novembre, décembre et

janvier avec une moyenne qui varie de 79 et 84 mm, et une période sèche allant du mois de juin à août où les précipitations n'excédant pas 8 mm. Le mois de juillet est le plus sec avec 1 mm de précipitations. La pluviométrie moyenne annuelle varie de 370,12 mm/an et 714,79 mm/an avec une moyenne de 573,68 mm/an pour la période allant de 2000 et 2015 selon l'agence nationale des ressources hydriques [Mohamed et Bensmaili, 2016]. La répartition saisonnière des pluies est d'environ 43% des pluies moyennes annuelles sont d'hiver, 28 % d'automne, 27,5 % de printemps et seulement 1,5 % des pluies en été [Mohamed et Bensmaili, 2016] (Fig.14, 15).

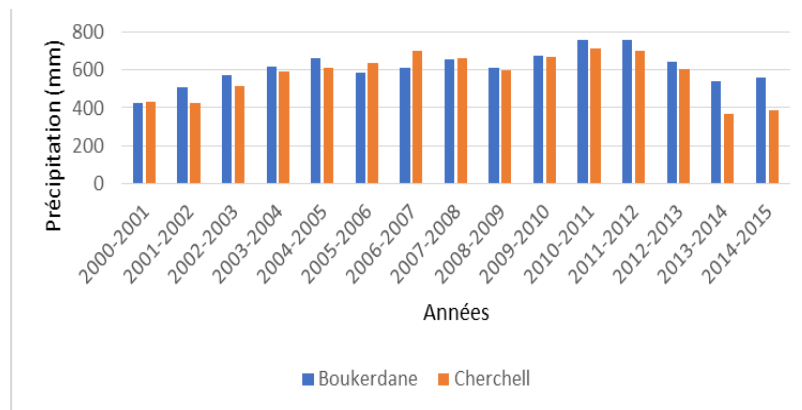


Figure 14 : Variation des précipitations annuelles au cours de la période 200-2015 dans la région centre de la wilaya de Tipaza [ANRH, 2015 in Mohamed et Bensmaili, 2016].

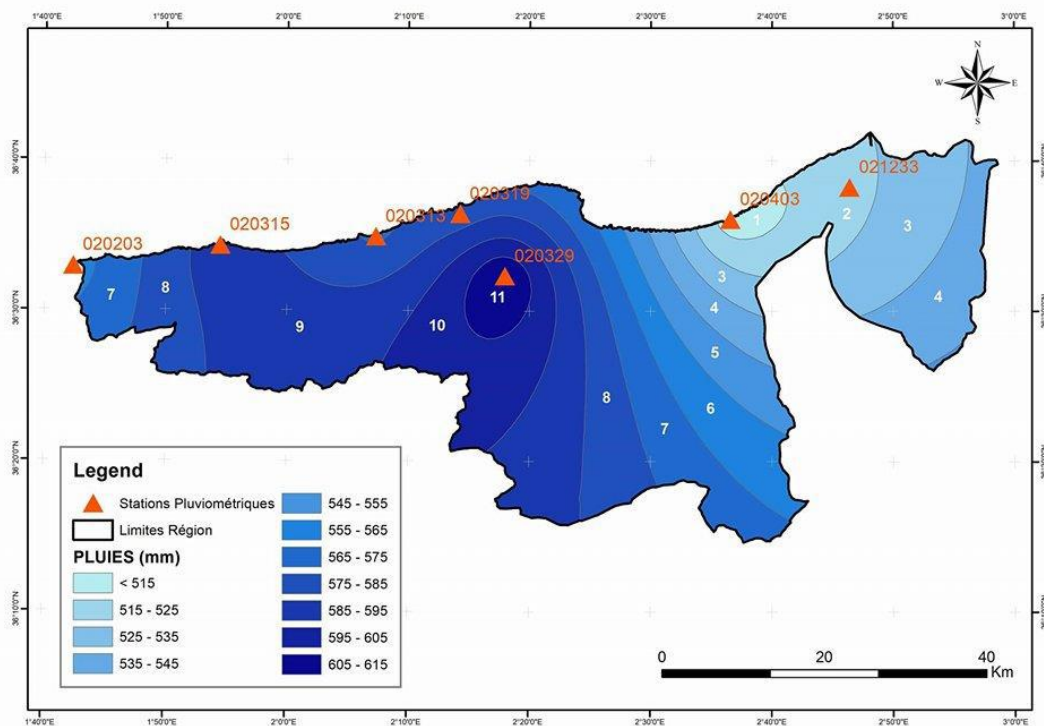
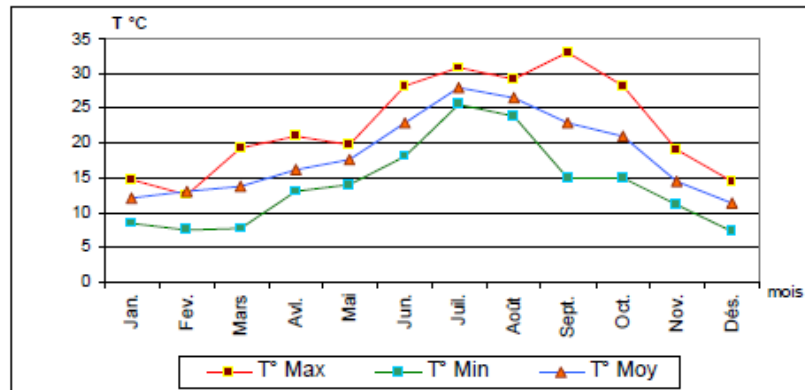


Figure 15 : Pluviométrie (moyenne annuelle) de la région d'étude [ANRH, 2015 in Mohamed et Bensmaili, 2016].

#### 4.1.2. Les températures

La température est le second facteur constitutif du climat influant sur l'environnement en général, c'est un élément primordial pour caractériser le climat régional. La température moyenne oscille de 11 et 26°C, mais les températures minimales et maximales sont de 6°C en hiver (janvier et février), 33°C en été (juillet et août) pour la période allant de 1998 et 2015 selon l'agence nationale des ressources hydriques [ANRH, 2015 in Mohamed et Bensmaili, 2016]. L'adoucissement des températures est sans doute lié à l'influence maritime (Fig.16).



**Figure 16 :** Températures (maximales, minimales et moyennes) dans la région de Cherchell [ANRH, 2015 in Mohamed et Bensmaili, 2016].

## 4.2. Hydrologie

La wilaya de Tipaza appartient au grand bassin versant du Côtier Algérois (code ANRH d'Alger n° 02-03), composé de 18 sous bassins versant et d'une superficie de 8 471 km<sup>2</sup>. Ce bassin versant comprend deux parties distinctes, le Côtier Algérois-Ouest (02 a) et le Côtier Algérois-Est (02 b). Notre zone d'étude appartient plus exactement, à la partie Ouest (Côtier Algérois-Ouest) dans le sous bassin versant de Côtier Cherchell selon le code de l'ANRH d'Alger (02-03).

Compte tenu de sa position géographique, la wilaya de Tipaza dispose d'un réseau hydrographique relativement important. On distingue d'Est en Ouest essentiellement Oued Mazafran, Oued Nador, Oued El Hachem, Oued El Bellaa et Oued Damous. Notre étude concerne d'Est en Ouest : Oued El Hachem et Oued El Bellaa.

### 4.2.1. Oued El Hachem

Il prend naissance dans l'atlas tellien dans les monts de Djebel Boumâad à environ 1400 m d'altitude, il prend une direction subméridienne (S-N), son bassin versant occupe une superficie de 224 km<sup>2</sup> et un périmètre de 80 km avec une longueur de 39 km environ. Il

présente une forme rectangulaire allongée d'orientation Sud-Nord, suggérant à priori le ruissellement des eaux superficielles en dépit de l'infiltration. Son altitude moyenne est de 387 m. Les pentes supérieures à 35% occupent une superficie de 78,68 km<sup>2</sup> de l'amont du bassin versant, tandis que les pentes entre 6 et 35 % occupent une superficie de 68,51 km<sup>2</sup> des zones collinaires de partie centrale du bassin versant, les faibles pentes, de 0 à 6 %, se localisent principalement dans la vallée et occupent une superficie de 10,87 km<sup>2</sup> dans la partie aval du bassin versant. Il se déverse en mer, au niveau de la plage Hamdania (Fig. 17, 19) [*Tadrist et al., 2016*].

Le barrage Boukerdene se trouve à une altitude de 74 m, implanté en 1992, sur le lit d'oued El Hachem, à 11 Km au sud de littoral de Cherchell et à 3 Km de la limite amont de l'aquifère de Cherchell (Fig.19). C'est un véritable réservoir d'eau et de sédiment il reçoit annuellement 20 hm<sup>3</sup> d'eaux et 0,21 hm<sup>3</sup> des sédiments [*Tadrist et al., 2016*], mais sa capacité en eau est de 80 hm<sup>3</sup>. La hauteur de plan d'eau est de 102 m, mais la hauteur totale de barrage est de 123 m, sa longueur est de 609,98 m, [*Tadrist et al., 2016*]. Pour des raisons liées à la situation sécuritaire qui prévalait dans la région, la mise en eau n'a été faite qu'en 1996.

Le but de l'aménagement est essentiellement la régularisation des apports d'Oued El Hachem en vue de satisfaire les besoins en irrigation du périmètre du Metidja Ouest et du Sahel, et l'alimentation en eau potable des communes de Tipaza, Cherchell, Nador, Hadjout, Sidi Ghiles, Sidi Amar, ainsi de renforcer l'alimentation en eau potable servant à la sécurisation de l'alimentation de la wilaya d'Alger en cas de déficit.



**Figure 17** : Emboucheurs d'oueds El Hachem [*PAC, 2016 in DGPC, 2017*].

#### 4.2.2. Oued El Bellaa

Le bassin versant d'Oued El Bellaa est du type montagneux avec une altitude moyenne de 245 m, Il s'étend sur une superficie de 55 km<sup>2</sup> pour un périmètre de 38 km et une longueur de 20 km. En général sa pente supérieure à 12,5% (Fig.18, 19).



Figure 18 : Emboucheurs d'oueds El Bellaa [PAC, 2016 in DGPC, 2017].

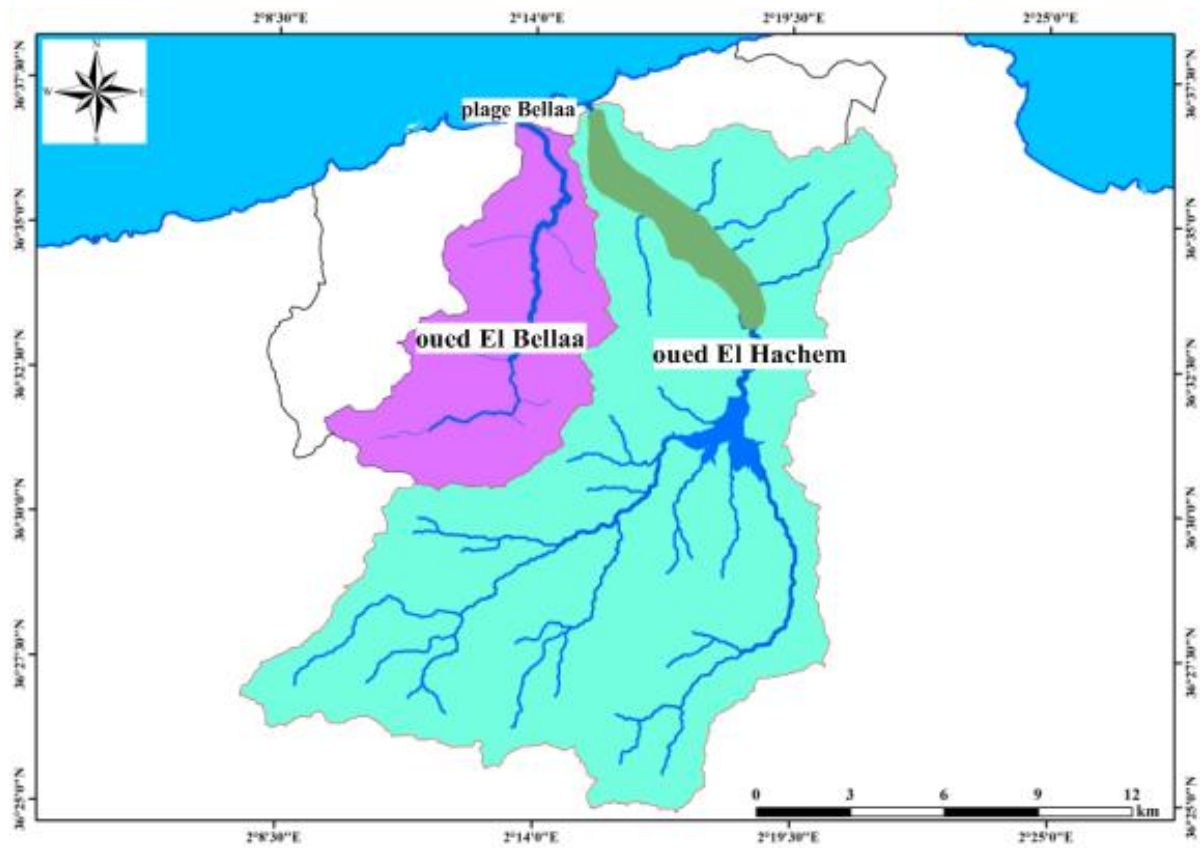


Figure 19 : Principaux plans d'eau de la région de Cherchell.

### 4.3. Hydrogéologie

Toutes les études réalisées sur la région de Cherchell montrent que la seule formation intéressante du point de vue hydrogéologique est représentée par le remplissage alluvionnaire d'âge Plio-Quaternaire de la plaine d'oued El Hachem. Ces dépôts sont essentiellement des galets et des graviers avec argiles rouges à galets au sommet et argiles sableuses avec quelques intercalations de lits de graviers à la base. L'ensemble repose sur un substratum imperméable constitué essentiellement par des marnes du crétacé et des calcaires de l'Éocène [Maamar, 2004]. Les formations de l'aquifère sont recouvertes par des roches sédimentaires très érodables, à l'origine de la grande sensibilité des sols de la région. Il s'agit là essentiellement de schistes, marnes tendres à schisteuses et de calcaire (Fig.20). Ses dépôts provenant des reliefs de Djebel Boumâad [Maamar, 2004].

La prospection électrique réalisée par la compagnie générale de géophysique en 1996, dans la plaine de Cherchell, met en évidence l'existence de plusieurs terrains électriquement distincts (Fig.21) :

- Un substratum pliocène d'une résistivité de 3 ohm.m ;
- Un niveau grossier de résistivité de 50 à 60 ohm.m représenté par le réservoir aquifère ;
- Un niveau supérieur fin de résistivité qui varie de 5 à 10 ohm.m indiquant un matériel plus fin d'une épaisseur de 17 m, avec des passages grossiers vers le centre de la plaine.

L'aquifère de Cherchell s'étale sur une longueur de 8 km couvre une superficie moyenne de 13 km<sup>2</sup> (1300 ha),

- son réservoir d'eau est de 44 hm<sup>3</sup>,
- sa capacité est de 200 hm<sup>3</sup>,
- la durée de renouvellement de l'aquifère est de 9,48 ans [Khadidja, 2018; Mancet, 1972] ;
- le gradient hydraulique varie de 10 ‰ à 22 ‰,
- sa perméabilité varie de  $6 \times 10^{-4}$  à  $1.2 \times 10^{-2}$  m/s [Khadidja, 2018],
- la transmissivité varie de  $10^{-3}$  et  $5 \times 10^{-3}$  m<sup>2</sup>/s [Mancet, 1972].
- La réserve exploitable de l'aquifère (Q) est de 50 m<sup>3</sup>/h à 100 m<sup>3</sup>/h au sud et au centre et de 10 m<sup>3</sup>/h à 50 m<sup>3</sup>/h au Nord [Mancet, 1972].
- Les niveaux piézométriques au-dessus de niveau de la mer augmentent du Nord au Sud, allant de 0,8 m au Nord et 16 m au Sud [Mancet, 1972].

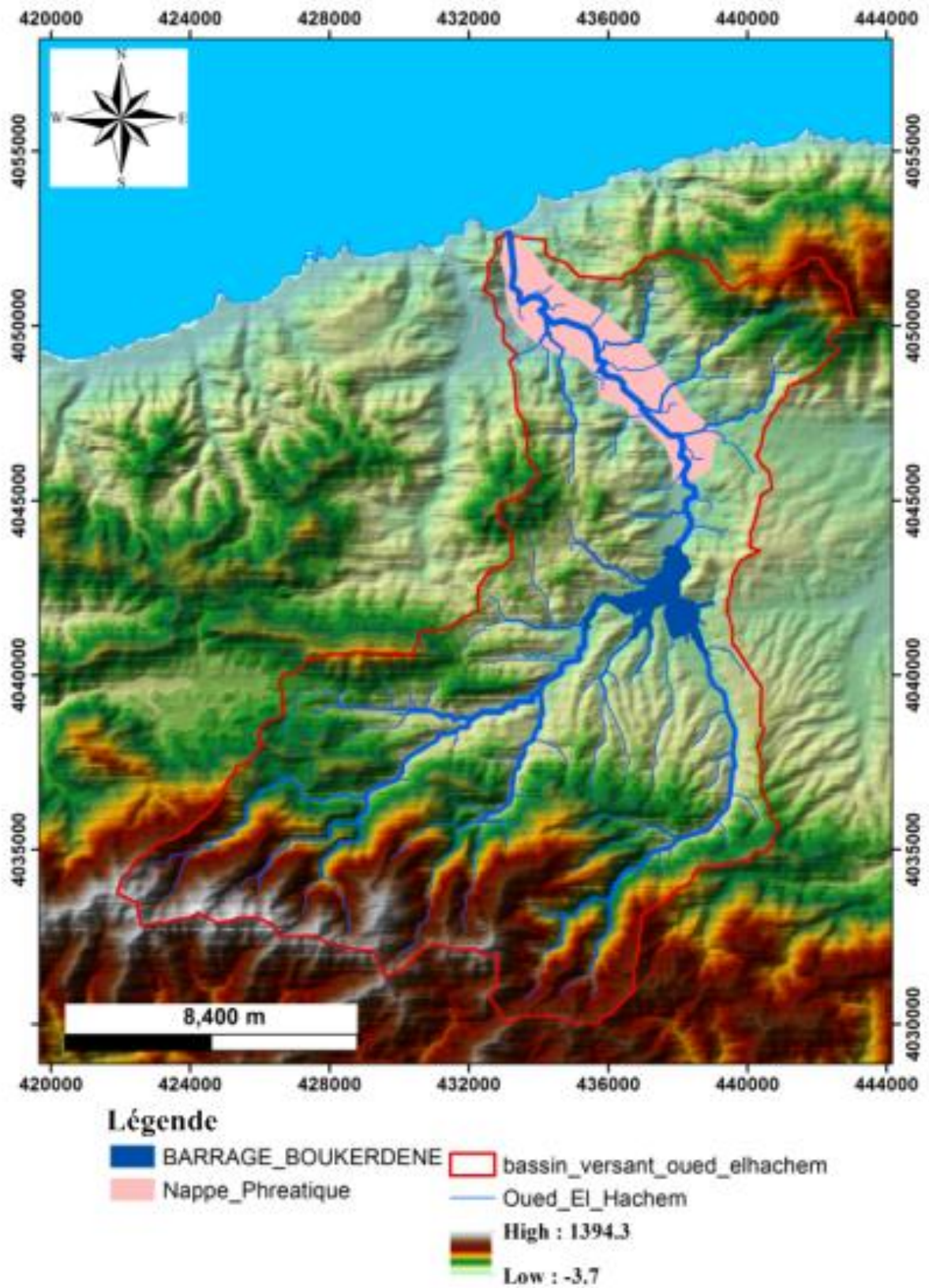
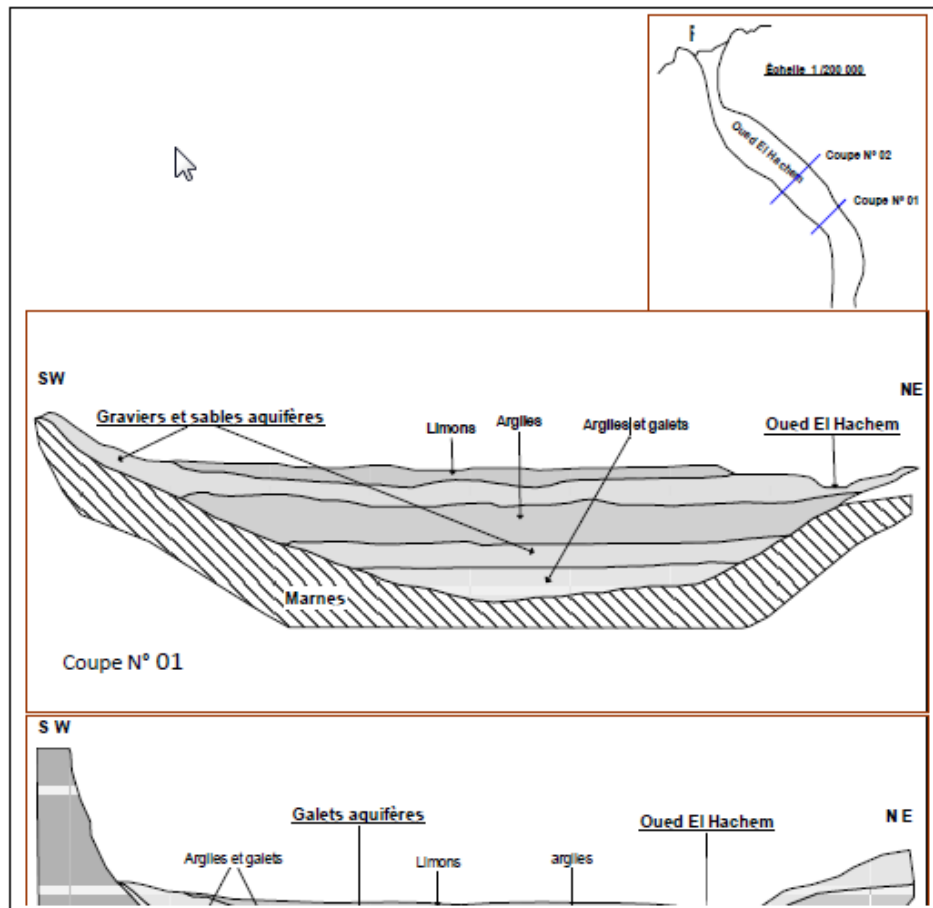


Figure 20 : Localisation de barrage Boukerdene et l'aquifère de Cherchell dans le sous bassin versant d'oued El Hachem.



**Figure 21** : Coupe géophysique dans la partie avale confinée de l'aquifère de Cherchell [Maamar, 2004].

Deux sens d'écoulements existent, le plus important suit le sens d'écoulement d'oued El Hachem dans la direction S-N, l'autre de direction SSW- NNE en alimentant l'aquifère de la partie Ouest en provenance du massif carbonaté de Gouraya [Khadidja, 2018; Mancet, 1972]. Les courbes piézométriques convergent légèrement vers le centre de l'aquifère, indiquant l'alimentation de l'aquifère par les bordures [Mancet, 1972]. L'épaisseur du réservoir de l'aquifère varie de 5 m au Nord à 20 m au Sud, mais sa réaction est relativement rapide aux différentes impulsions. Celle-ci n'est alimentée que par l'infiltration des eaux de pluie et par les eaux de ruissellement descendantes des piedmonts en période pluvieuse [Maamar, 2004] et par les lâchers du barrage de Boukerdene en période estivale et par l'excès d'eau d'irrigation [Tadrist et al., 2016]. Après la construction de barrage Boukerdene dans le bassin versant de la région, les eaux de ruissellement sont piégées dans le barrage en empêchant l'alimentation de l'aquifère. L'aquifère est tantôt libre, tantôt confiné, sous un recouvrement

d'argile ou de marne d'épaisseur variable ne dépassant pas les 20 m, libre au Sud entre Bou Aroua et Sidi Ammar (Zurich) et confiné au Nord [[Mancet, 1972](#)].

## **5. Cadre hydrodynamique, morpho dynamiques et sédimentologique**

### **5.1. Hydrodynamisme côtier**

#### **5.1.1. La marée**

La marée sur la côte algérienne est très faible, elle est du type semi-diurne. Son amplitude est de l'ordre de quelques décimètres (34 cm). Elle est le plus souvent masquée par la surélévation ou l'abaissement du niveau d'eau engendré par des variations de conditions climatologiques. La marée est la conséquence de deux phénomènes distincts :

##### **5.1.1.1. Marée barométrique**

Elle est liée aux conditions climatologiques (pressions et vents), qui conduisent à une variation de l'ordre de 13,2 mm [[Otmani, 2014](#)].

##### **5.1.1.2. Marée astronomique**

Liée à l'action de la lune et du soleil sur la mer. La variation annuelle moyenne de la pression est de l'ordre de 4 mm, qui conduit à une variation moyenne du plan d'eau de 5,3 cm [[Otmani, 2014](#)].

Bien que le littoral algérien soit du type micro-tidal, il est recommandé de prendre en considération le marnage, en cas d'étude des risques, notamment pour l'amplification des phénomènes d'inondation, mais pas autant pour l'étude hydrodynamique.

L'effet du vent est le plus important, puisque la variation du niveau de l'eau peut atteindre 10 à 12 cm et plus rarement 20 cm. Il faut signaler aussi que les forts vents marins locaux peuvent, par action directe sur la surface de la mer, entraîner, un gonflement du plan d'eau au rivage [[Otmani, 2014](#)].

La surcote en Algérie intégrant les effets de marée et de dépression atmosphérique est habituellement égale à +1m par rapport au niveau général de la mer (NGA). Cette valeur compatible avec les surcotes généralement rencontrée en Méditerranée.

#### **5.1.2. Les vents**

Les résultats des observations du vent effectué par SSMO entre 1914 à 1970 au large des côtes algériennes, sont rapportés sous forme de rose de vent (Fig.22). Ils montrent que, pendant l'hiver (Octobre à Mars) les vents des secteurs Ouest (270°W), Sud-Ouest (225°SW) et Nord-Ouest (315°NW) et Nord (360°N) sont dominants et qu'une grande partie de ces

vents présentent une vitesse supérieure à 16 nœuds. Ces vents sont appréciables par leur force mais pas par leur fréquence. Les vents d'Est (90°E) et Nord-Est (45°NE) dominent au cours de l'été, mais la majorité de ceux-ci ont des vitesses inférieures à 16 nœuds. Ces vents se distinguent beaucoup plus par leur fréquence que par leur vitesse [LEM, 2016] (Fig.22).

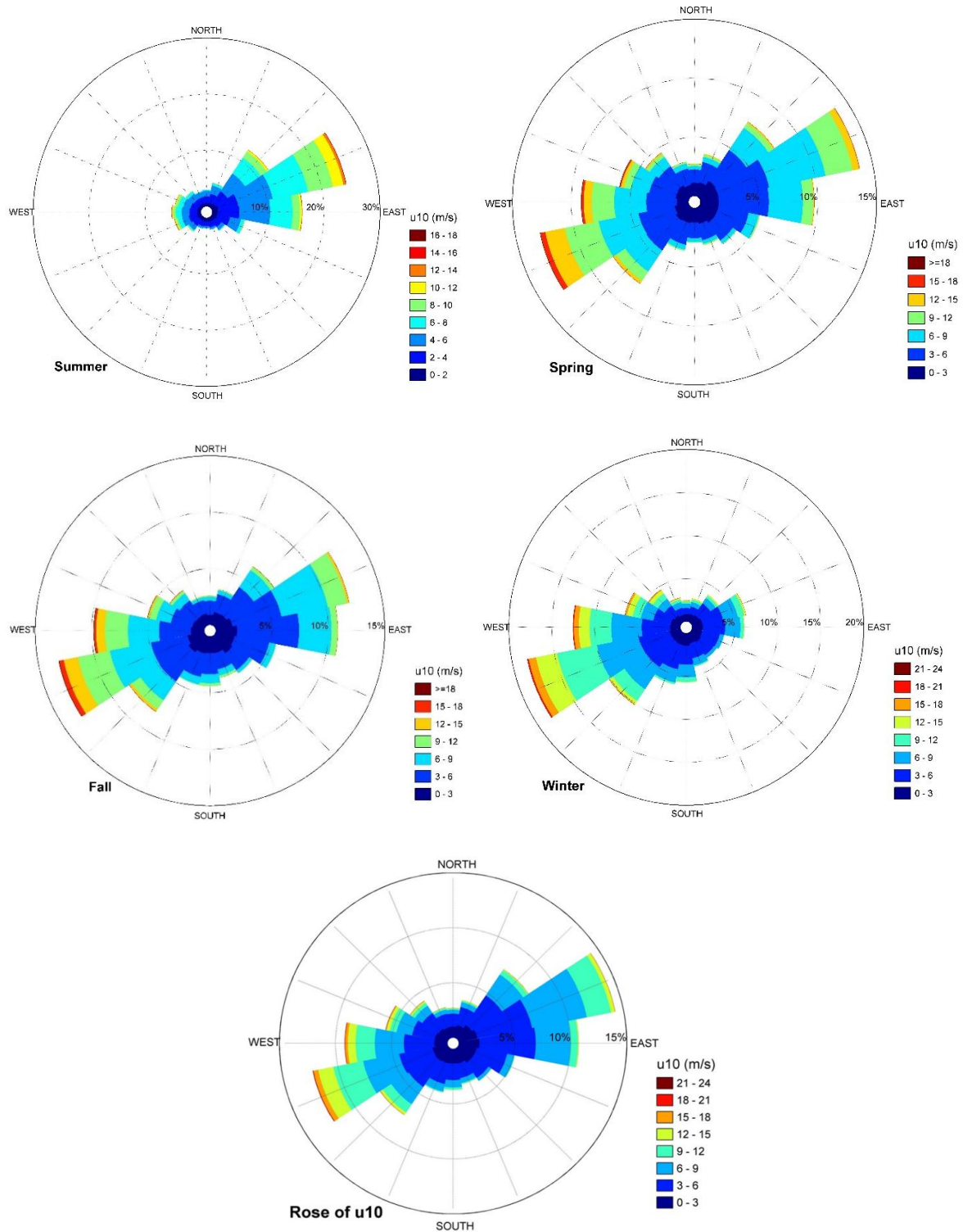


Figure 22 : Rose trimestrielle et annuelle des vents au large de la région de Cherchell

[<https://rp5.ru/>].

### 5.1.3. La houle

La houle de la zone d'étude suit le régime des vents, qui est un régime saisonnier comme pour le reste de la marge algérienne [Leclaire, 1972].

L'analyse du régime des houles au large des côtes algériennes, est effectuée à partir des résultats de l'analyse statistique des données de houle et de vent, regroupées dans "Summary of Synoptic Meteorological Observations" [S.S.M.O tome 2, zone Alger in LEM, 2016] couvrant une période de 8 ans allant de 1963 à 1970, ainsi que des observations effectuées par MEDATLAS entre (1999 et 2004 in LEM, 2016). Ces résultats révèlent qu'au large, les houles d'Ouest (N270°) et Nord-est (N45°) sont les plus fréquentes avec des fréquences d'apparitions qui avoisinent les 25,7% et 18,1% respectivement. Leurs amplitudes sont comprises entre 1 et 3,5 m. Les houles de secteur Ouest sont prédominantes durant la période hivernale et celles du secteur Nord Est sont prédominantes durant l'été alors que les houles qui proviennent des deux secteurs Nord-Est et Ouest prédominent durant l'automne, le printemps et annuellement [LEM, 2016].

Les houles qui proviennent de secteur Nord (360°), Nord-ouest (315°) sont moins fréquentes avec des fréquences d'apparition annuelle de 7,1% et 6,2% respectivement, et des amplitudes inférieures 3 m (Fig.23).

D'après le laboratoire des études maritime [LEM, 2016] les houles annuelles les plus dominantes à la côte sont les houles des secteurs Ouest (N270°) et Nord-est (N45°) avec des fréquences respectivement de 20 % et 18 %, et des amplitudes maximales > 2,5 m. Les houles les moins fréquentes sont celles avec des amplitudes > 2,5 m et proviennent généralement des secteurs Nord (360°) et Nord-ouest (315°) (Fig.24).

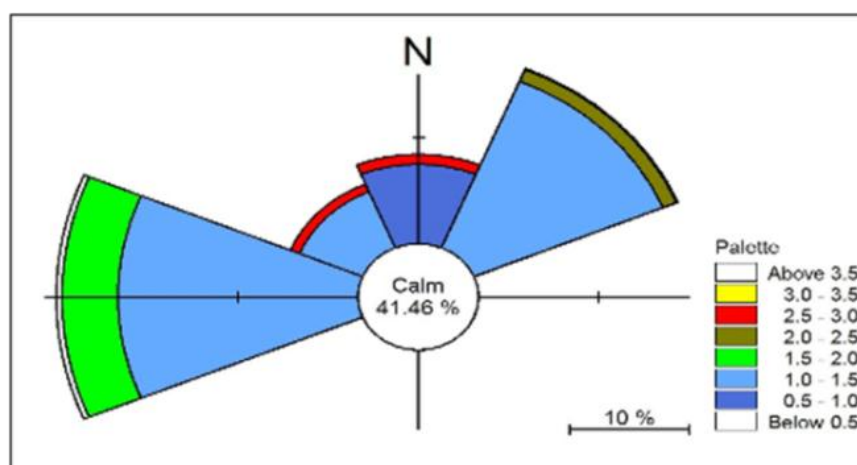
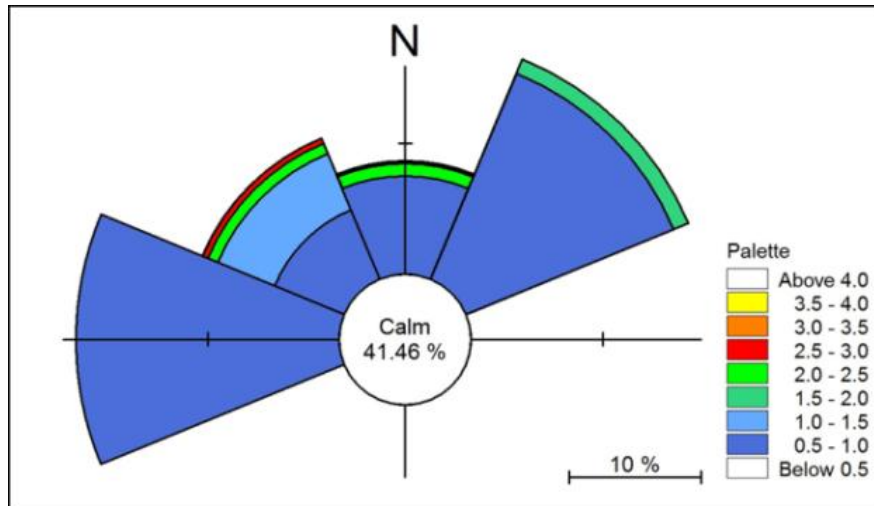


Figure 23 : Rose des houles au large de la région de Cherchell [SSMO in LEM, 2016].



**Figure 24 :** Rose des houles à la côte de la région de Cherchell [SSMO in LEM, 2016].

#### 5.1.4. Les courants

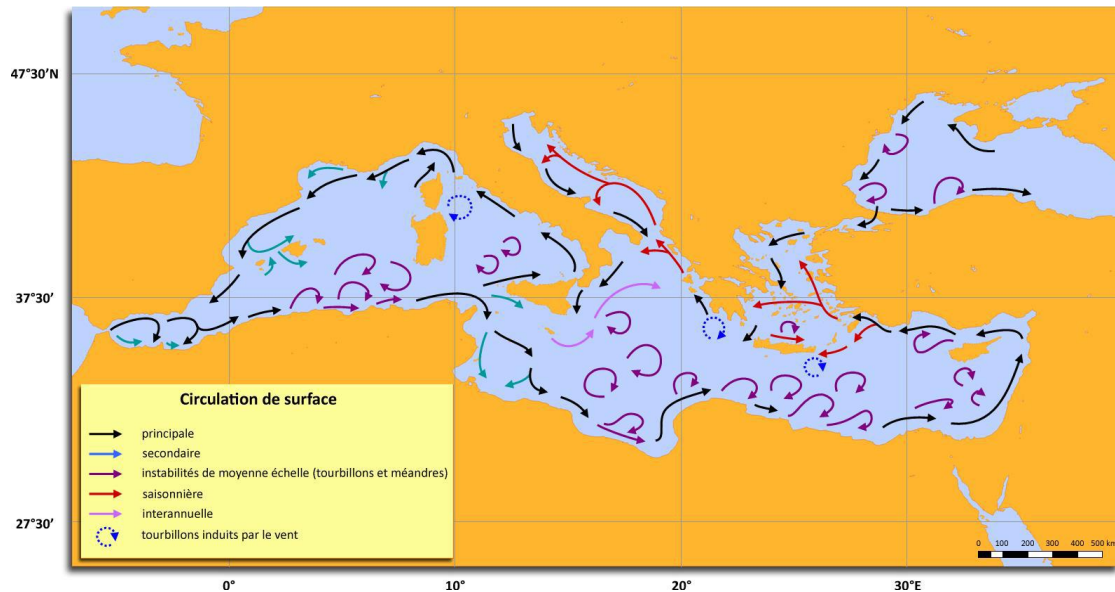
La connaissance des courants marins est un élément fondamental pour l'étude de l'évolution dynamique côtière (érosion marine, transport sédimentaire, aménagement du littoral...). Le courant est défini comme étant une masse d'eau qui se déplace sur de très longues distances, à la surface ou en profondeur, suivant une direction donnée [Salomon, 2008].

##### 5.1.4.1. Le courant méditerranéen

Les courants méditerranéens sont générés par les courants Atlantiques pénétrant par le détroit de Gibraltar et se déplacent vers l'Est avec une vitesse moyenne de 7 nœuds/jr [Leclaire, 1972].

##### 5.1.4.2. Le courant Algérien

Les travaux de [Arnone et al., 1990; Taupier et Millot, 1988] ont abouti à un nouveau modèle de dynamique des eaux atlantiques dans le bassin algérien. Ces auteurs considèrent le courant comme un flux turbulent qui génère par des processus advectifs des tourbillons cycloniques et anticycloniques de la partie orientale de la mer d'Alboran. Le grand courant se déplace de l'Ouest vers l'Est en décrivant des tourbillons de 100 km de diamètre et de 200 m d'épaisseur dans la couche de surface. Il quitte la côte espagnole aux environs d'Almeria pour rejoindre la côte algérienne à l'Est d'Arzew vers 0° (longitude de Mostaganem) sous forme d'une veine structurée et il prend la dénomination de courant algérien [Arnone et al., 1990; Taupier et Millot, 1988]. Il devient instable à partir de 1° et 2° Est entre Ténès et Cherchell (Fig.25).



**Figure 25 :** Circulation générale de surface dans la mer Méditerranée d'après [Arnone *et al.*, 1990; Taupier et Millot, 1988].

Concernant notre zone d'étude, lorsque les vents soufflent sur un plan d'eau calme cela engendre un courant de surface. Les directions de ces courants sont Nord-Est /Sud-Ouest et Ouest-Est. Le courant de direction NE /SW est parallèle à la côte, par contre le courant de direction Ouest-Est est oblique. L'intensité des courants, les fréquences et les directions des houles et des vents évoluent dans un même sens et selon une bonne proportionnalité [Braik, 1989]. Les vitesses du courant général peuvent atteindre 40 à 60 cm/s [Obaton *et al.*, 2000].

#### 5.1.4.3. Le courant de dérive littorale

À proximité des côtes, les vagues se déforment et induisent la formation d'un courant de dérive littorale qui est un déplacement parallèle au rivage des eaux littorales sous l'effet de différents facteurs. Cette dérive dépend de l'angle d'incidence d'attaque de la houle sur le rivage, de la hauteur et de la période de la houle, ainsi que de la pente des fonds. La dérive littorale contribue puissamment aux transports des sédiments, sa vitesse peut dépasser 2 m/s [Salomon, 2008]. Les courants de dérive, sont responsables du modelage du linéaire côtier par accumulation des matériaux meubles [Braik, 1989].

#### 5.1.4.4. Le courant côtier de retour

C'est le courant compensateur sur le fond qui s'effectue en direction du large résultant du retour des masses d'eau déployées par la houle sur la côte. Son effet est remarquable surtout par mauvais temps, généralement en hiver. Les directions des divers courants liées au vent sont comme suite : les vents du Nord-Est génèrent des courants de direction Ouest. Les vents

du secteur Nord et Ouest génèrent les courants de direction Est. Les courants de retour vers le large ayant pour effet la dissémination vers le large des sédiments arrachés à la côte [Braik, 1989].

## **5.2. Cadre morpho dynamique**

Le site d'étude se caractérise par une morphologie particulière de par la présence d'un certain nombre de caps et de plages sableuses qui influent sur la configuration locale des courants et sur la dynamique hydro sédimentaire. Cette configuration expose le site à l'action de la houle provenant de large des directions NE et W. Par ailleurs, la présence de deux oueds exoréiques à savoir oued El Hachem et oued El Bellaa représentent une source d'apport importante pouvant alimenter en permanence les cellules sédimentaires locales.

### **5.2.1. Les petits fonds**

Les analyses effectuées par *China Harbor Engineering Company* [CHEC in LEM, 2016] dans la région de Cherchell, allant du trait de côte jusqu'à la profondeur de -40 m, montrent que la bathymétrie dans la partie Est se caractérise par une pente importante de l'ordre de 5% en moyenne jusqu'à une profondeur de 20 mètres, qui s'adoucit progressivement en allant vers des profondeurs plus importantes. On note aussi la présence de hauts fonds de nature généralement rocheuse. La partie Ouest se caractérise par des fonds à faible pente (2%) avec des lignes isobathes assez régulières et parallèles au trait de côte ce qui reflète la nature sablo-vaseuse des fonds [LEM, 2016] (Fig.26, 27).

L'analyse des trois profils en travers représentatifs des zones des plages et des zones des caps confirme les résultats présentés précédemment.

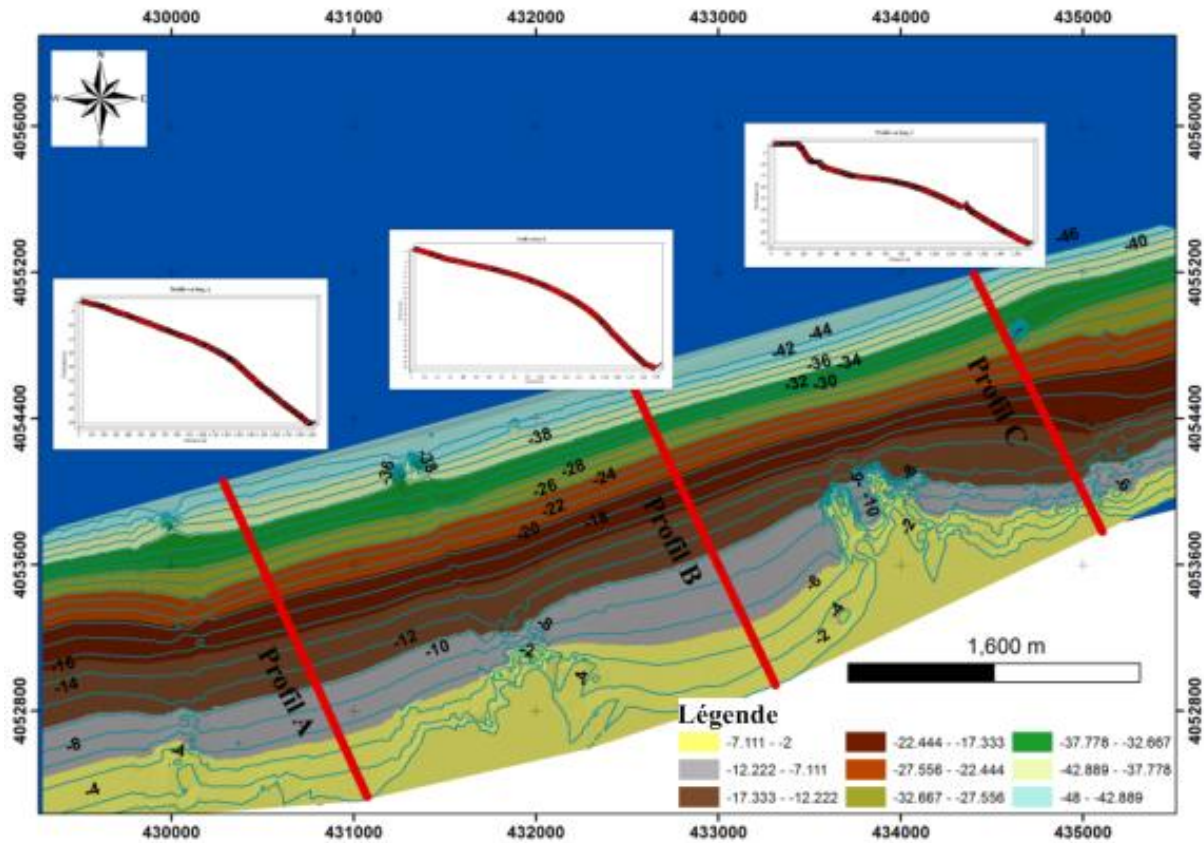


Figure 26 : Bathymétrie des petits fonds de la région Est de Cherchell [LEM, 2016].

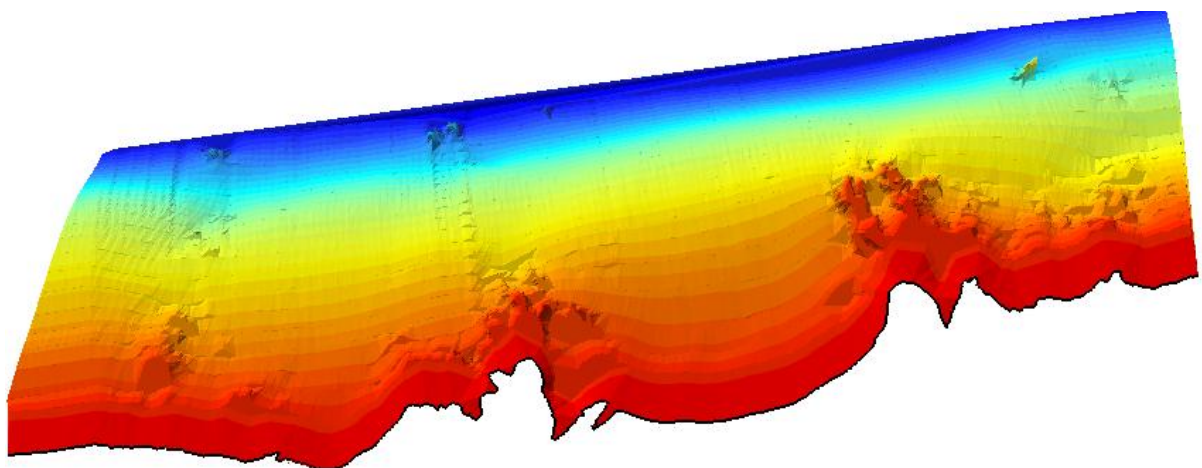


Figure 27 : Bathymétrie des petits fonds de la région Est de Cherchell en 3D.

### 5.2.2. Le plateau continental

De l'extrémité ouest de la wilaya jusqu'au massif du Chenoua, le plateau et le rebord continental sont la continuation de la marge continentale surplombée par le massif de Béni Menacer [Leclaire, 1972]. Le plateau continental est étroit (4 km) ; le rebord très accusé et festonné et l'amorce d'une pente très forte ( $12^\circ$ ) (Fig.28, 29).

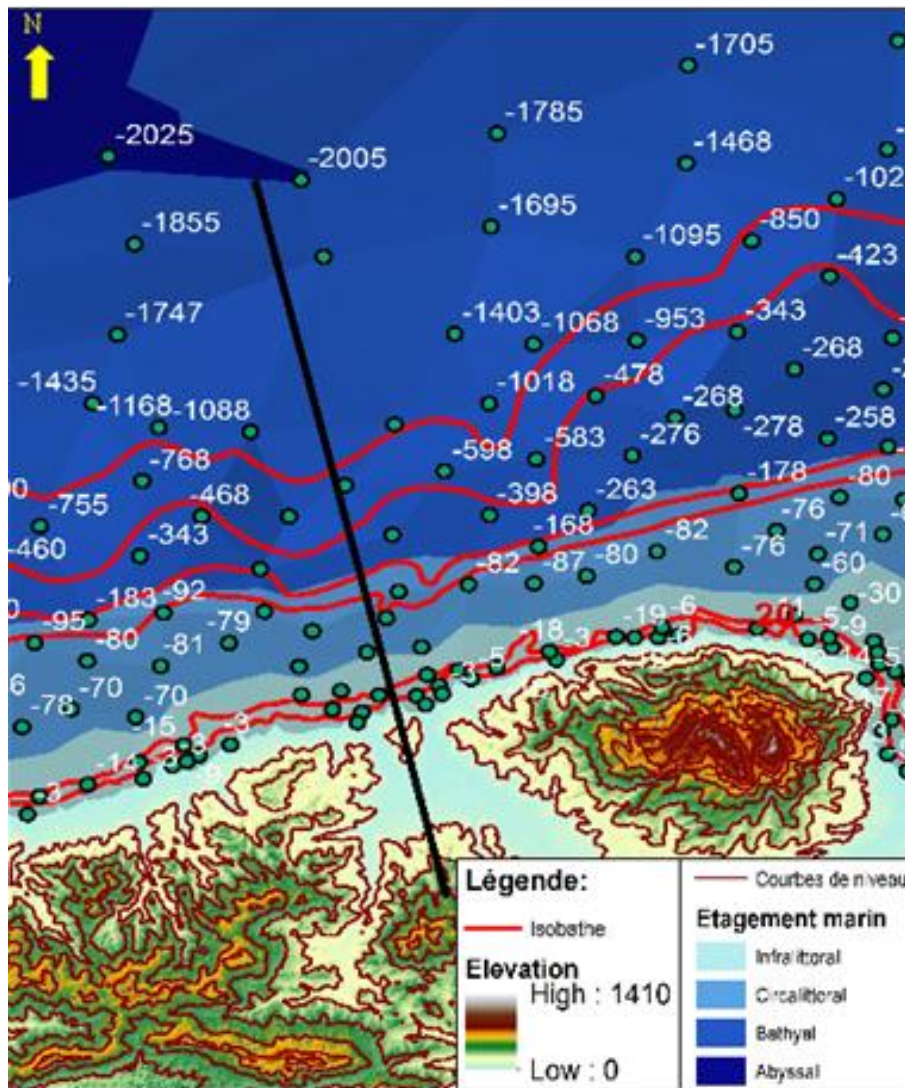


Figure 28 : Bathymétrie des grands fonds de la région de Cherchell [Leclaire, 1972].

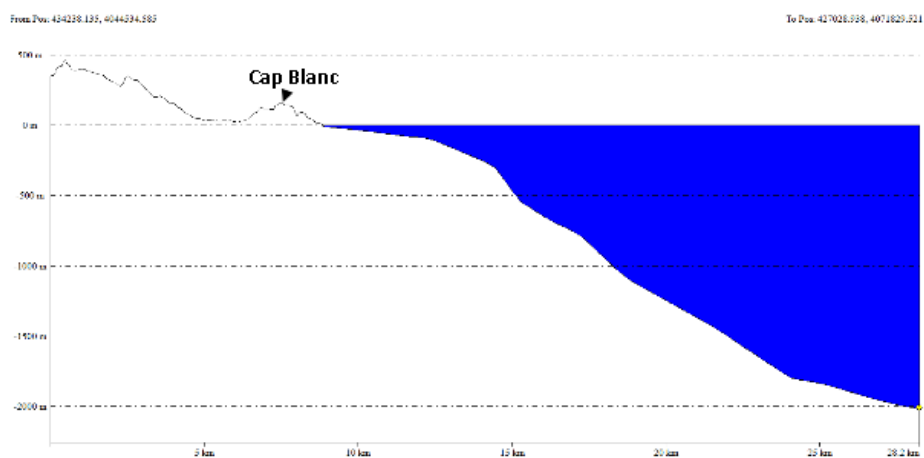


Figure 29 : Profil de plateau continental dans la région de Cherchell [Leclaire, 1972].

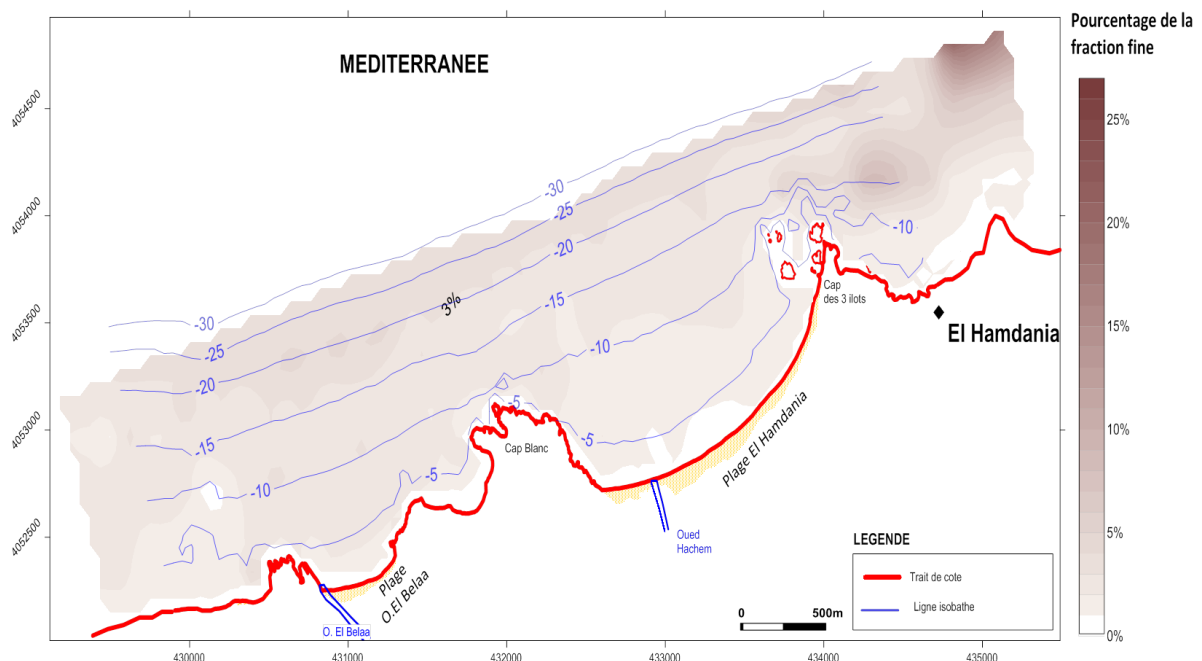
La rupture du plateau continental s'effectue sur une profondeur de -300 m à environ 15 km de la côte, avec une pente douce de 3,10% (-5,42°), puis après la cassure la pente sera de l'ordre de 12,44 % (-7,09°) [Leclaire, 1972] .

### 5.3. Cadre sédimentologique

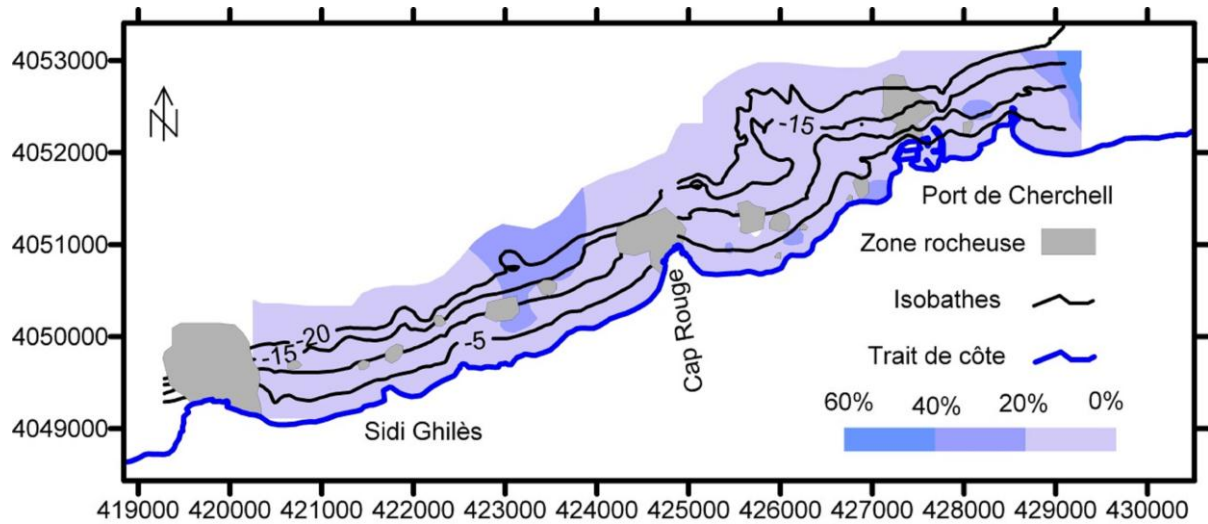
#### 5.3.1. La fraction fine

Concernant l'analyse granulométrique, la fraction fine est globalement peu abondante (< 5 %) et ce même au niveau des profondeurs importantes [LEM, 2016]. Nous pouvons déduire que ces taux, en dépit de la présence de deux sources potentielles d'alimentation en particules fines à savoir les deux oueds sus cités, sont dus à priori à une énergie hydrodynamique marine suffisante pour emporter les particules les plus fines au large.

Dans le secteur extrême Est, les pélites forment des taches relativement riches (jusqu' à 27 %). La présence de fortes irrégularités topographiques liées aux bancs rocheux en est certainement responsable. Les tombants et escarpements rocheux engendrent des abris et des pièges sédimentaires susceptibles de conserver les fractions fines (Fig.30, 31).



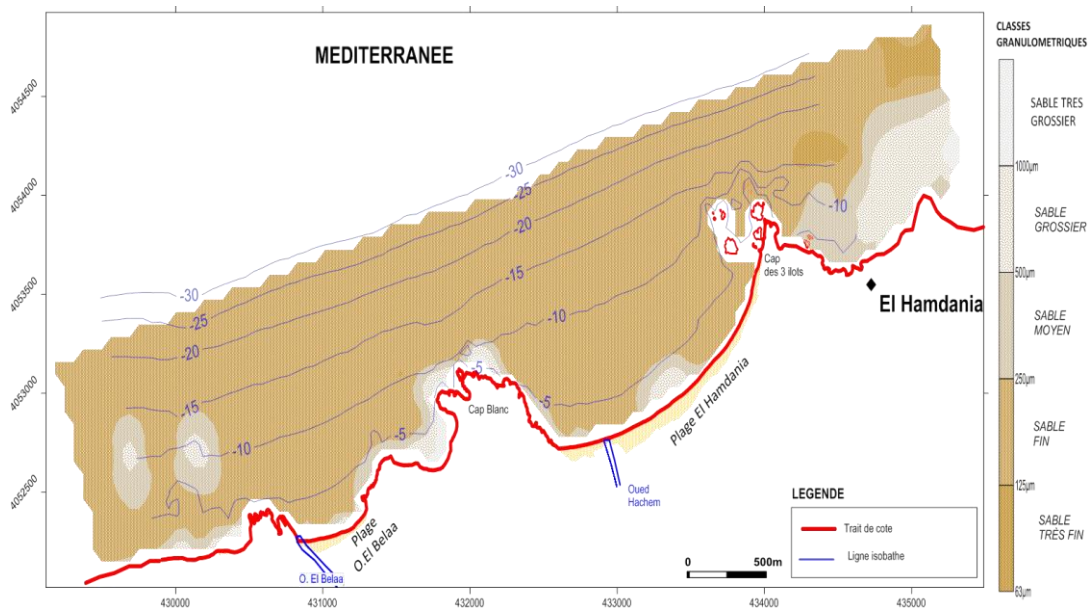
**Figure 30 :** Répartition spatiale de la fraction fine dans la région Est de Cherchell (< 50 µm) [LEM, 2016].



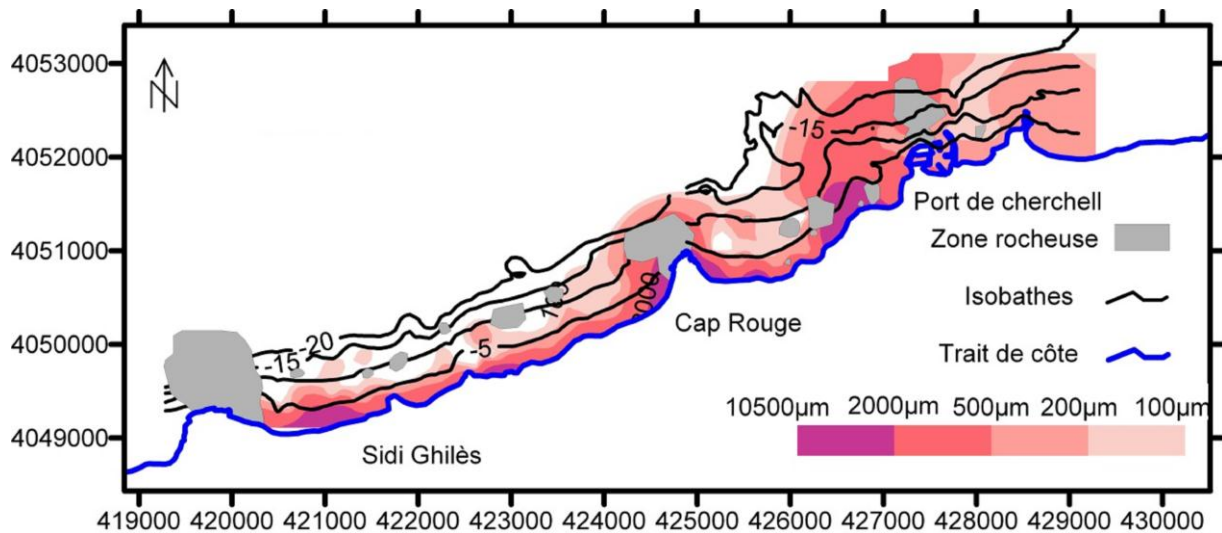
**Figure 31** : Répartition spatiale de la fraction fine dans la région Ouest de Cherchell (< 50  $\mu\text{m}$ ) [in LEM, 2016].

### 5.3.2. La fraction grossière

Pour ce qui est de la fraction grossière, il s'agit d'un sable bien classé dans un milieu plus ou moins agité avec évacuation des particules fines en dehors de l'isobathe 40 m. Le faciès sous-marin est dominé par des sables fins ( $125 \mu\text{m} < D_{50} < 250 \mu\text{m}$ ). Des sables moyens à grossiers font des apparitions locales à proximité du rivage ou sur l'estran et ce en totale conformité avec le concept du granoclassement décroissant de la côte vers le large qui est lié au gradient hydrodynamique lui aussi décroissant de la côte vers le large [LEM, 2016] (Figs.32, 33).



**Figure 32** : Répartition spatiale des médianes granulométriques dans la région Est de Cherchell [LEM, 2016].



**Figure 33 :** Répartition spatiale des médianes granulométriques dans la région Ouest de Cherchell [LEM, 2016].

Pour ce qui de la dynamique sédimentaire, le calcul du transit qui donne une estimation théorique de la quantité des sédiments pouvant se déplacer parallèlement à la cote sous l'effet des houles et des courants montre que le transit dirigé d'ouest vers l'Est est plus important que celui dirigé d'Est vers l'Ouest. Cela engendre une capacité de transit résiduel évaluée à environ 42 000 m<sup>3</sup>/ans dans le sens Ouest vers l'Est [LEM, 2016].

### Conclusion

La zone de Cherchell s'insère dans le paysage Nord-Ouest de l'Algérois, elle est formée de grandes unités topographiques (chaînes de montagnes, plaines côtières, massifs côtiers, bassins versants et la cote) constituant l'assiette globale des ensembles structuraux. Les grands traits structuraux de l'ensemble de la région sont acquis durant la période Mio plio-quaternaire. Cette région est sismo-tectoniquement active et de nombreuses failles témoignent de cette activité.

La frange côtière est occupée par des alluvions et sable, calcaire à dolomie dure et calcaire friable du Quaternaire.

Sur cette frange côtière règne un climat du type méditerranéen à hiver doux et humide et un été chaud et sec. Elle est drainée par deux principaux oueds qui sont oued El Hachem à l'Est et oued El Bellaa à l'Ouest qui alimente la côte en sédiments et l'aquifère de Cherchell en eau.

Sur le littoral de Cherchell, les houles dominantes proviennent des secteurs Nord-Est, Nord, Nord-Ouest et Ouest avec des amplitudes qui varient de 2,5 m et 3 m. Elles sont responsables des transferts (perpendiculaire ou longitudinal) des sédiments sur la côte.

La région de Cherchell est caractérisée par des plages à pentes douces (2°) et un plateau continental étroit.

La répartition de la fraction fine (les pélites) et les médianes granulométriques témoignent de l'importance des forçages hydrodynamiques responsables de ce transport.

### **Conclusion de la première partie**

La synthèse bibliographique nous a permis de cerner les outils nécessaires qui répondent aux besoins de la présente étude.

La présentation de la région de Cherchell nous a permis d'avoir une idée sur l'état de la région. De point de vue de ses caractéristiques géologiques et géomorphologique on 'a distingué sa sensibilité face à l'érosion et aux agressions marines. L'étude climatique et hydrogéologique nous a donné une idée sur les quantités de sédiments charriés en mer pour l'alimentation des plages ainsi l'alimentation de l'aquifère côtier de Cherchell en eaux. L'étude hydrodynamique, morphodynamique et sédimentologique nous a permis d'avoir une idée sur le fonctionnement hydro-sédimentaire de la région de Cherchell.

Après la présentation de la région de Cherchell, les études concernant l'érosion côtière, le fonctionnement hydro-sédimentaire, la submersion marine, l'intrusion marine, la vulnérabilité côtière font l'objet des différents chapitres de la deuxième partie de la présente étude.

## **Partie II : Cinématique du trait de côte et fonctionnement hydro-sédimentaire**

### **Chapitre 1 : Variation spatio-temporelle du rivage de Cherchell**

## Introduction

L'érosion côtière est un risque naturel qui affecte l'ensemble du littoral mondial, surtout ces dernières années. Cette érosion, allant de 1 cm/an à 10 m/an, touche près de 80 % des côtes basses [Pilkey et Hume, 2001]. Actuellement, 70% des plages sableuses du littoral mondial sont en voie d'amaigrissement, 20% sont stables et seulement 10% s'engraissent [Appeaning Addo et al., 2011; Bird, 1985; Paskoff, 1998]. Récemment plusieurs études ont été menées dans le but d'analyser la variation de la ligne de rivage [Appeaning Addo et al., 2011; Maiti et Bhattacharya, 2009; Moussaid et al., 2015; Zuzek et al., 2003].

L'Algérie s'intéresse ces dernières années à l'étude de l'érosion de ses côtes, car elle est devenue un problème sérieux qui menace les populations qui vivent sur le littoral, sachant que la bande littorale reçoit 80% de la population [Ayadi et al., 2016; Bouakline, 2009; Bouakline, 2009; Otmani et al., 2020; Otmani, 2020; Kermani et al., 2016].

L'objectif de cette étude est de retracer l'évolution passée des plages du littoral de Cherchell pour une période mi- séculaire allant de 1959 à 2017, à l'aide des photos aériennes (1959, 1980, 1996) et des images satellitaires (2009, 2013 et 2017) intégrées dans un système d'informations géographiques (SIG).

## 1. Données et méthodes

### 1.1. Méthodologie adopté pour l'étude de la cinématique côtière

La méthodologie adoptée dans le cadre de ce travail s'inspire de nombreux travaux existant en matière d'analyse diachronique de l'évolution des littoraux à l'échelle historique [Crowell et al., 1991; Dolan et al., 1991; Dolan et al., 1980; Moore, 2000].

Depuis longtemps, la méthode de la photo-interprétation a été appliquée pour l'étude des processus côtiers, car elle apporte une vision globale et synoptique du trait de côte. La fiabilité des résultats obtenus [Crowell et al., 1991; Dolan et al., 1991], amène un grand nombre de chercheurs à utiliser cette technique. L'examen permet une vision globale et rétrospective des phénomènes avec la mise en évidence de la mobilité du rivage et des transferts sédimentaires, ainsi que la cinématique du trait de côte [Ayadi et al., 2016; Bouakline, 2009; Bouakline, 2009; El Moutchou, 1995; Kermani et al., 2016; Malek, 1995; McBride et Byrnes, 1997; Otmani et al., 2020; Otmani, 2020; Suanez, 1997; Suanez et Simon, 1997; Suanez et Provansal, 1998]. Cette méthode repose sur quatre principes qui se résume succinctement par :

- Assemblage des photographies aériennes disponibles et d'images satellitaires, dans une mosaïque qui couvre la totalité de la zone d'étude.

- Corrections géométriques et Géo-référencement des photos aériennes en utilisant un logiciel SIG.
- Définition d'une ligne de référence et digitalisation du trait de côte.
- Superposition des différentes couches dans le logiciel (Arcgis 10.3).

Selon [Robin, \[2002\]](#) la délimitation de la ligne de rivage est un problème essentiel, la ligne de rivage instantanée est très souvent utilisée lorsque l'on travaille dans un contexte micro-tidal comme celui de la Méditerranée [[Durand P, 1998](#); [Suanez et Simon, 1997](#)]. L'effet de la faible amplitude de la marée sur les variations morphologiques des plages du littoral méditerranéen, peut être considéré comme négligeable. Dans le cadre de cette étude, nous définissons le trait de côte par la différence radiométrique entre les pixels clairs relatifs à des parties sèches et les pixels sombres relatifs à des parties humides [[Crowell et al., 1991](#); [Dolan et al., 1980](#); [Douglas et Crowell, 2000](#); [Thieler et Danforth, 1994](#)].

### 1.1.1. Sources d'erreurs

Les différents outils et méthodes utilisés induisent une erreur significative qui affecte la précision des données générées. Il est donc nécessaire de calculer leur marge d'erreurs et d'en tenir compte lors de l'appréciation des taux de changement du trait de côte et de leur utilisation ultérieure. Les sources d'erreur potentielles sont les suivantes :

- Erreur de précision des photos  $E_p$  : Elle correspond à la résolution de la photo, c'est-à-dire dans ce cas-ci à la taille des pixels au sol des photos aériennes qui est différente d'une photo à une autre [[Bouakline, 2009](#)]. Dans notre cas l'erreur est de 2,5 m pour les photos aériennes et de 1 m pour les images satellitaires.
- L'erreur due à la rectification  $E_r$  : le plus souvent, on utilise l'erreur résiduelle générée par le logiciel de rectification qui est calculée à partir de la qualité de la superposition des points de contrôle selon la méthode de transformation utilisée [[Bouakline, 2009](#)]. Dans notre cas, le logiciel Arcgis ne générerait aucune erreur.
- L'erreur de digitalisation  $E_d$  : C'est l'erreur due au positionnement du trait de côte selon les repères choisis. Difficile à établir précisément, on utilise souvent une valeur arbitraire, mais raisonnable [[Bouakline, 2009](#)]. Elle est estimée à 0,2 mm fois l'échelle de la carte (N) soit  $0,2 * N$ , c'est-à-dire 10 m pour l'échelle 1 : 50 000, 4 m pour l'échelle 1 : 20 000 et 2 m pour 1 : 10000. Dans notre cas des photos aériennes à une échelle 1 : 20 000 ont été utilisées.

- L'erreur due aux variations saisonnières  $E_s$  : C'est l'erreur du mouvement de la position de la ligne du rivage (fluctuations saisonnières du rivage) sous l'action des vagues et des tempêtes [Bouakline, 2009]. Dans notre cas l'erreur est de l'ordre de 3 m selon l'institut national de cartographie et télédétection, les photos aérienne son prise dans les période allant de avril a septembre.

L'erreur globale  $E_g$  : C'est le résultat de toutes les erreurs qui ont été précédemment estimées. Elle est définie comme la racine de la somme des carrées des erreurs pour une seul photo aérienne. Elle est calculée comme suit :

$$E_g = \pm \sqrt{E_p^2 + E_r^2 + E_d^2 + E_s^2} \quad (1)$$

Lors des études sur l'évolution des rivages on superpose à chaque fois deux photos aériennes, ou deux images satellitaires ou bien une photo aérienne et une image satellitaire, donc l'erreur retrouvée est calculé en deux fois.

Malgré les erreurs inhérentes à toute méthode de ce type [Crowell et al., 1991], la marge d'erreur est de l'ordre de +/- 11,2 m entre les différentes photographies aériennes et de +/- 10,2 m pour les images satellitaires, donc la marge d'erreur estimée est de +/-10,7 m (11 m pour faciliter les calculs). La marge d'erreur de nos résultats est acceptable compte tenu de la durée du suivi du trait de côte (58 ans pour la plage El Hamdania et 37 ans pour les plages Tizirine et Centre). L'erreur est de 0,19 m/an pour la plage Hamdania et de 0,3 m/an pour les plages Tizirine et Centre. Pour faciliter l'interprétation des résultats, on a décidé de mettre les zones correspondant à un taux net d'évolution de trait de côte inférieure à 0,3 m/an comme stable.

### 1.1.2. L'outil DSAS

La télédétection et les SIG sont des méthodes recommandées pour détecter et décrire l'évolution des côtes. Plus récemment, la combinaison de ces méthodes avec des techniques et des modèles comme le système d'analyse numérique (*Digital Shoreline Analysis System DSAS*) a été efficacement utilisée [Thieler et al., 2009].

Après la digitalisation des levés du trait de côte, l'évaluation de sa cinématique a été faite par l'application de l'extension DSAS 4.3 sur l'environnement Arcgis 10.3. Cet outil permet de réaliser un calcul statistique des taux d'évolution à partir de différents traits de côte [Thieler et al., 2009].

L'outil DSAS, basé sur les SIG développé par *United States Geological Survey (USGS)*, est une extension conçue pour le logiciel Arcgis [Thieler et al., 2009], elle est disponible

gratuitement. DSAS calcul les statistiques du taux de changement pour une série chronologique des données vectorielles du littoral. Il est capable de fournir une meilleure compréhension de la nature, de la dynamique et la tendance évolutive des côtes [Genz et al., 2007; Thieler et al., 2009]. Cet outil nécessite une ligne de base qui est une ligne de référence parallèle à l'orientation globale de la côte et intégrée à la Géo data base. Celle-ci permet de tracer automatiquement des transects perpendiculaires à cette ligne de référence d'une longueur de 300 m espacé de 20 m le long du littoral étudié, pour mesurer la distance entre les traits de côtes à différents points le long du littoral. Cela permet de calculer des taux de changement annuels (en mètres par an). Les mesures entre les traits de côte ont été faites à l'aide de l'extension DSAS 4.3 spécialement conçu pour ce genre de travail et compatible avec le logiciel Arcgis 10.3. DSAS calcul les statistiques du taux de changement pour une série chronologique des données vectorielles du littoral. Un fichier Shape file agrège tous les traits de côte dans une seule entité sous forme de table des attribues, le tout est stocké dans une géo data base personnelle.

DSAS utilise plusieurs techniques statistiques afin de comparer les positions des traits de côte à travers le temps pour analyser leurs évolutions [Genz et al., 2007; Thieler et al., 2009]. La méthodologie adoptée dans le cadre de l'étude de la cinématique côtière du littoral de Cherchell concerne la méthode du changement net du rivage (Net Shoreline Evolution- NSM) ainsi que celles des points extrêmes (End Point Rate- EPR) qui consiste simplement à calculer un taux moyen de recul ou d'avancée, le long de chaque rivage étudié et de manière ponctuelle. Ces méthodes sont décrits ces dessous :

- Le mouvement net du trait de côte : le mouvement net de la ligne du rivage, NSM « Net Shoreline Movement » rapporte une distance, pas un taux. Il est associé uniquement à deux traits de côte, le plus ancien avec le plus récent [Genz et al., 2007; Thieler et al., 2009]. Il permet donc d'estimer le changement global.
- Méthodes des points extrêmes : la méthode des points extrêmes, EPR « End Point Rate » mesure la distance sur les transects entre deux traits de côte, le plus ancien et le plus récent (NSM) divisé par le nombre d'années qui les séparent [Genz et al., 2007; Thieler et al., 2009]. Il permet donc d'estimer la vitesse d'évolution du trait de côte.

$$EPR = \frac{NSM}{T} \quad (2)$$

EPR (m/an) : Vitesse d'évolution du trait de côte.

NSM (m) : longueur qui sépare les deux traits de côte étudié.

T (an) : temps écoulé entre les deux traits de côte étudié.

La méthode des points extrêmes, permet la mesure des vitesses d'évolution de la ligne du rivage et la cartographie des zones d'érosion et d'accrétion ; l'estimation annuelle des surfaces perdues et gagnées pour chaque secteur côtier, afin de définir le bilan global du budget sédimentaire durant la durée d'étude pour chaque rivage.

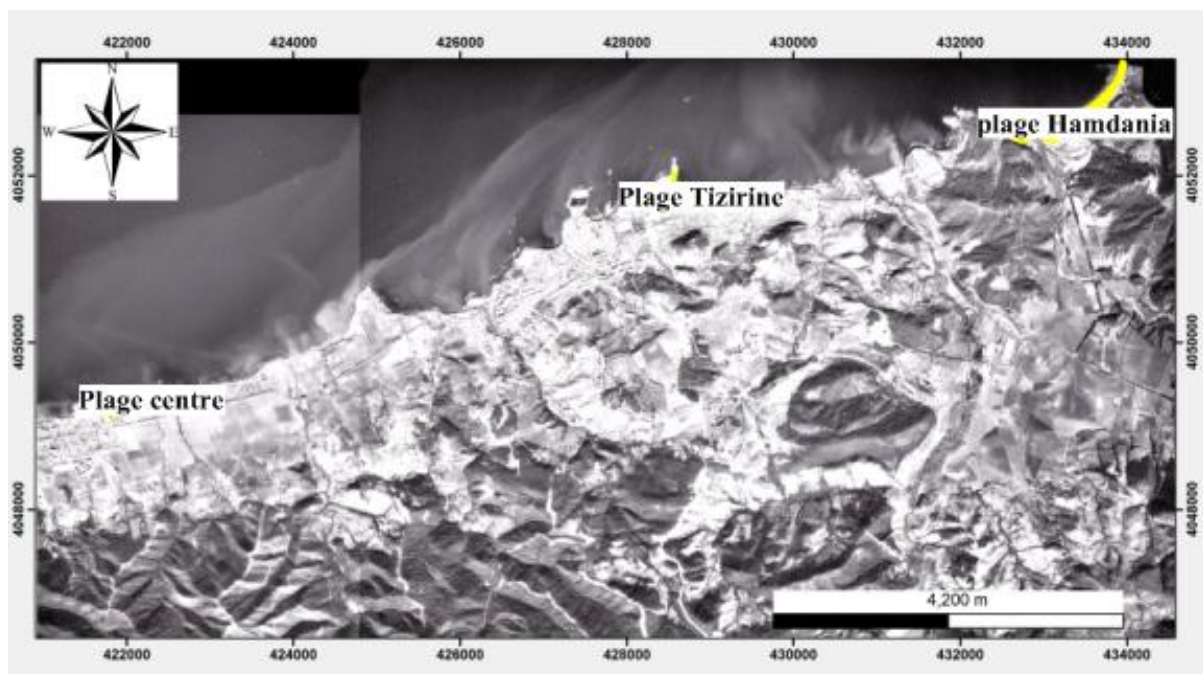
Vue le manque de données, on a considéré les côtes rocheuses et les côtes à falaises comme stables.

Notre travail s'appuie essentiellement sur les photos aériennes des différentes missions (1959-1980-1996) géo référencées et rectifiées, récupérées au niveau du Centre National de Cartographie et Télédétection (INCT) d'une résolution de 2,5 m (Fig.29), et d'images satellitaires (2009, 2013, 2017) géo-référencées d'une résolution de 1 m (Fig.30).

## 1.2. Données utilisées pour l'étude de la variation spatio-temporelle du trait de côte

### 1.2.1. Photos aériennes

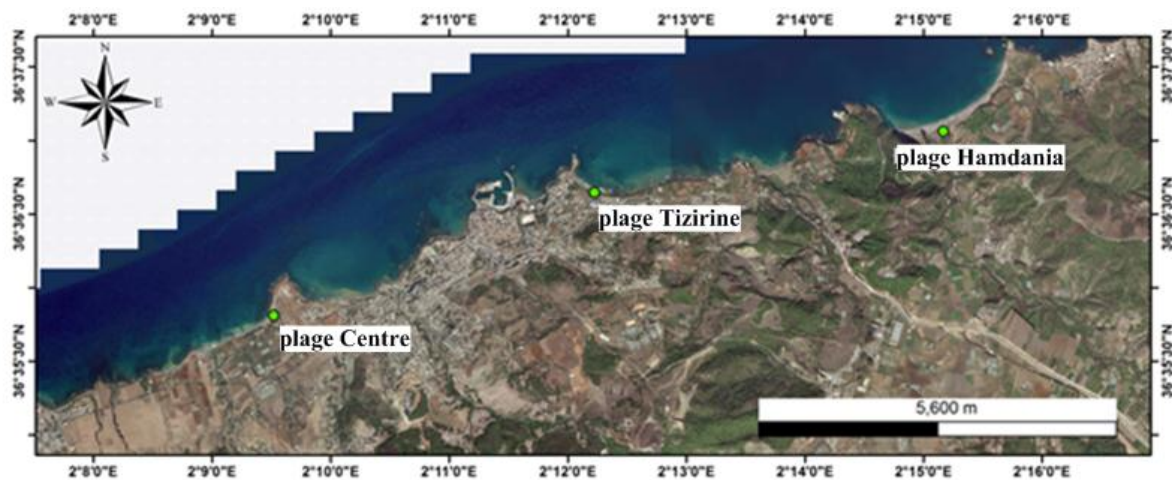
Cette technique nécessite un grand nombre de clichés pour suivre le trait de côte [Niazi, 2007]. Dans le cadre de l'étude des photos aériennes numérisées et rectifiées de l'Institut National de Cartographie et Télédétection ont été récupérées (Fig.34).



**Figure 34** : Photos aériennes de 1980 couvrant les plages ; Hamdania, Tizirine et Centre.

### 1.2.2. Images satellitaires

Des images de Google Earth ont été utilisées dans le cadre de l'étude. Ces images ont été téléchargées par le logiciel Terra Incognita 2.44 offert par la Direction Général de la Protection Civile (DGPC). Ce logiciel permet de télécharger des images satellitaires géo référencées avec une résolution de l'ordre de la taille d'un pixel qui est de 1 m (Fig.35).



**Figure 35 :** Images satellitaires de 2009 couvrant les plages ; Hamdania, Tizirine et Centre.

## 2. Résultats

Nous avons étudié l'évolution de la ligne de rivage des plages sableuses du littoral de Cherchell, on se basant sur l'analyse des photos aériennes (1959, 1980, et 1996), et d'images satellitaires (2009, 2013, et 2017). Les résultats auxquels nous sommes parvenus sont comme suit :

### 2.1. Évolution de la plage Hamdania entre 1959 et 2017

La plage Hamdania représente une longueur près de 1900 m, divisée d'Est en Ouest par 94 transects, perpendiculaires au rivage et équidistants de 20 m pour assurer une bonne précision de la variation de la ligne de rivage (Fig.36).

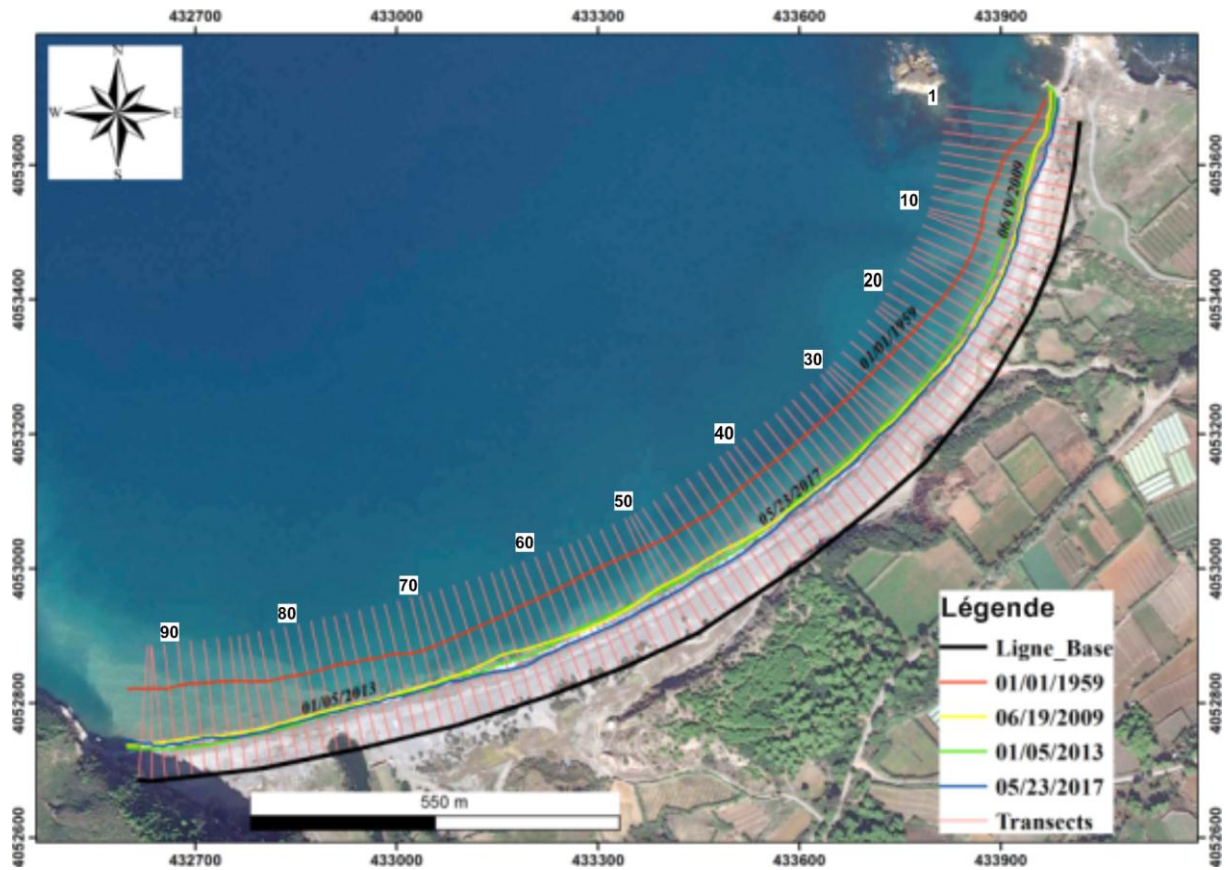


Figure 36 : Évolution de la ligne de rivage de la plage Hamdania entre 1959 et 2017 selon la direction des transects.

L'évolution du trait de côte tout au long de cette période fait apparaître que la plage est récessive dont sa totalité, le recul varie de -26 m à l'Est et -86 m au Centre et Ouest. Il est clair que le taux de recul est plus important au Centre et Ouest par rapport à l'Est (Fig.37).

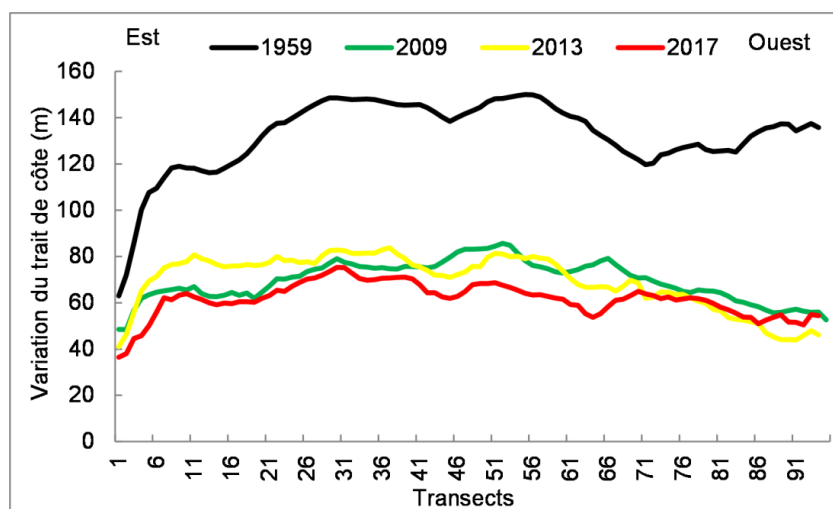
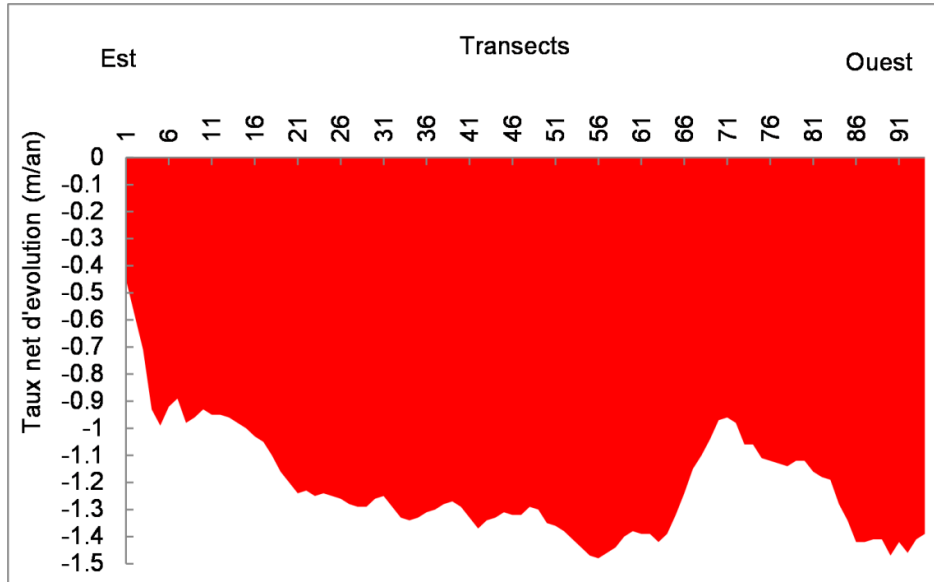


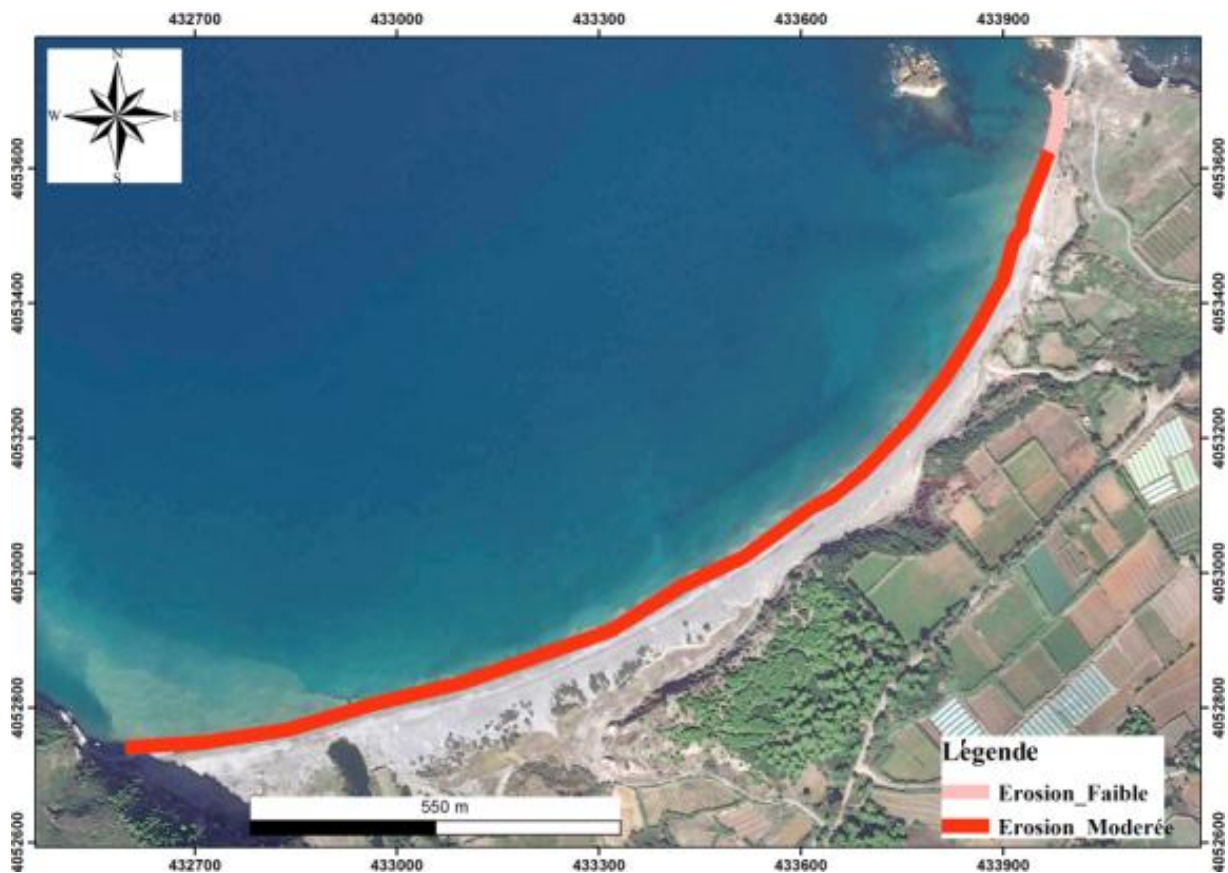
Figure 37 : Variation de trait de côte de la plage Hamdania à une échelle mi- séculaire.

La ligne de rivage a reculé avec un taux net de recul allant de -0,45 m/an à -1,48 m/an et ces valeurs sont largement supérieures à la marge d'erreur (Fig.38).



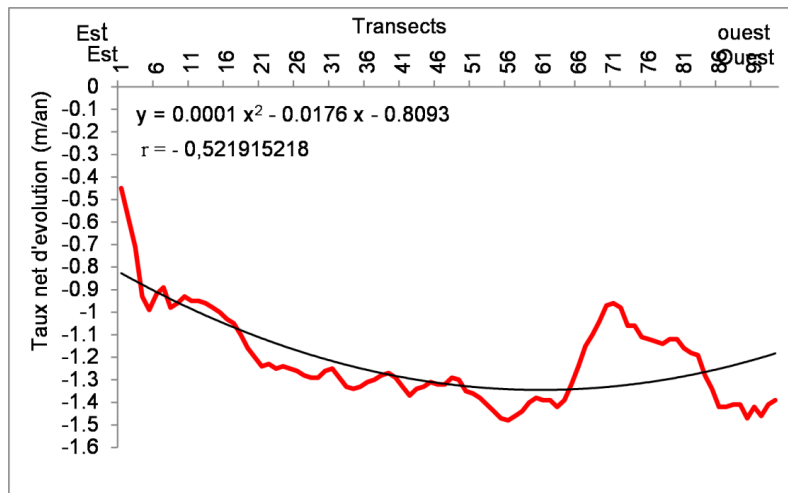
**Figure 38** : Taux net d'évolution de trait de côte de la plage Hamdania sur une période de 58 ans.

La cinématique du trait de côte de cette plage pour une période de 58 ans montre l'apparition de 2 classes : une zone à érosion faible  $< -1$  m/an dominant à l'Est et une zone à érosion modérée  $> -1$  m/an au Centre et Ouest de la plage avec 78% (Fig.39).



**Figure 39 :** Différentes classes d'évolution du trait de côte de la plage Hamdania entre 1959 et 2017.

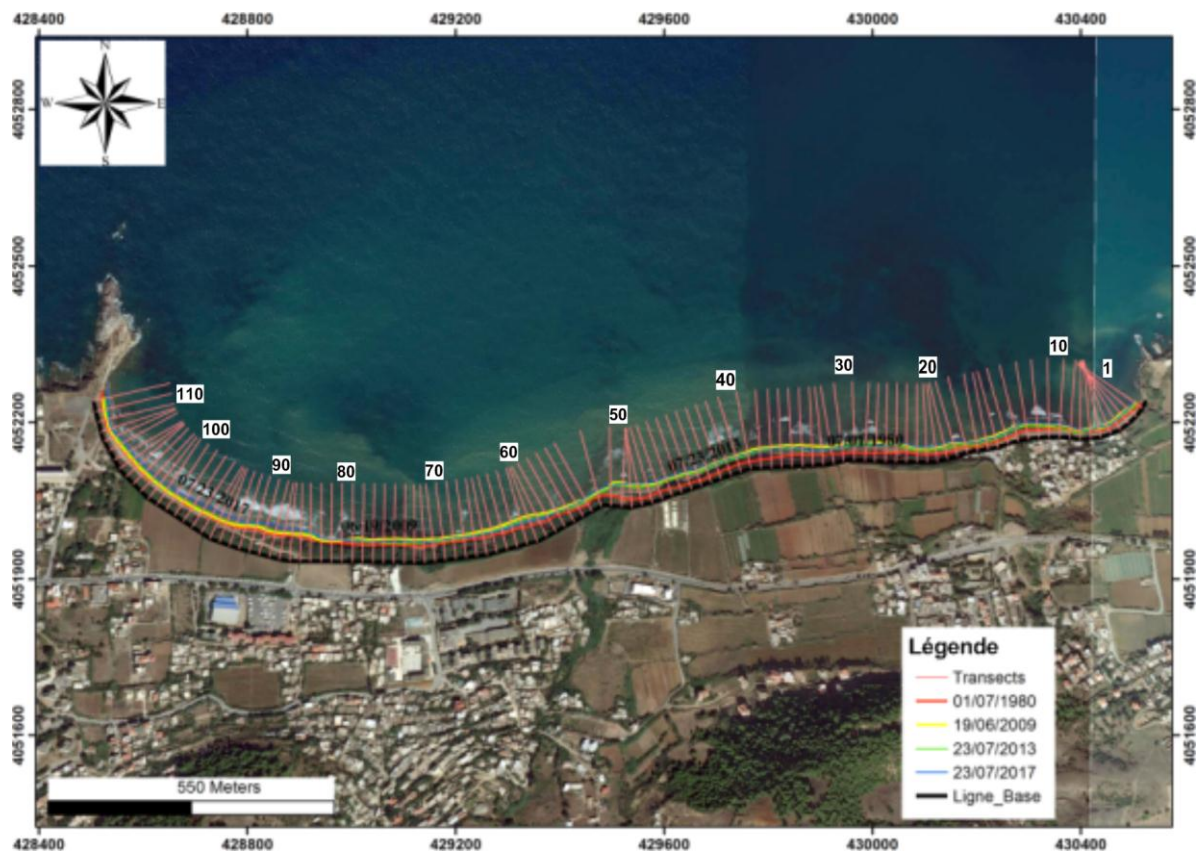
La recherche du lien entre les transects (orientation de la plage) et les taux nets d'évolution de la ligne du rivage ont abouti à une corrélation négative avec un coefficient de détermination  $r$  qui équivaut à  $-0,52$  et un lien faible entre les deux variables. L'ajustement entre ces deux dernières a été fait par une courbe de tendance qui suit une loi polynomiale d'ordre 2 dont l'équation est mentionnée sur la (Fig.40).



**Figure 40 :** Corrélation entre la direction des transects et le taux net d'évolution de la plage Hamdania entre 1959 et 2017.

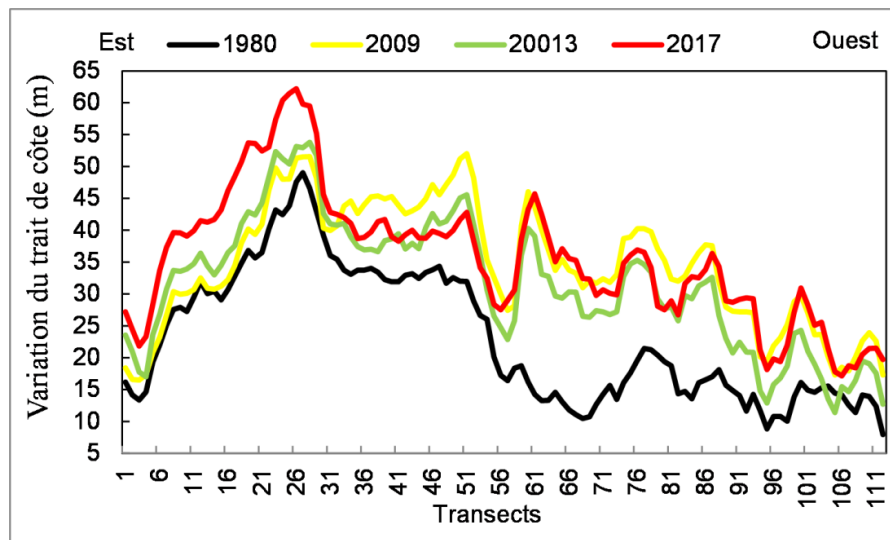
## 2.2. Évolution de la plage Tizirine entre 1980 et 2017

La plage Tizirine représente une longueur de 2250 m, divisée d'Est en Ouest par 112 transects, perpendiculaires au rivage et équidistants de 20 m (Fig.41).



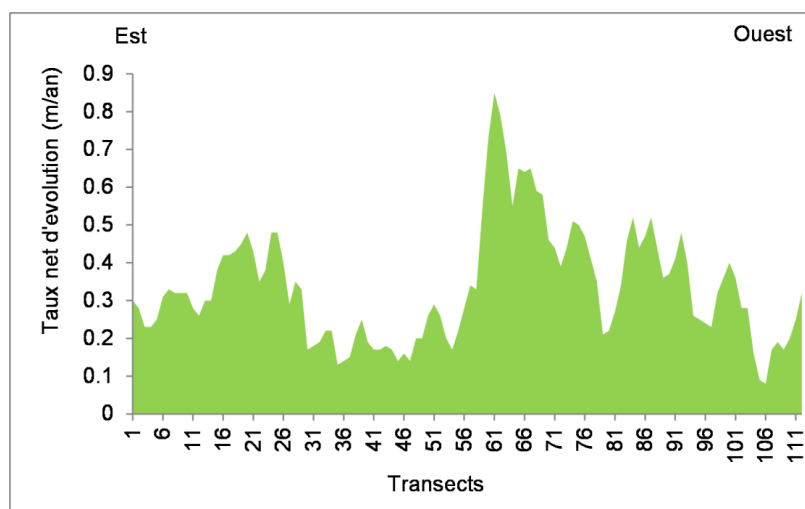
**Figure 41 :** Évolution de la ligne de rivage de la plage Tizirine entre 1980 et 2017 selon la direction des transects.

L'évolution du trait côte tout au long de cette période montre que la plage s'enrichit dans sa totalité, cette avancée varie de 3 m aux extrémités à 31,5 m au Centre. L'accrétion est plus importante au Centre par rapport à d'autres endroits de la plage (Fig.42).



**Figure 42 :** Variation de trait de côte de la plage Tizirine à une échelle mi-séculaire.

Les résultats du taux net de mobilité marquent des valeurs plus ou moins homogènes et se situent entre 0,08 m/an et 0,85 m/an, avec une part incluse dans la marge d'erreurs et donc considérées comme stables. Elles se situent entre les transects 1 à 14, 30 à 56, 79 à 81, 94 à 98, et 102 à 112 (Fig.43).



**Figure 43 :** Taux net d'évolution de trait de côte de la plage Tizirine sur une période de 37 ans.

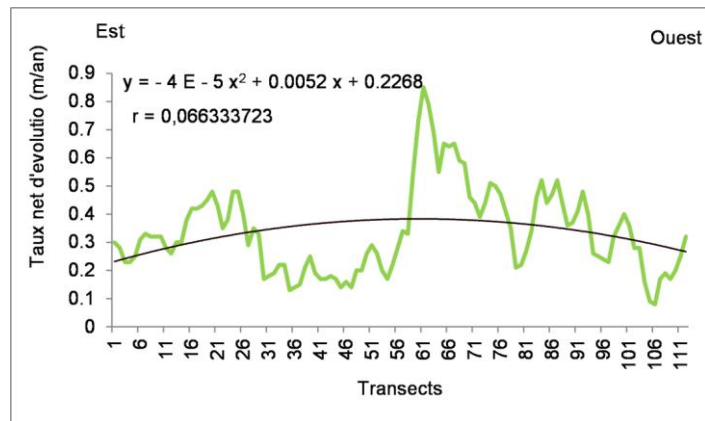
Pour une période de quatre décennies (37 ans), des zones stables et des zones de faible accumulation sont rencontrées sur la plage. Les zones stables dominent aux extrémités avec un taux  $< 0,3$  m/an (soit 70%).

Par contre les zones à accumulation faible dominent au Centre de la plage avec un taux qui ne dépasse pas 0,85 m/an (soit 30%) (Fig.44).



**Figure 44 :** Différentes classes d'évolution de trait de côte de la plage Tizirine entre 1980 et 2017.

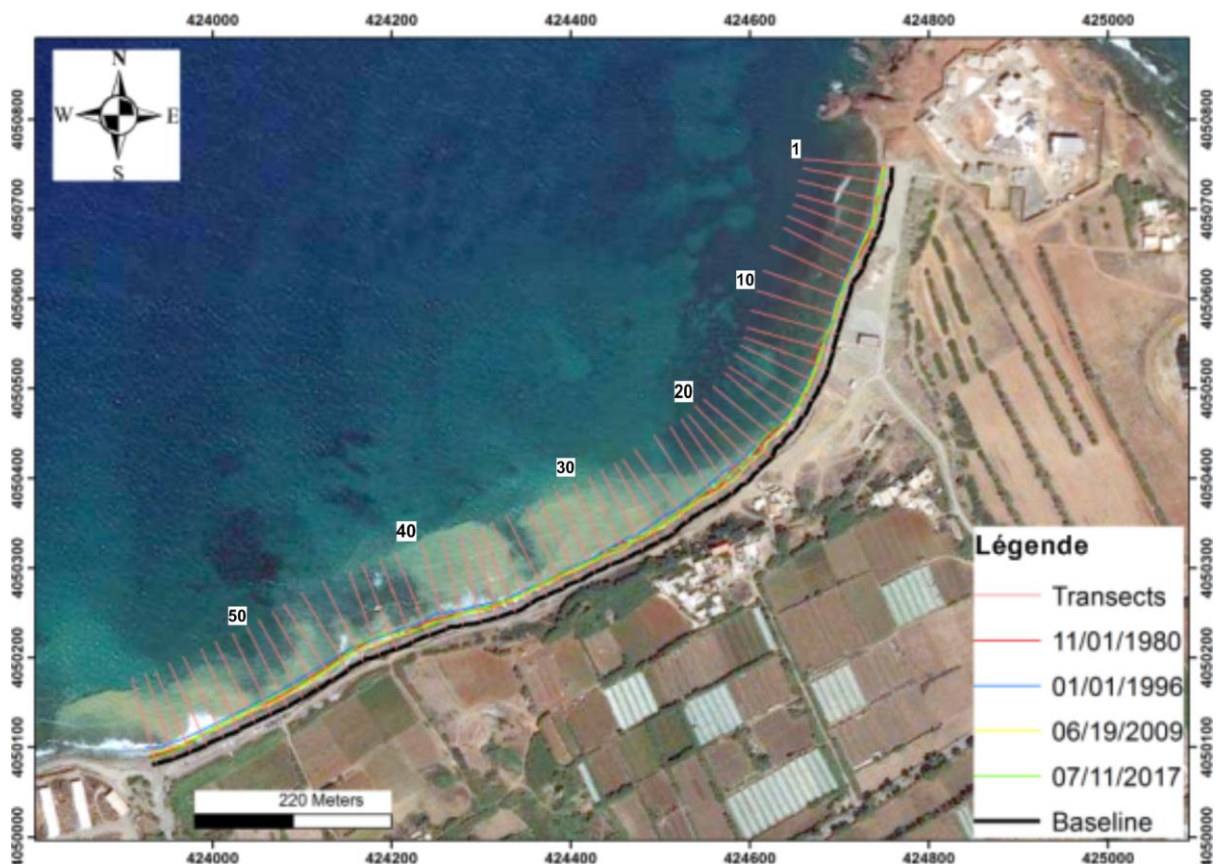
La corrélation effectuée entre les transects (orientation de la plage) et les taux nets de mobilité de la ligne de rivage sont presque nuls dont le coefficient de détermination  $r$  est de 0,06 indiquant un lien très faible entre les deux variables. La courbe d'ajustement est légèrement bombée vers les transects centraux, elle suit une loi polynomiale d'ordre 2 dont l'équation est mentionnée sur la (Fig.45).



**Figure 45 :** Corrélation entre la direction des transects et le taux net d'évolution de la plage Tizirine entre 1980 et 2017.

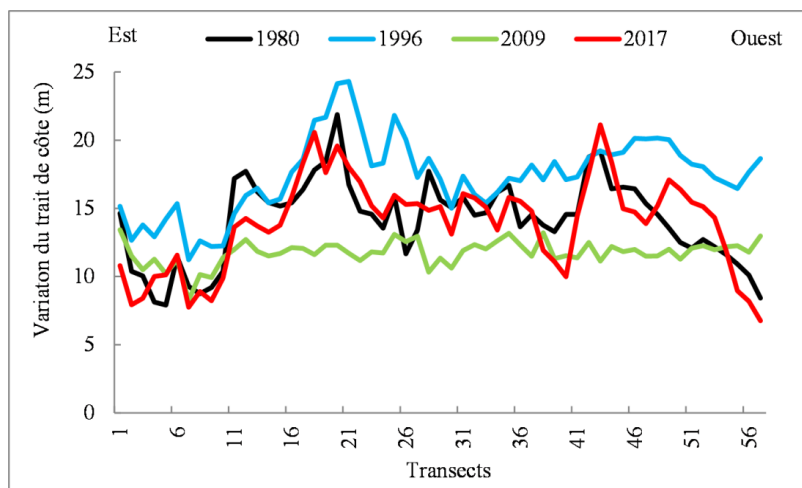
### 2.3. Évolution de la plage Centre entre 1980 et 2017

La plage Centre représente une longueur de 1150 m, divisée d'Est en Ouest par 57 transects, perpendiculaires au rivage et équidistants de 20 m (Fig.46).



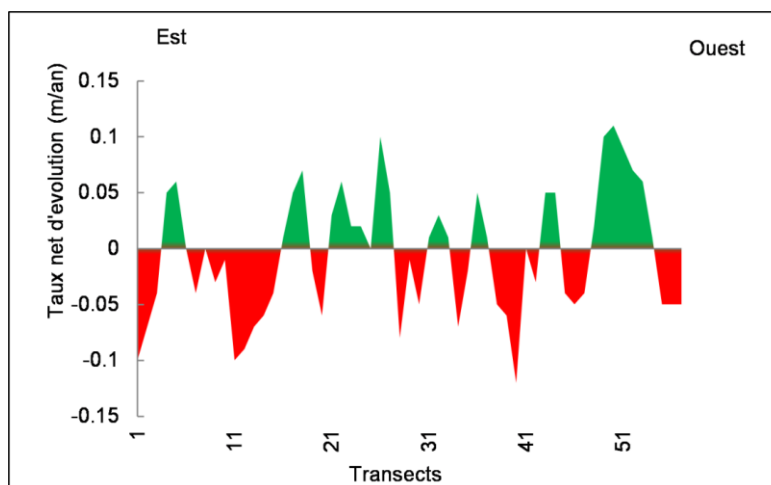
**Figure 46 :** Évolution de la ligne de rivage de la plage Centre entre 1980 et 2017 selon la direction des transects.

Durant cette période, la plage Centre a connu une évolution se manifestant tantôt par une érosion tantôt par une accrétion, cette évolution varie de - 4,5 m à 4 m (Fig.47).



**Figure 47 :** Variation de trait de côte de la plage Centre à une échelle mi- séculaire.

Les taux nets d'évolution oscillent entre -0,12 m/an et 0,11 m/an, ces valeurs sont comprises dans la marge d'erreur. Cela témoigne de la stabilité de la plage (Fig.48).



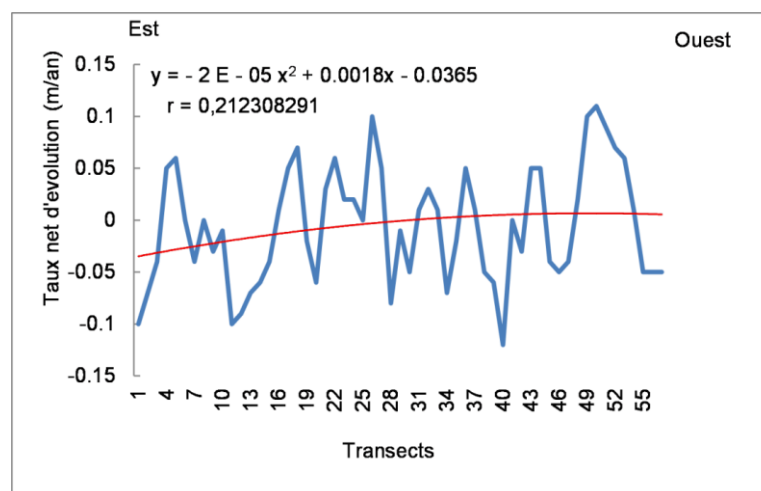
**Figure 48 :** Taux net d'évolution de trait de côte de la plage Centre sur une échelle de 37 ans.

La cinématique du trait de côte pour une période de quatre décennies (37 ans) montre que la plage est stable le long de cette période où l'engraissement et l'amaigrissement sont inférieurs à la marge d'erreur (Fig.49).



**Figure 49 :** Stabilité de rivage de la plage Centre entre 1980 et 2017.

La corrélation effectuée entre les transects (orientation de la plage) et le taux net d'évolution de la ligne de rivage est positif  $r = 0,21$ , déterminant un lien très faible entre les deux variables. La courbe de tendance suit une loi polynomiale d'ordre 2 dont l'équation est mentionnée sur la (Fig.50).



**Figure 50 :** Corrélation entre la direction des transects et le taux net d'évolution de la plage Centre entre 1980 et 2017.

#### 2.4. Évolution des surfaces des plages entre 1959 et 2017

La cartographie de l'évolution surfacique des plages sableuses du littoral de Cherchell pour une période mi-séculaire a permis de calculer les surfaces d'érosion et d'accrétion. Les résultats obtenus témoignent d'une récession de la plage Hamdania avec une surface perdue de  $-98157,8 \text{ m}^2$  (soit  $-9,8 \text{ ha}$ ) de terrain perdue pour cette plage, et une accrétion sur la plage Tizirine avec une surface gagnée de  $23115,8 \text{ m}^2$  (soit  $2,3 \text{ ha}$ ) de terrain gagné. Ses résultats sont représentés par un histogramme (Fig.51).

La surface perdue pour la plage Hamdania est de l'ordre de  $-1692,37 \text{ m}^2/\text{an}$  ou bien  $-0,16 \text{ ha/an}$ , et la surface gagnée par la plage Tizirine est de l'ordre de  $624,75 \text{ m}^2/\text{an}$  ou bien  $0,06 \text{ ha/an}$ . L'érosion est presque trois fois plus importante que l'accrétion.

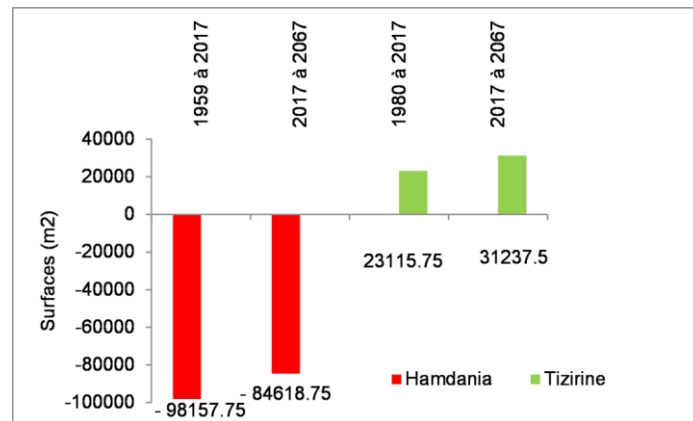
#### 2.5. Évolution future des plages entre 2017 et 2067

La dynamique future du trait de côte ne serait probablement que la continuation de l'évolution actuelle, si on considère les mêmes conditions topo bathymétrique et hydrodynamique qui règnent actuellement sur les plages.

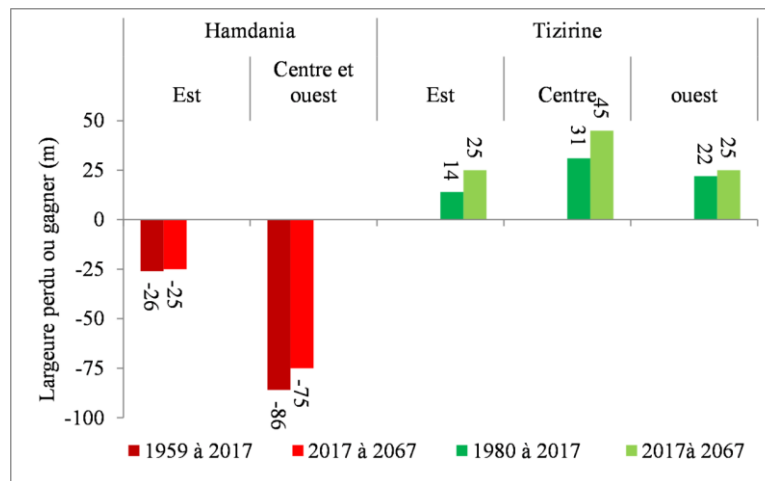
Un scénario tendanciel a été projeté sur une période de 50 ans, les résultats obtenus sont représentés comme suit :

La plage Hamdania continue toujours en récession et risque de perdre une largeur d'environ  $-25 \text{ m}$  à l'Est et  $-75 \text{ m}$  au Centre et Ouest. La plage Tizirine continue en accrétion et bénéficie d'une largeur d'environ  $25 \text{ m}$  à l'Est et Ouest et près de  $45 \text{ m}$  au Centre (Fig.52).

Les valeurs obtenues, pour la variation future du trait de côte du littoral de Cherchell pour la période allant de 2017 jusqu'à 2067, ont permis d'estimer les valeurs des surfaces gagnées ou perdu pour chaque plage. La plage Hamdania risque de perdre une surface de  $-84619 \text{ m}^2$  (soit  $-8,4 \text{ ha}$ ), par contre la plage Tizirine gagnerait une superficie de  $31237,5 \text{ m}^2$  (soit  $3,1 \text{ ha}$ ). Ces résultats estimés pour les surfaces sédimentaires témoignent d'une récession nettement supérieure comparée à l'accrétion. Ses résultats sont représentés sur le même histogramme de l'évolution passée des surfaces sédimentaire pour les plages du littoral de Cherchell (Fig.51).



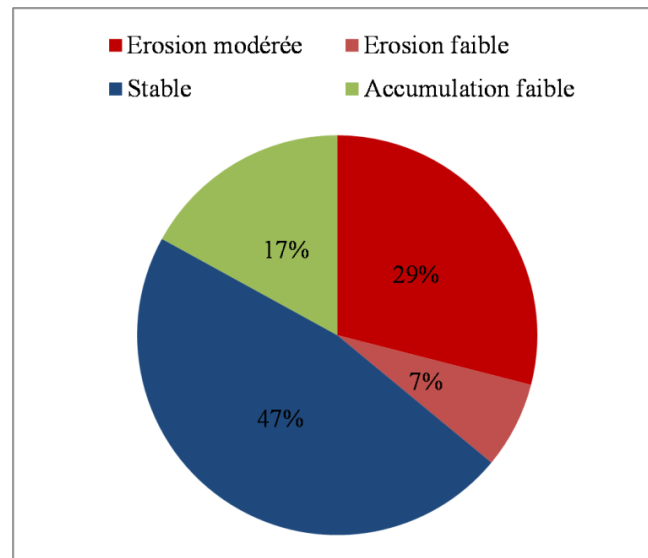
**Figure 51 :** Évolution des superficies des plages Hamdania et Tizirine le long de la période d'étude et leurs devenirs dans les 50 prochaines années (2017 à 2067).



**Figure 52 :** Évolution des largeurs des plages Hamdania et Tizirine le long de la période d'étude et leurs devenirs dans les 50 prochaines années (2017 à 2067).

### 3. Discussion

Les résultats obtenus concernant la variation spatio-temporelle des trois plages étudiées du littoral de Cherchell sont les suivants : 17% de ce littoral bénéficie d'une faible accretion localisée au centre du littoral étudié et qui ne dépasse pas 0,85m/an, une rescision faible à modérée pour 36% de ce littoral (7% érosion faible, 29% érosion modérée), localisé à l'Est et qui varie de -0,45 m/an à -1,48 m/an, et près de la moitié du littoral (47%) est stable localisé au centre et à l'Ouest (Fig.53).



**Figure 53** : Pourcentages des surfaces, accrétés, stables et érodés, des trois plages étudiées.

Le suivi de l'évolution des plages étudiées, fait ressortir que 47 % du rivage sont stables (près de la moitié du rivage étudié), au niveau de la plage Centre et une partie de la plage Tizirine. Par contre l'accrétion ne représente qu'une petite partie du littoral étudié (soit 17%) et se localise au centre de la plage Tizirine, avec un faible taux d'accumulation, donc on peut considérer que la plage est en équilibre.

Les corrélations effectuées entre l'orientation des plages et les transects générés indiquent des liens faibles, ce qui témoigne que l'érosion, l'accrétion et la stabilité marquée sur les trois plages ne dépendent pas de l'orientation de ses plages.

La récession localisée à la plage Hamdania, représente plus d'un tiers du rivage étudié et vue la faible corrélation entre l'orientation de la plage et le taux d'évolution, l'origine de cette érosion est due essentiellement aux activités anthropiques qui se traduisent par :

- La construction de barrage Boukerdene à l'arrière-pays sur le lit d'Oued El Hachem en 1992, ce barrage joue le rôle d'un piège à sédiment (piège 0,21 hm<sup>3</sup> des sédiments par année), créant ainsi une crise sédimentaire (déséquilibre du bilan sédimentaire entre la plage et la mer).
- L'extraction abusive de sable de cette plage et celui de son lit d'oued durant la décennie noire qui a vécu l'Algérie dans les années 1990 pour répondre au besoin de construction.

- Sur-fréquentation estivale des plages (plus de 6 millions d'estivants destinées à la plage Hamdania d'après la Direction Générale de la Protection Civile [*PAC in DGPC, 2016*] et apparition des parkings sur le haut de la plage.
- Les rejets agricoles et domestiques qui se déversent directement en mer sans aucun traitement et qui nuisent à la flore marine qui joue un rôle très important pour le maintien de l'équilibre sédimentaire des plages.

Si le scénario de l'évolution future des plages du littoral de Cherchell continue de la même vitesse, la plage Hamdania risque de disparaître complètement d'ici à la fin de siècle.

### Conclusion

À l'instar de tout le littoral algérien, le rivage de Cherchell connaît aussi un recul assez important se traduisant par des pertes irréversibles de sédiments. Les causes de cette diminution de l'espace littoral sont attribuées à l'impact humain, d'abord par la mise en place d'un barrage sur l'oued El Hachem ensuite par l'extraction de sable licite ou illicite sur les plages et les lits d'oueds et là sur fréquentation des plages. Tout ceci va diminuer considérablement les quantités de sable acheminées vers la mer et par conséquent avoir un impact sur le bilan sédimentaire qui impacte directement la morphologie côtière.

À ces impacts liés à l'homme, on additionne les impacts liés aux changements climatiques qui peuvent amplifier l'érosion des plages. Les tempêtes vingtennales et cinquantenales sont très rapprochées dans le temps et deviennent annuelles ou quinquennales, ceci se traduit par des érosions successives du littoral.

Il faudrait noter que cette zone a été choisie comme une assiette pour la construction de futur méga-port commercial de Hamdania (port centre).

Le problème d'érosion côtière qui touche la plage Hamdania est inquiétant, elle risque de disparaître à long terme. Cette plage doit être préservée contre l'extraction abusive de son sable et celui de lit d'Oued.

L'utilisation des systèmes d'informations géographiques dans l'étude de la cinématique côtière révèle un intérêt majeur, le calcul des évolutions de la ligne de rivage est facilement effectué en utilisant des techniques géo spatiales et des calculs statistiques en utilisant l'outil DSAS, ces outils fournir des informations précises sur l'évolution du trait de côte. C'est un bon outil d'aide à la décision, pour une meilleure intervention dans un ordre prioritaire.

Après avoir détecté une érosion au niveau de la plage Hamdania, et vue que la plage est sous forme d'une baie donc ne favorise pas le déplacement des sédiments or des caps, on'

a opté a une simulation numérique de fonctionnement hydro-sédimentaire on utilisant le logiciel Mike21. On cherche à détectés la présence d'un courant de retour à l'origine de l'érosion de cette plage. Qui fera l'objet de deuxième chapitre de cette partie.

## **Chapitre 2 : Fonctionnement hydro sédimentaire du littoral Est de Cherchell**

## Introduction

Les zones littorales ont toujours présenté un grand intérêt dans le monde entier et sont, aujourd'hui, le siège d'activités multiples (loisirs, commerce, agricole). Ces zones connaissent cependant une érosion importante suite au déséquilibre du transport littoral découlant de facteurs naturels et anthropiques [Otmani, 2020].

L'analyse du fonctionnement hydro-sédimentaire dominant sur un littoral est indispensable pour toute étude d'aléas littoraux (recul du trait de côte, submersion marine...) comme une première phase avant la caractérisation et la cartographie des aléas [Khalfani, 2014]. Cette phase tente de comprendre les évolutions physiques du littoral, sous l'effet de multiples facteurs, climatiques et météorologiques. Elle démarre par une analyse globale comprenant notamment une analyse géomorphologique, une analyse sédimentologique, une analyse des conditions météorologiques et une analyse hydrodynamique pour aboutir à un modèle numérique qui superpose les processus hydro-sédimentaires (houle, courant et transport sédimentaire) [DHI, 2007].

Afin de comprendre le phénomène de la stabilité des côtes (particulièrement les régions sableuses), il est primordial d'étudier les facteurs qui animent la dynamique sédimentaire le long de ces côtes.

L'objectif principal de cette étude consiste à reconstituer le climat hydro-sédimentaire qui a dominé à l'Est de Cherchell afin de comprendre l'origine de phénomène d'érosion observé au niveau de la plage Hamdania. Ce modèle superpose les processus hydro-sédimentaires (Houle, courant et transport sédimentaire).

### 1. Approche méthodologique

Plusieurs approches ont été utilisées pour calculer le transport total des sédiments non cohésifs. Certaines méthodes consistent à faire la somme du transport en suspension et du transport par charriage [DHI, 2007].

La modélisation numérique de fonctionnement hydro sédimentaire est basée sur des modèles mathématiques décrivant de manière suffisamment fiable les phénomènes physiques. Le recours à une telle modélisation constitue une approche pratique vu qu'elle permet de tester les effets d'un grand nombre de paramètres (physiques et géométriques) en un temps relativement court et à moindre coût comparativement à un modèle physique équivalent.

Le modèle numérique utilisé dans le cadre de cette étude est le Mike21 qui est un logiciel de calcul puissant développé par de l'institut hydraulique Danois. Il fait la simulation numérique des phénomènes physiques (houle, courant et transport sédimentaire) à grande échelle [DHI,

2007] et d'augmenter la résolution des mailles de calculs à certains endroits du domaine simulé à l'aide de grilles imbriquées [Khalfani, 2014]. Le MIKE 21, nécessite des données d'entrée qui sont : une carte bathymétrique réalisée par LEM [2016] (Fig.54), les données de la houle de SSMO au large (tableau 1), ainsi que la direction et la vitesse du vent.

Pour comprendre le fonctionnement hydro sédimentaire de la côte Est de Cherchell entre la plage Oued Oumazer à l'Est et la plage d'oued el Bella à l'Ouest, on 'a opté pour une approche numérique qui consiste à la modélisation intégrée du transport de sédiments qui fait appel à un système de modélisation intégrée comprenant trois modèles numériques : un modèle hydrodynamique, un modèle de vagues et un modèle de transport de sédiments non-cohésifs (sable) sous l'effet combiné des vagues et des courants.

Les modèles numériques choisis sont les modules SW (Spectral Waves model), HD (Hydrodynamic model) et ST (Sand Transport model) du système Mike21. Ces modèles se prêtent bien à une approche intégrée car ils sont déjà intégrés dans un même environnement de calcul du système couplé Mike21/3D.

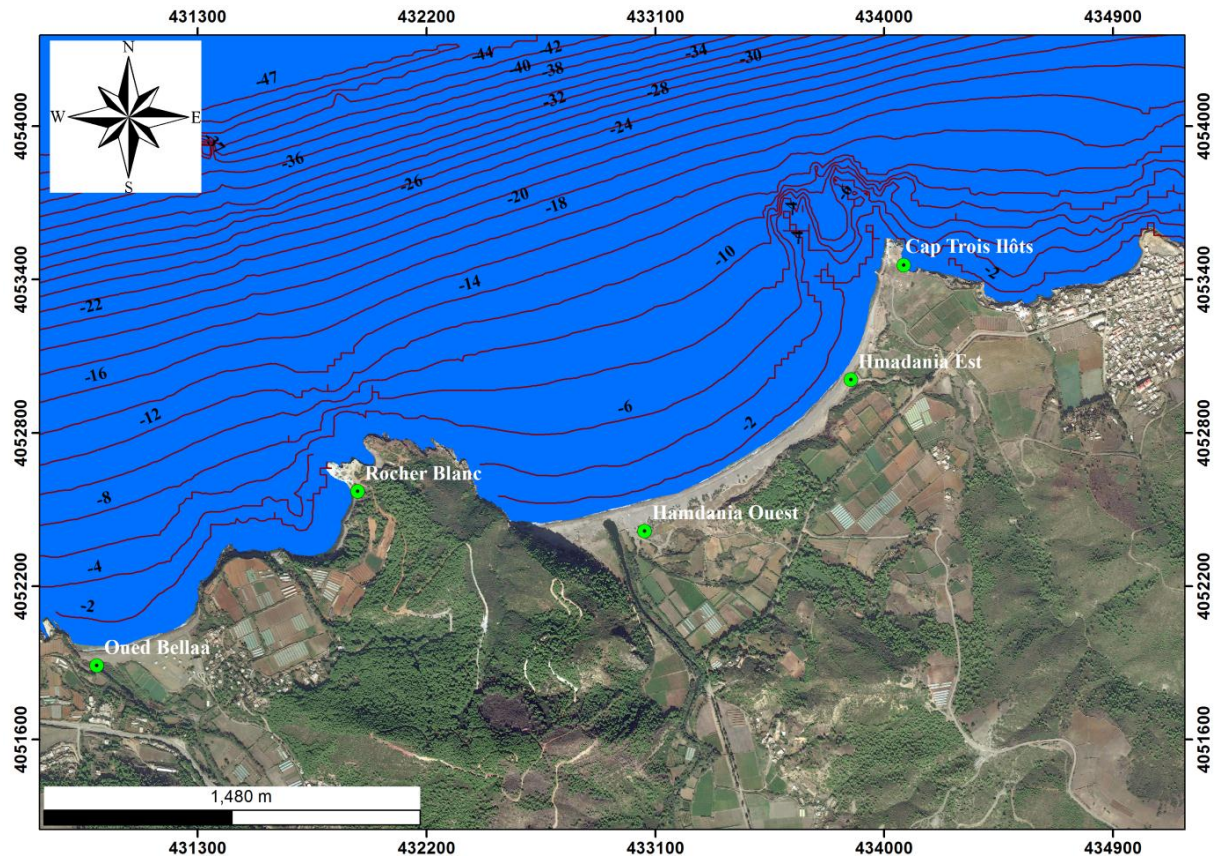
La première étape consiste à déterminer à l'aide du modèle SW le climat de houles au large. Les sortants de ce module permettront de calculer les courants causés par l'effet combiné des vents et des houles au moyen du module HD. Finalement, les courants générés par le module HD et les données de houles générées par le module SW seront pris en entrée par le modèle de transport de sédiment ST qui calcul alors le transport des sédiments non cohésifs durant la période de simulation. Ces modèles se prêtent bien à une approche intégrée car ils sont déjà intégrés dans un même environnement de calcul du système couplé Mike21\_3D.

## 1.1. Paramètres d'entrées

### 1.1.1. Le modèle de propagation des houles de large vers la côte MIKE21-Sw

Est un modèle spectral de vague qui décrit la propagation, la croissance et l'atténuation des vagues de courtes périodes en provenance du large vers les zones côtières peu profondes. Le modèle prend en compte les phénomènes de réfraction, de Shoaling, de diffraction perpendiculaire à la direction prépondérante de la houle et de dissipation d'énergie dû au déferlement et au frottement de fond. Le paramètre de rugosité du fond est considéré comme étant une constante égale à 0.04.

Les données nécessaires pour l'étude de la réfraction de la houle insérées en entrée du module SW sont : La bathymétrie (Fig.54), les directions des houles dominantes, la période et les hauteurs significatives aux frontières (Tableau.1).



**Figure 54 :** Bathymétrie de la région Est de Cherchell [LEM, 2016].

**Tableau 1 :** Données de houles par directions et par période de retour [SSMO in LEM 2016].

direction	Hs large (m)	Période de retour T (s)
NE 45°	2,5	8
N 360°	3	8
NW 315°	3	8
W 270°	3,5	8

Le modèle Mike21-Sw est appliqué entre autre dans le cadre d'études de transport de sédiment non-cohésif. Les vagues qui progressent vers le rivage produisent des cisaillements de radiation des vagues (wave radiation stresses en anglais). Les gradients horizontaux de ces cisaillements sont équivalents à des gradients de hauteur du niveau de l'eau et ils génèrent des courants associés indirectement aux vagues. Ces gradients horizontaux de niveau doivent être ajoutés aux gradients autrement produits par les marées, les vents et la pression atmosphérique dans les équations hydrodynamiques de conservation du mouvement. Les courants qui en résultent servent alors à transporter le sédiment non-cohésif. Ce modèle inclue deux types de formulations :

- Formules directionnelles, discrétise le domaine géographique, basée sur la paramétrisation de l'équation de conservation de l'action des vagues tout en gardant les caractéristiques des vagues dans l'espace directionnel [Holthuijsen, et al. 1989].
- Les formules spectrales, discrétise le domaine géographique et spectral, ou le spectre directionnel des fréquences de l'action des vagues est la variable dépendante [DHI, 2007].

### 1.1.2. Le modèle hydrodynamique MIKE21-HD

Est un modèle de calcul numérique hydrodynamique. Il simule les variations du niveau d'eau et du transport de volume en deux dimensions horizontales (2DH), en réponse à une multitude de forces (marée, vent et houle). Ce module est utilisé principalement pour simuler de nombreux phénomènes hydrauliques dont la marée, les courants induits par le vent et la houle ainsi que les surcotes. Le modèle simule la circulation des eaux dans des milieux tels que les zones côtières [DHI, 2007]. Les principaux paramètres considérés sont : le niveau de la mer est considéré invariable, Le vent (16 nœuds- voire partie I, Chapitre 2), la viscosité et la résistance sont considérées comme valeurs par défaut (0,28 et 32 respectivement).

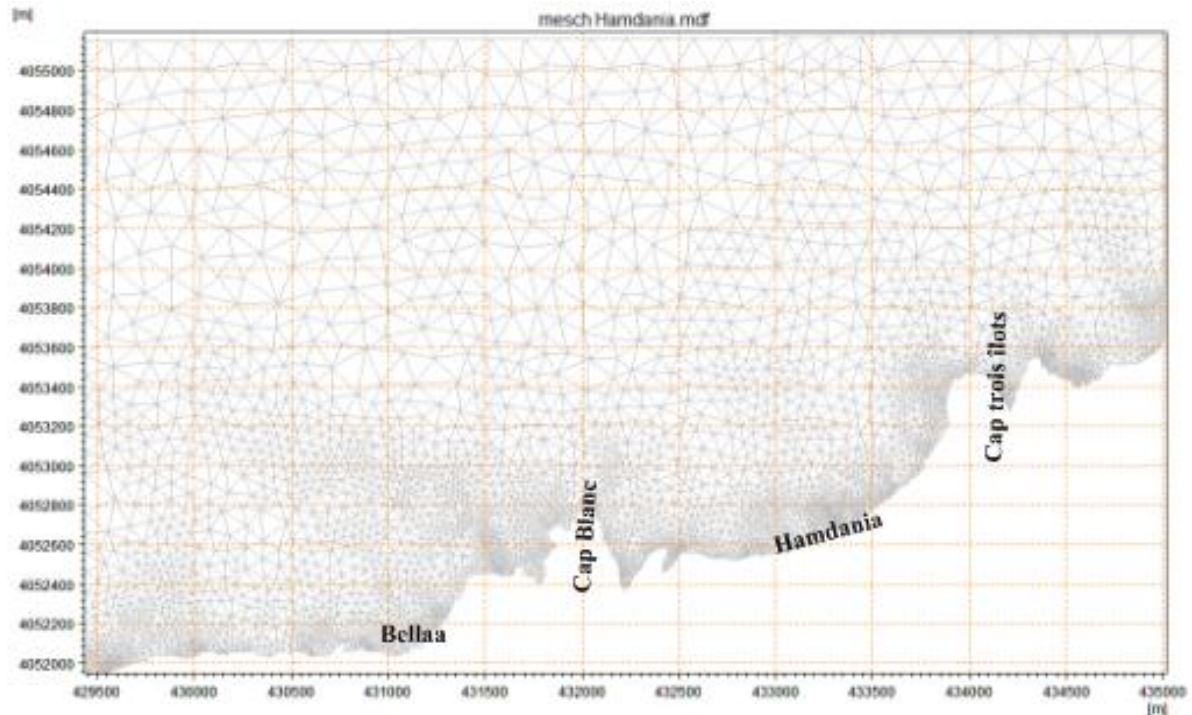
### 1.1.3. Le Modèle de transport des sédiments non cohésifs MIKE21-ST

Le modèle Mike21 ST est un modèle numérique qui calcul les taux de transport de sédiments non cohésifs (sable) sous l'action combinée des courants et des vagues. Les sédiments étudiés peuvent initialement avoir des tailles différentes et une gradation spatiale. Les courants qui transportent les sédiments sont causés par les marées, les vents, les vagues, ou une combinaison des deux ou des trois. Ces taux sont calculés à partir de données bathymétriques, des profondeurs instantanées de l'eau, les variations spatio-temporelles des courants et des vagues dans la région étudiée, les tailles des sédiments ( $125\mu_m < D < 250\mu_m$ ), la gradation spatiale des sédiments qui est de 1,4 et la porosité qui est de 0,4. Les sortants de module SW (Hm0 – Tp – Dir) et HD (Vitesses et directions des courants) simulés pour les quatre directions (45°NE, 360°N, 315°NW et 270°W) sont utilisés dans le module ST.

## 1.2. Configuration du modèle

La grille de calcul développée à l'aide du mesh Mike21-Zero. Cette grille est utilisée dans toutes les simulations effectuées dans le cadre de cette étude. La grille principale d'un maillage triangulaire comprend 10000 nœuds et 18000 éléments. Le domaine de calcul s'étend depuis l'Ouest de la plage d'oued Omazer à l'Est jusqu'à la plage d'oued Bella à l'Ouest sur une longueur de 6 Km. Une gradation de la définition du maillage permet

d'optimiser le rapport entre une bonne représentation des phénomènes physiques et des temps de calcul raisonnables. Les mailles les plus fines (environ 2m à 5m) se trouvent à la limite de trait de côte afin de bien représenter les résultats de simulation à ces endroits (Fig.55).



**Figure 55 :** Maillage triangulaire serré (mesh) de la région Est de Cherchell généré par le module Mike 0.

On a utilisé des valeurs de transport de sédiment interpolées dans une « table de sédiment Q3D généré en 72h » avant la simulation à l'aide d'utilitaires de génération de table de sédiment offerts avec le module Mike21-ST. Les valeurs de transport interpolées au préalable sont utilisées au cours de la simulation numérique et évitent l'effort de calcul additionnel si les mêmes transports doivent être calculés chaque fois que les mêmes paramètres de grains de sable, de vagues et de courants se présentent aux différents pas temporels de calcul. Les sortants de module SW ( $H_m0 - T_p - Dir$ ) et HD (Vitesses et directions des courants) simulés pour chaque direction sont utilisés dans le module ST.

On y retrouve trois frontières ouvertes : le Nord, l'Est et l'Ouest. La frontière du large se trouve au-delà de 45 m de profondeur et à 1000 m de rivage. La première étape consiste à déterminer à l'aide du modèle SW le climat de houles au large. Les sortants de ce module 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 des sédiments non cohésifs durant la période de simulation qui est de 2h environ pour chaque simulation (2hx12 simulation). Le transport de sable est simulé en chaque point du maillage par une formule de capacité de transport total (charriage + suspension) appliquée à des sédiments de granulométrie déterminée.

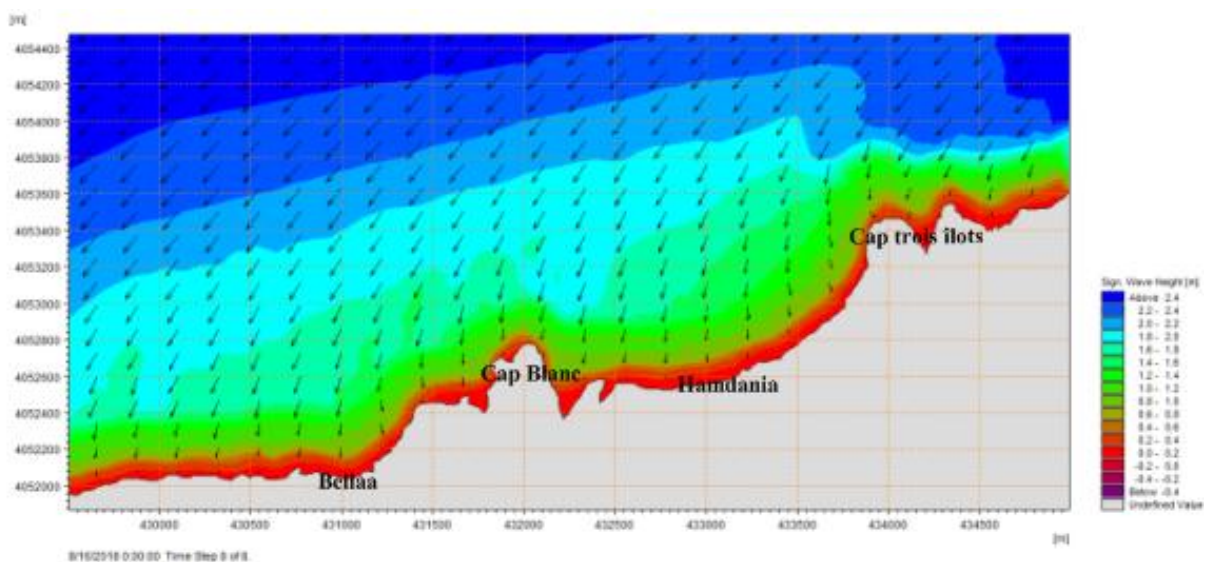
## 2. Résultats

### 2.1. Simulation des houles de large vers la côte

Dans les quatre cas, les houles des secteurs Ouest de forte amplitude sont les plus réfractées car elles présentent le plus petit coefficient de réfraction donc leurs énergies est conservée en franchissant la côte, suivi par les houles de Nord. Par contre les houles de Nord-Est et de Nord-Ouest, perpendiculaires au rivage, sont les moins réfractées.

#### 2.1.1. Houle de 45°NE

Les houles de direction 45°NE se réfractent vers l'Ouest dans le sens inverse d'une aiguille d'une montre avec des angles de déviation oscillant de 5° à l'Ouest au niveau de la plage d'oued el Bella et 20° au maximum à l'Est de la plage Hamdania au niveau de cap des trois îlots (Ras el Amenefouste) (Fig.56). Le coefficient de réfraction  $K_r$  atteint par cette houle est de 0,8. Sa hauteur ne dépasse pas 0,2 m dans la zone de déferlement.



**Figure 56 :** Plan de propagation de la houle de direction 45°NE,  $H_s=2,5$  m,  $T= 8s$ .

### 2.1.2. Houle 360°N

Cette houle se réfracte légèrement vers l'Est dans la direction d'une aiguille d'une montre avec des angles de déviation presque nuls ( $< 2^\circ$ ) (Fig.57). Le coefficient de réfraction  $H_0/H$  atteint par cette houle est de 0,66. Sa hauteur ne dépasse pas 0,4 m dans la zone de déferlement.

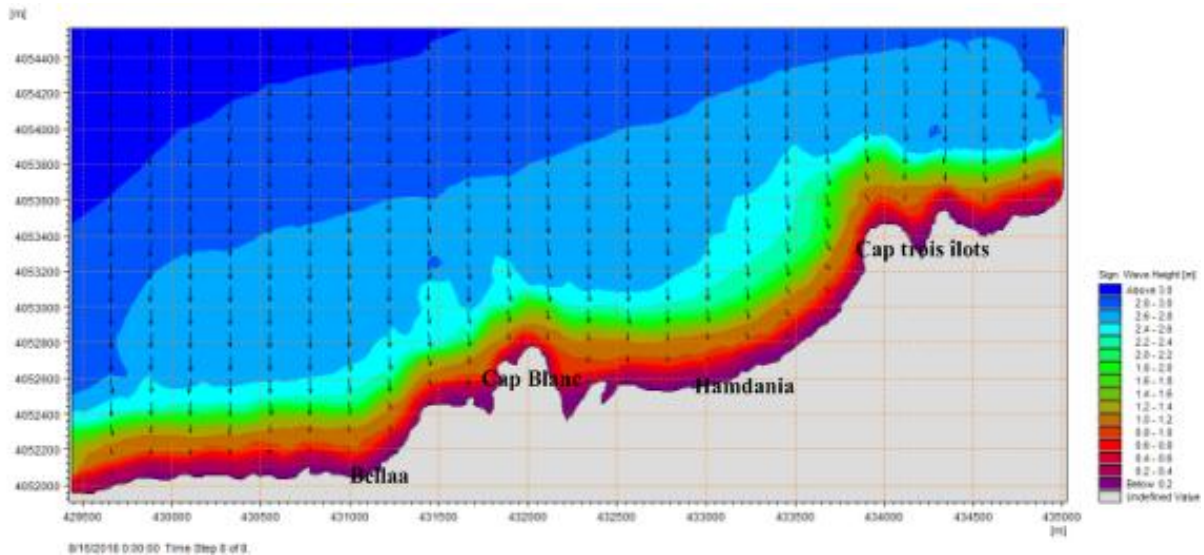


Figure 57 : Plan de propagation de la houle de direction 360°N,  $H_s=3$  m,  $T=8$  s.

### 2.1.3. Houle 315°NW

Cette houle est perpendiculaire au rivage, se réfracte vers l'Est dans la direction d'une aiguille d'une montre avec un angle de déviation presque nul (Fig.58). Le coefficient de réfraction atteint par cette houle est de 0,83. Sa hauteur ne dépasse pas 0,4 m dans la zone de déferlement.

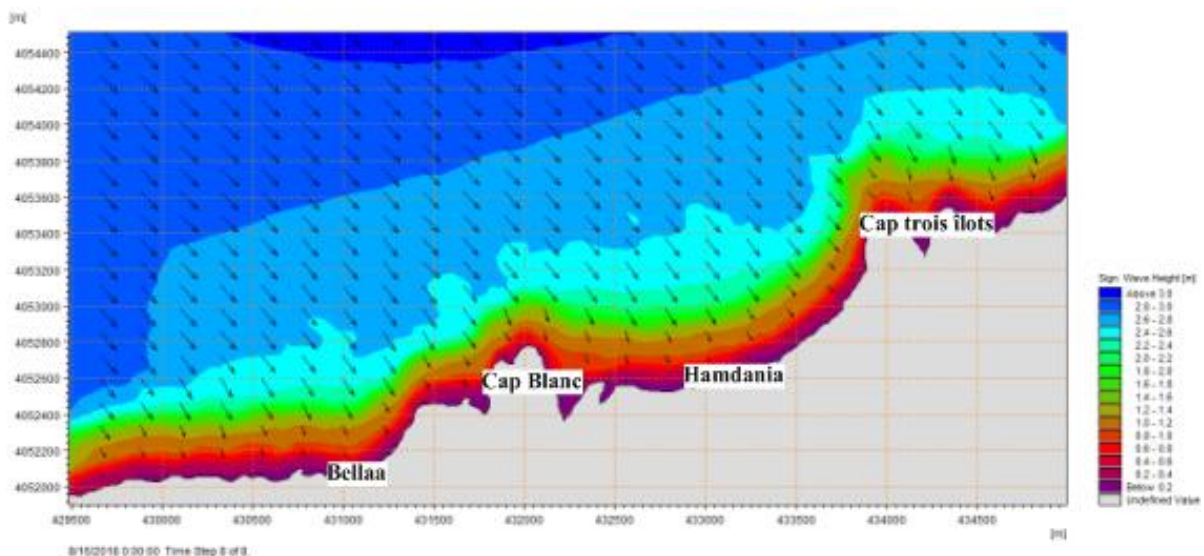
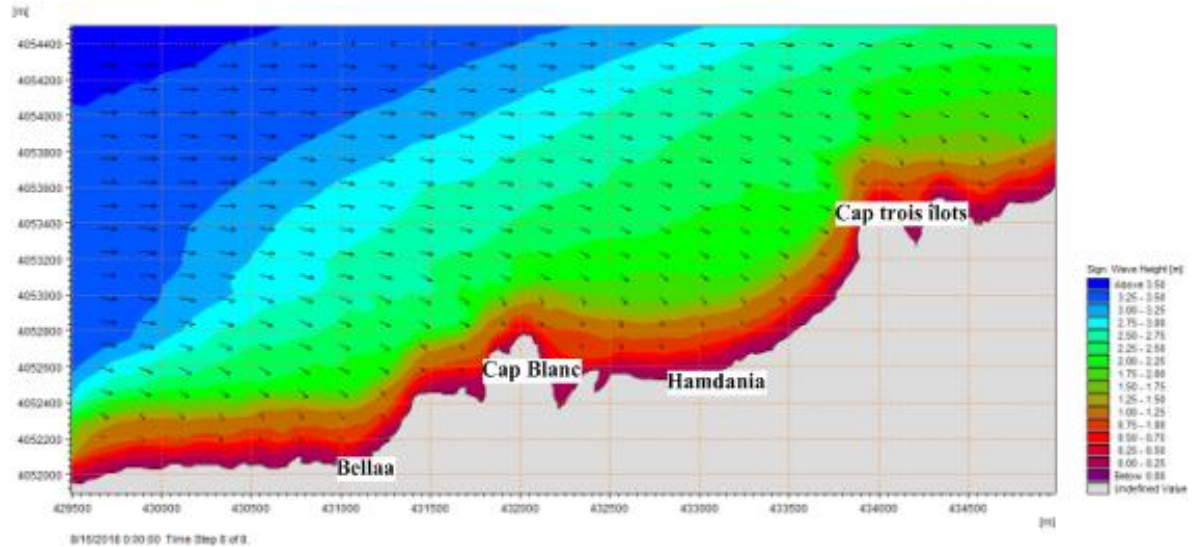


Figure 58 : Plan de propagation de la houle de direction 315°NW,  $H_s=3$  m,  $T=8$  s.

### 2.1.4. Houle 270°W

Cette houle se réfracte vers l'Est dans la direction d'une aiguille d'une montre avec un angle de déviation de 20° (Fig.59). Le coefficient de réfraction atteint par cette houle est très faible et dépasse pas 0,28. Sa hauteur ne dépasse pas 0,25 m dans la zone de déferlement.



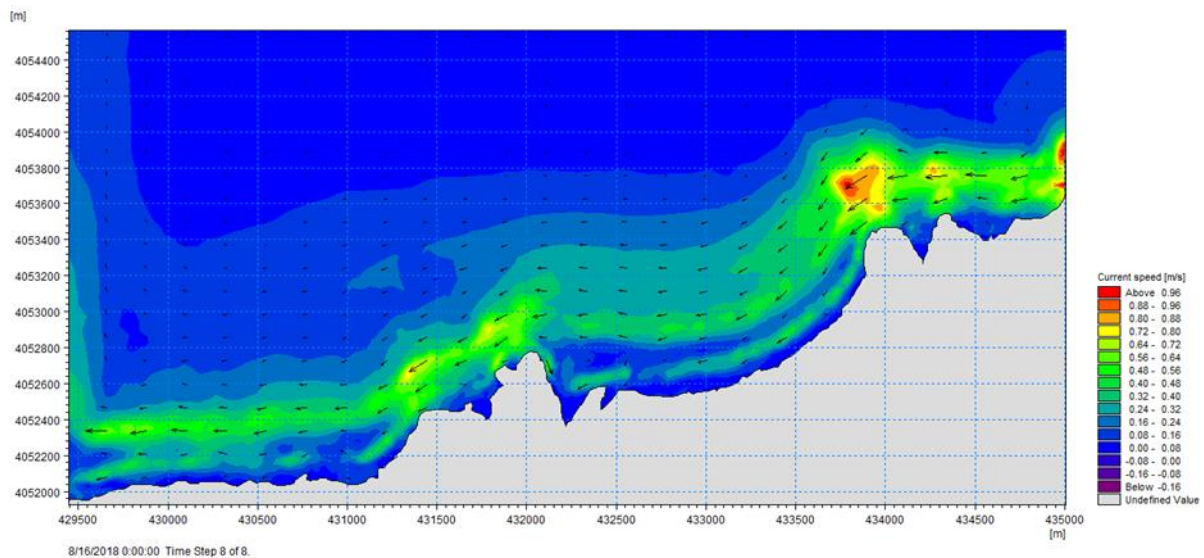
**Figure 59** : Plan de propagation de la houle de direction 270°W, Hs=3,5 m, T= 8s.

## 2.2. Simulation des courants générés par les houles et les vents

Les résultats auxquels on a abouti concernant la modélisation numérique des champs de courants induits par les houles calculées au moyen du modèle numérique Mike 21-HD pour les quatre directions sélectionnées, indiquent que la vitesse de courant est maximale aux alentours de 10 à 20 m de profondeur et la vitesse peut atteindre 0,80 m/s et 0,96 m/s pour toutes les conditions de houles modélisées. Au-delà de cette profondeur (> 20 m), la vitesse des courants devient minime et ne dépasse pas 0,16 m/s pour toutes les conditions de houles modélisées.

### 2.2.1. Houle 45°NE

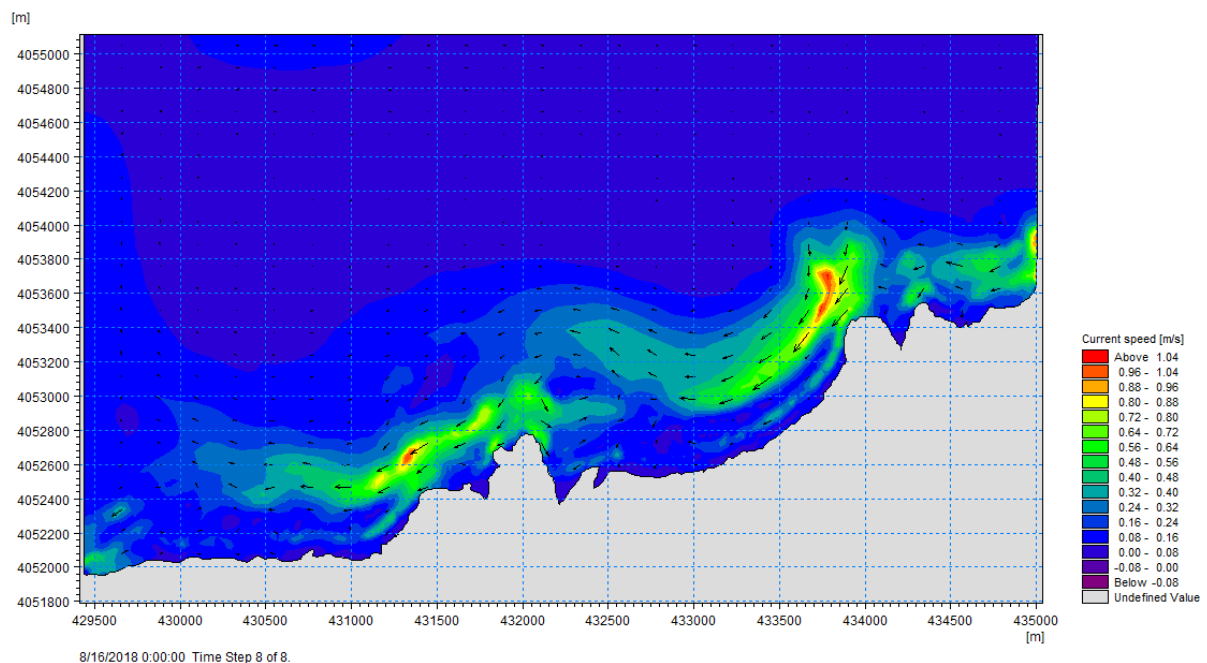
Cette direction de houle engendre un courant long shore de direction NE-SW dans la partie Est jusqu'au cap des trois îlots à partir desquels le courant change de direction vers le SW pour atteindre la plage Hamdania, puis la direction du courant devient Est-Ouest dans la partie Ouest. La vitesse du courant reste faible et ne dépasse pas 0,32 m/s au niveau de la plage Hamdania (Fig.60).



**Figure 60 :** Simulation des courants générés par les houles de secteur 45°NE.

### 2.2.2. Houle 360°N

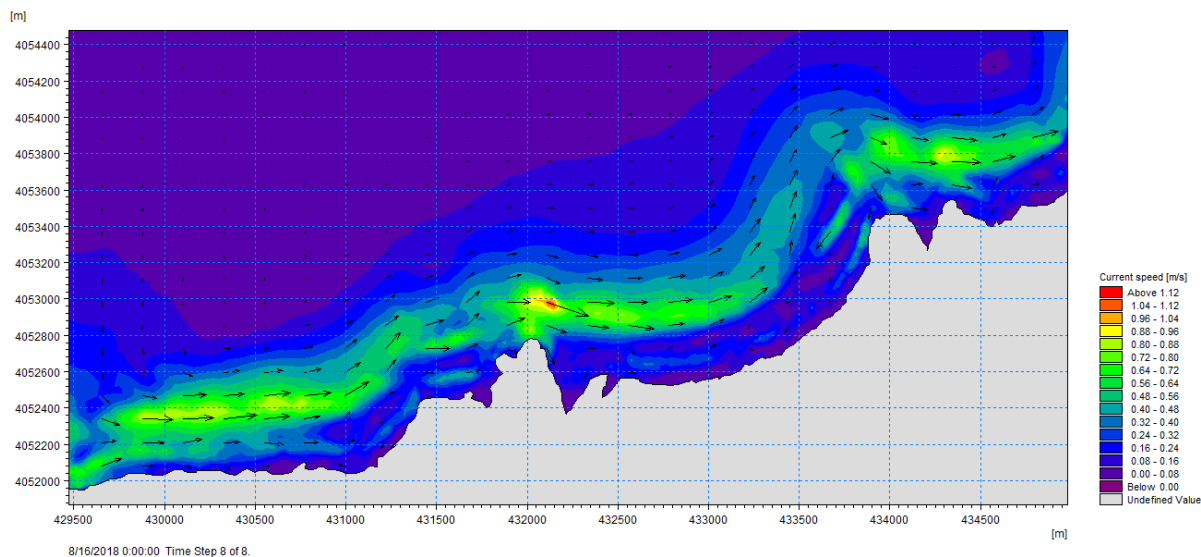
Cette direction génère un courant long shore de direction NE-SW dans la partie Est. Un courant giratoire dans le sens d'une aiguille d'une montre se forme au niveau de cap Blanc, la vitesse du courant est faible, ne dépassent pas les 0,32 m/s au niveau du la plage Hamdania (Fig.61).



**Figure 61 :** Simulation des courants générés par les houles de secteur 360°N.

### 2.2.3. Houle 315°NW

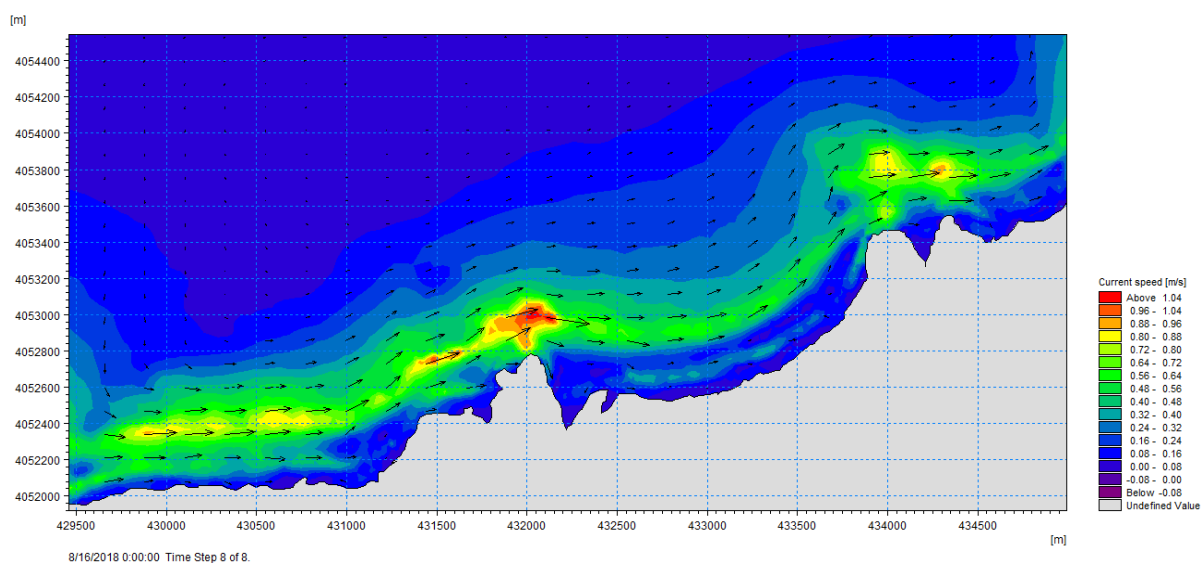
Cette houle provoque un courant long shore Ouest-Est dirigé dans le sens d'une aiguille d'une montre se forme le long de toute la côte et parfois devienne Nord-Sud au niveau des caps. La vitesse du courant reste faible et ne dépasse pas 0,24 m/s à l'exception du cap Blanc où la vitesse de courant est de 0,64 m/s (Fig.62).



**Figure 62 :** Simulation des courants générés par les houles de secteur 315°NW.

### 2.2.4. Houle 270°W

Un courant de dérive Est-Ouest se génère le long de la côte. Le courant dévié vers le sud au niveau du cap Blanc. La vitesse du courant reste faible et ne dépassent pas 0,56 m/s au niveau des caps et de 0,24 m/s sur les plages (Fig.63).



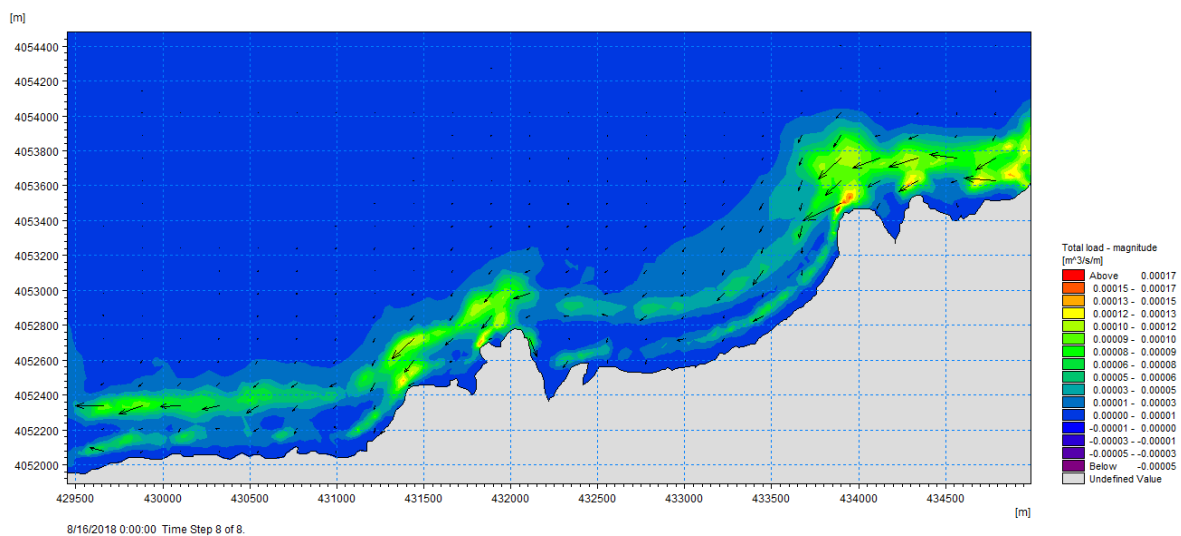
**Figure 63 :** Simulation des courants générés par les houles de secteur 270°W.

### 2.3. Simulation des transits sédimentaires sous l'effet de houle et de courant

La simulation du taux du transport des sédiments non cohésifs indique que le taux de transport moyen est identique pour les différentes conditions de houles modélisées, il est de l'ordre de  $315 \text{ m}^3/\text{an}/\text{m}$  le long de la cote, à l'exception des caps où le transport moyen est de  $3153 \text{ m}^3/\text{an}/\text{m}$ .

#### 2.3.1. Houle $45^\circ\text{NE}$

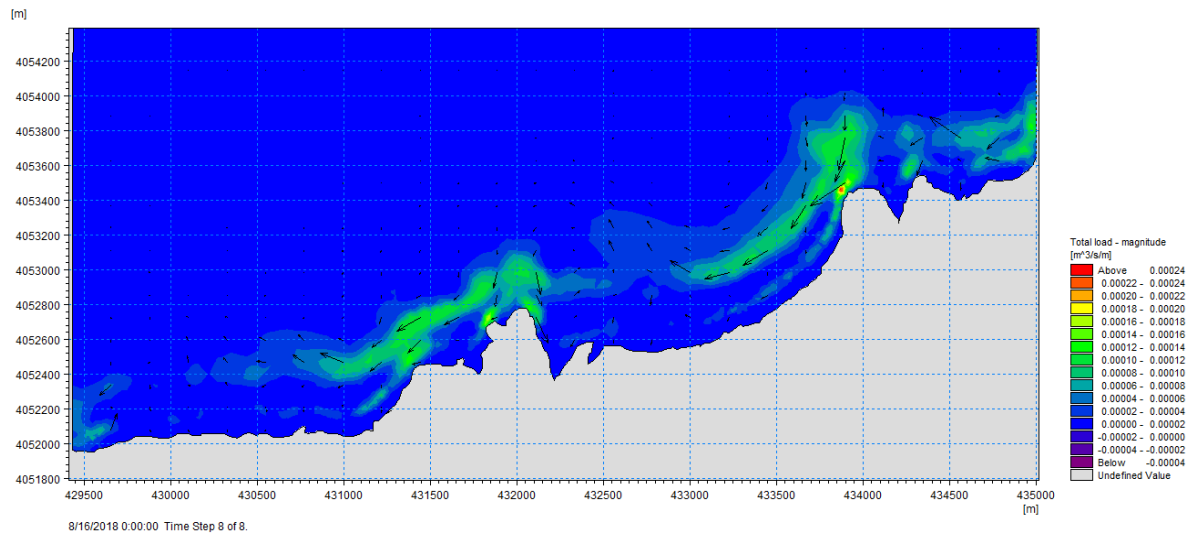
Engendre un courant Est-Ouest qui provoque une dérive littorale dans le sens contraire d'une aiguille d'une montre (Est-Ouest) au niveau de la plage Hamdania (Fig.64).



**Figure 64** : Simulation du transport sédimentaire généré par la Houles  $45^\circ\text{NE}$ .

#### 2.3.2. Houle $360^\circ\text{N}$

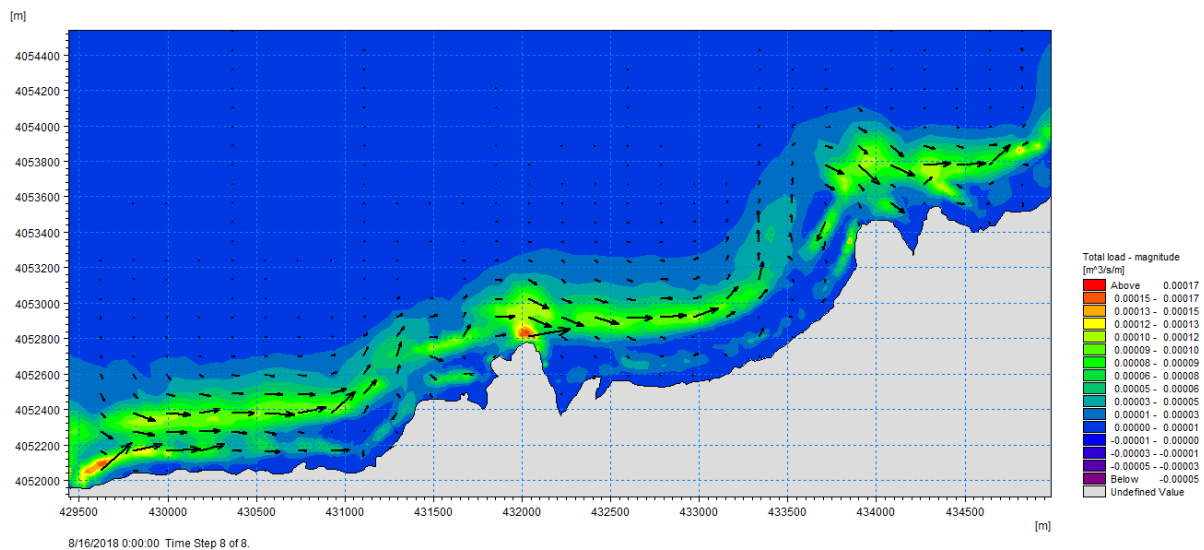
Engendre un courant qui circule dans la direction Est-Ouest, et qui déplace les sédiments vers l'Ouest. Cette dérive prend la direction Nord-Sud puis remonte vers le Nord au niveau de la plage Hamdania, et un courant giratoire au large de cap blanc qui provoque une divergence des sédiments vers la plage d'oued el Bella (Fig.65).



**Figure 65 :** Simulation du transport sédimentaire généré par la Houles 360°N.

### 2.3.3. Houle 315°NW

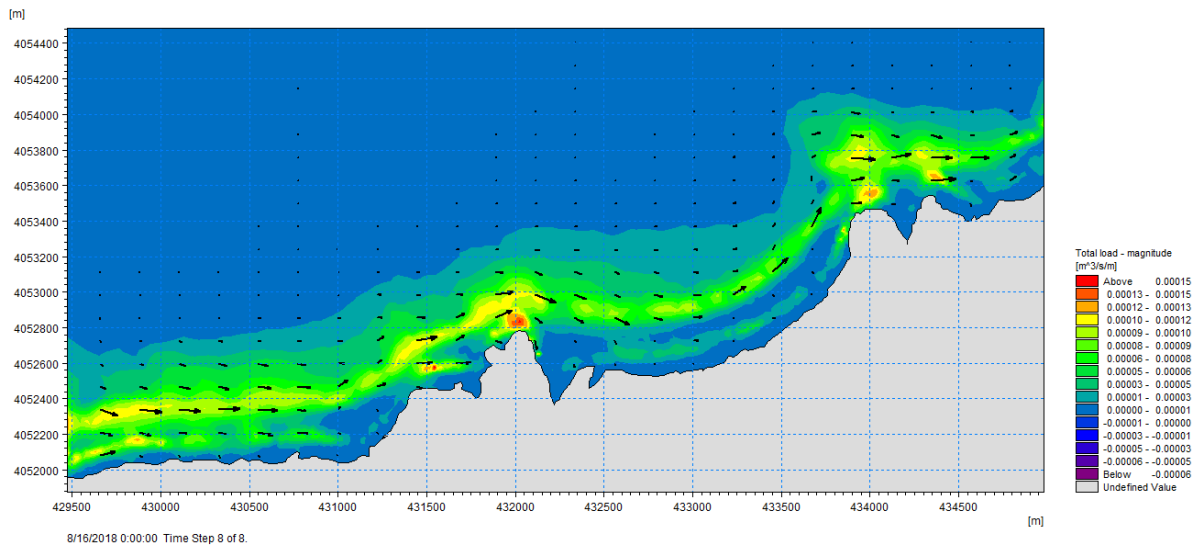
Engendre un courant Ouest-Est qui provoque une dérive littorale parallèle à la côte dans le sens d'une aiguille d'une montre (Ouest-Est) se génère au niveau de la plage Hamdania (Fig.66).



**Figure 66 :** Simulation du transport sédimentaire généré par la Houles 315°NW.

### 2.3.4. Houle 270°W

Engendre un courant Ouest-Est qui provoque une dérive littorale parallèle à la côte dans le sens d'une aiguille d'une montre (Ouest-Est) se génère au niveau de la plage Hamdania (Fig.67).



**Figure 67** : Simulation du transport sédimentaire généré par la Houles 270°W.

### 3. Discussion

L'étude de propagation des houles du large vers la côte nous a permis de mettre en évidence une déviation des angles d'incidence vers l'Est pour les houles de direction Nord-Ouest, Nord, et Ouest avec des angles d'incidence de 2°, 0° et 20° respectivement et pour des coefficients de réfraction  $K_r$  de 0,66, 0,83 et 0,28 respectivement. Par contre les houles de direction Nord-Est se réfracte vers le Ouest avec un angle d'incidence de 5° à 20° et un coefficient de réfraction de  $H_0/H = 0,8$ . Cette déviation de la direction de la propagation des houles on arrivant à la côte est responsable de la génération des courants littoraux qui charrient des sédiments dans les quatre directions, du l'Est vers le Ouest pour un régime de houle en provenance du Nord-Est, du l'Ouest vers l'Est pour un régime de houle en provenance de de Nord-Ouest et de l'Ouest, de Nord vers le Sud et de Sud vers le Nord pour la houle de direction Nord.

Les vitesses des courants auxquelles on a abouti par le model HD reste faible a proximité de rivage et sont de l'ordre de 0,24 et 0,32 m/s au niveau des plages et de 0,48 à 0,64 m/s au niveau des caps, et atteignent une valeur maximale entre 10 et 20 m de profondeur où les vitesses des courants enregistrées à ces endroit est varié de 0,8 m/s et 0,96 m/s.

Au-delà de 20 m de profondeur, les vitesses des courants ralentissent et ne dépassent pas 0,16 m/s.

En revanche, la carte sédimentaire élaborée par le LEM en 2016 indique que la fraction fine est peu abondante et ne dépasse pas 5 %, cela permet de déduire que malgré la faible vitesse des courants, l'hydrodynamisme reste suffisamment important pour emporter les particules les plus fines vers le large (voire partie I. Chapitre 2).

Les résultats de la simulation hydrodynamique acquis par cette étude confirment que le gradient hydrodynamique est décroissant de la côte vers le large. Ces résultats sont en concordance à celles abouties par le *LEM (2016)* concernant la carte de la distribution des médianes granulométriques ( $125\mu\text{m} < D_{n50} \% < 250\mu\text{m}$ ). En effet, le *LEM (2016)* a montré qu'il y a un grano-classement des sédiments non cohésifs décroissant de la côte vers le large. La simulation numérique effectuée pour la plage Hamdania témoigne l'absence d'un courant de retour pour les quatre directions de houles modélisées. Donc l'érosion marquée est purement d'ordre anthropique.

Le taux de transport moyen est identique pour les différentes conditions de houles modélisées, il est de l'ordre de  $315 \text{ m}^3/\text{an}/\text{m}$  et. Ces résultats de transport sédimentaires au niveau de la plage Hamdania reste faible si on les compare aux résultats de *Khalfani [2014]* pour la région de cap Djenet en Algérie au le transit est de  $1066 \text{ m}^3/\text{an}/\text{m}$ .

Ces résultats mettent en évidence une dynamique sédimentaire faible dans le secteur d'étude et qui évolue dans les quatre sens, du l'Est vers le Ouest pour un régime de houle en provenance du Nord-Est, du l'Ouest vers l'Est pour un régime de houle en provenance de de Nord-Ouest et de l'Ouest, de Nord vers le Sud et de Sud vers le Nord pour la houle de direction Nord. A partir de ces résultats, on déduit que la direction de transit dominant est de l'Ouest vers l'Est parallèlement à la côte.

## Conclusion

La modélisation des champs de courants (dus aux houles et aux vents) et des transports sédimentaires par les codes de calcul du Mike 21 nous ont permis d'élucider la dynamique sédimentaire dans la région de Hamdania sous l'effet des houles et des courants.

L'étude de propagation des houles du large vers la côte nous a permis de mettre en évidence une déviation des angles d'incidence vers l'Est pour les houles de direction Nord-Ouest, Nord, et Ouest. Cette déviation de la direction de la propagation des houles en arrivant à la côte est responsable de la génération des courants littoraux qui charrient des sédiments dans les quatre directions, du l'Est vers le Ouest pour un régime de houle en provenance du Nord-Est, du l'Ouest vers l'Est pour un régime de houle en provenance de Nord-Ouest et de l'Ouest, de Nord vers le Sud et de Sud vers le Nord pour la houle de direction Nord.

Les directions de courants modélisés par le modèle Mike 21-HD témoigne l'absence d'un courant de retour et ne favorisent pas le déplacement de sédiments de la plage Hamdania vers le large à l'exception de la fraction fine.

En matière de débits sédimentaires prédits pour les conditions de simulation, ils demeurent faibles pour les quatre conditions de houle simulée. La dérive littorale dominante se dirige dans le sens d'une aiguille d'une montre parallèlement à la côte.

Ces résultats numériques obtenus restent à être confirmés avec une expérimentation en mer durant laquelle des mesures de courants et des taux de charriage doivent être effectuées dans la région de Hamdania afin de vérifier les résultats prédits par le modèle numérique.

L'utilisation des systèmes d'informations géographiques dans l'étude de fonctionnement hydro-sédimentaire révèle un intérêt majeur, telle que les modèles Mike21SW, Mike21HD et Mike21 ST, nous a permis d'avoir une idée plus réaliste sur les conditions hydrodynamiques qui règnent dans le milieu et donc sur la morphologie côtière.

Concernant le deuxième alea qui survient et qui risque de survenir dans la région de Cherchell, c'est le phénomène de submersion marine.

En effet avec les changements eustatiques de niveau de la mer la submersion marine dans la région de Cherchell peut causer d'énormes dommages sur la côte.

## **Partie III : Submersion et intrusion marine**

### **Chapitre 1 : Inondations marines dues aux niveaux marins extrêmes**

## Introduction

Les régions côtières sont les zones les plus menacées par les risques naturels [Kron, 2013]. Ces zones contiennent un grand nombre de récepteurs (naturels, physiques et socio-économiques), ce qui les rend particulièrement vulnérables aux risques côtiers tels que les inondations marines [Ballesteros et al., 2018]. En outre, en absence d'une adaptation supplémentaire, le risque d'inondation marine devrait augmenter à l'avenir en raison de deux facteurs principaux. D'abord, le changement climatique et l'élévation du niveau de la mer devraient accroître la fréquence et la gravité des inondations [Simard et al., 2015], et ensuite, le nombre de récepteurs potentiellement exposé (infrastructures, activités socio-économiques, population) augmente dans les plaines d'inondation et/ou à proximité de la mer [Hallegatte et al., 2013]. La communauté internationale, passe de la protection contre les inondations à la gestion des risques d'inondation [Ballesteros et al., 2018].

Dans les régions côtières méditerranéennes, les inondations peuvent être présentes suite à des forçages d'origines multiples agissant à des échelles de temps différentes : les inondations permanentes, à long terme sont les conséquences de changement climatique et de l'élévation de niveau de la mer [Nicholls et al., 1999]; les inondations épisodiques, à court terme sont les résultats des ondes de tempêtes marine [Benavente et al., 2006]. De nombreuses études ont été effectués afin d'évaluer le risque d'inondation marine à travers le monde, dont on cite, Espagne [Ballesteros et al., 2018], Canada [Simard et al., 2015], la côte européenne [Vousdoukas et al., 2018], États-Unis [Finkl, 2000], Inde [Saxena et al., 2013], Maroc [Niazi, 2007]. Selon Nicholls et Mimura [1998], le sud de la Méditerranée est l'une des régions les plus exposées aux inondations dues aux houles de tempête, et particulièrement vulnérables à l'élévation du niveau de la mer où les meilleures options d'adaptation restent flous.

La côte algérienne d'une longueur de 1622 Km, au Sud de la Méditerranée occidentale, constitue un pôle pour le développement touristique et économique de pays, afin de surmonter la crise économique due au déclin des hydrocarbures. La mauvaise gestion ou parfois la non-gestion de ses espaces côtiers les rend vulnérables aux risques côtiers tels que les inondations marines qui peuvent intensifier avec l'élévation de niveau de la mer Méditerranée [GIEC, 2014]. Les études menées sur les risques d'inondations marines en Algérie sont rares en raison de manque de données de base, la seule étude se résume à celle menée par [Djouder, 2018] sur la côte de Bejaia sans évaluation de risque aux infrastructures, et des témoignages des pêcheurs qu'une houle de tempête de 3 m a inondé le port de Cherchell le mois de mars 2012.

Aujourd'hui la côte Est de Cherchell est soumise à plusieurs défis qui se résument à l'érosion de la plage Hamdania et l'intrusion marine de l'unique aquifère de Cherchell.

Cette région offre une assiette pour la construction de futur méga port Centre. Ce qui nous a conduits à effectuer cette étude sur l'évaluation des zones à risque potentiel d'inondations sur la côte Est de Cherchell. Grâce à un modèle numérique de terrain de haute résolution, aux systèmes d'informations géographiques (SIG) et des données de houles de tempêtes extrêmes de période de retour annuelle, décennale, cinquantennal et centennale. Les zones soumises aux risques d'inondations marines ont été cartographiées. Les cartes de risque d'inondations marines obtenues pour le littoral Est de Cherchell, servent à identifier les parties de la région les plus vulnérables.

### **1. Impacts des inondations marines sur les zones côtières**

Lors des tempêtes marines, la forte énergie des vagues provoque l'érosion des plages et parfois d'une façon irréversible, ce qui engendre l'accentuation de leurs pentes, et par la suite le changement de leurs profils pour un nouvel équilibre rayonne pour les nouvelles conditions hydrodynamiques et morphodynamiques [Achab et al., 2014]. Les houles de tempêtes capables de submerger les côtes basses sur plusieurs centaines de mètres, et provoquent la dégradation des plages, les estuaires et les lagunes par le changement de leur profils bathymétriques [Araújo et al., 2008; Saxena et al., 2013].

### **2. Données et méthodes**

#### **2.1. Méthodologie**

L'élévation du niveau de la mer ferait monter le niveau d'attaque des vagues, car un niveau marin plus haut fournirait une plus haute base pour les mouvements puissants des tempêtes [Group, 1998]. Les répercussions potentielles d'un tel phénomène dépendent non seulement du taux de cette hausse, de la fréquence et de l'intensité des houles de tempêtes, mais aussi de la sensibilité de la côte à la submersion, qui à son tour dépend de la morphologie et de la topographie de la zone côtière. Ces inondations se traduiraient par les submersions des terres basses et des changements des morphologies côtières [Vousdoukas et al., 2018].

Pour ce genre d'étude, on a opté pour la cartographie d'un modèle numérique de terrain de haute résolution. Cette méthode est utilisée par de nombreux auteurs pour la bonne fiabilité des résultats [Colmer, 2013; Cullis et al., 2006; Gornitz et al., 2001; Murdukhayeva et al., 2013; Nicholls et al., 1999; Snoussi et al., 2007].

Les levés topographiques ont été effectués à l'aide d'un récepteur mobile GPS cinématique en temps réel (RTK) permettant de mesurer un point à quelques centimètres près. Le récepteur mobile GPS en mode RTK reçoit des données des satellites et d'une station de référence simultanément et fournit instantanément la position tridimensionnelle du point à une erreur 1 cm environ, mais une erreur d'environ 15 cm (RMSE) typique du balayage laser aérien ou LIDAR. Ces levés sont de très haute précision, où l'erreur globale générée est de quelques centimètres (< 20 cm). La haute précision de ces levés conduit plusieurs chercheurs dans le monde à utiliser cette méthode pour la simulation des inondations côtières due aux niveaux marins extrêmes [Gallien *et al.*, 2011; Murdukhayeva *et al.*, 2013].

Le modèle présenté pour la simulation des niveaux marins extrêmes est développé par le Centre commun de recherche de la Commission européenne [Vousdoukas *et al.*, 2018]. Ses niveaux marins extrêmes (ESL) sont déterminés par l'effet combiné de l'élévation moyenne de niveau de la mer (MSL), le niveau de la marée haute ( $\eta_{\text{tide}}$ ) et les fluctuations du niveau d'eau dues aux extrêmes climatiques, c'est-à-dire les niveaux d'eau déterminés par les vagues et les ondes de tempête ( $\eta_{\text{CE}}$ ) [Vousdoukas *et al.*, 2018].

$$\text{ESL} = \text{MSL} + \eta_{\text{tide}} + \eta_{\text{CE}} \quad (3)$$

## 2.2. Scénarios utilisés

Les données des indices de la formule (3) utilisée pour cartographier le risque d'inondation due aux niveaux marins extrêmes qui peuvent affecter la côte Est de Cherchell sont décrites ci-dessous :

- **Élévation moyenne de niveau de la mer (MSL) :** L'élévation de niveau de la mer accentue le risque d'inondation des zones côtières basses. Par conséquent, lors de l'étude des inondations due aux niveaux marins extrêmes, le taux d'élévation de niveau de la mer est un paramètre important à prendre en considération. Plus ce taux est élevé, plus la côte est vulnérable. Dans cette étude, on a opté pour les mesures effectuées par les satellites d'altimétrie spatiale Topex/Poséidon et Jason 1, pour la période allant de 1993 et 2006, en Méditerranée occidentale. Ces mesures sont très utiles puisqu'il n'existe aucune mesure historique des marégraphes dans la côte de Cherchell. La côte de Cherchell a révélé un taux d'élévation de niveau de la mer de 2,5 mm/an.

- **Le niveau de la marée haute (ηtide) :** La marée sur la côte algérienne est semblable à toutes les côtes méditerranéennes très basses. L'amplitude des marées le long des côtes algériennes est de +- 34 cm, mais son niveau maximal peut atteindre 1 m.

Le niveau zéro opté par cette étude est le zéro géodésique.

- **Fluctuations du niveau d'eau dues aux extrêmes climatiques (niveaux d'eau déterminés par les vagues et les ondes de tempête) (ηCE) :** les niveaux d'eau déterminés par les vagues et les ondes de tempêtes extrêmes responsables des inondations qui peuvent affecter la côte Est de Cherchell ont été récoltés au niveau de la plage Hamdania par météo France [in LEM, 2016] voir le tableau (Tableau 2).

**Tableau 2 :** Données de houles de tempêtes à la côte pour la région de Hamdania [d'après météo France in LEM, 2016]

Période de retour	1 an	10 ans	50 ans	100 ans
Houle (m)	4,37	5,52	6,22	6,51

Un modèle numérique de terrain de haute résolution déterminant l'occupation de sol de la côte Est de Cherchell (Fig. 68, 69, 70) a été utilisé. Les zones inondées ont été obtenues par la superposition des niveaux marins extrêmes pour chaque période de retour et le modèle numérique de terrain de la côte Est de Cherchell. La délimitation de la zone de danger se fait uniquement en tenant compte de la surface du sol avec une altitude inférieure aux égales au niveau d'inondation estimée (approche statique) [Vousdoukas et al., 2018].

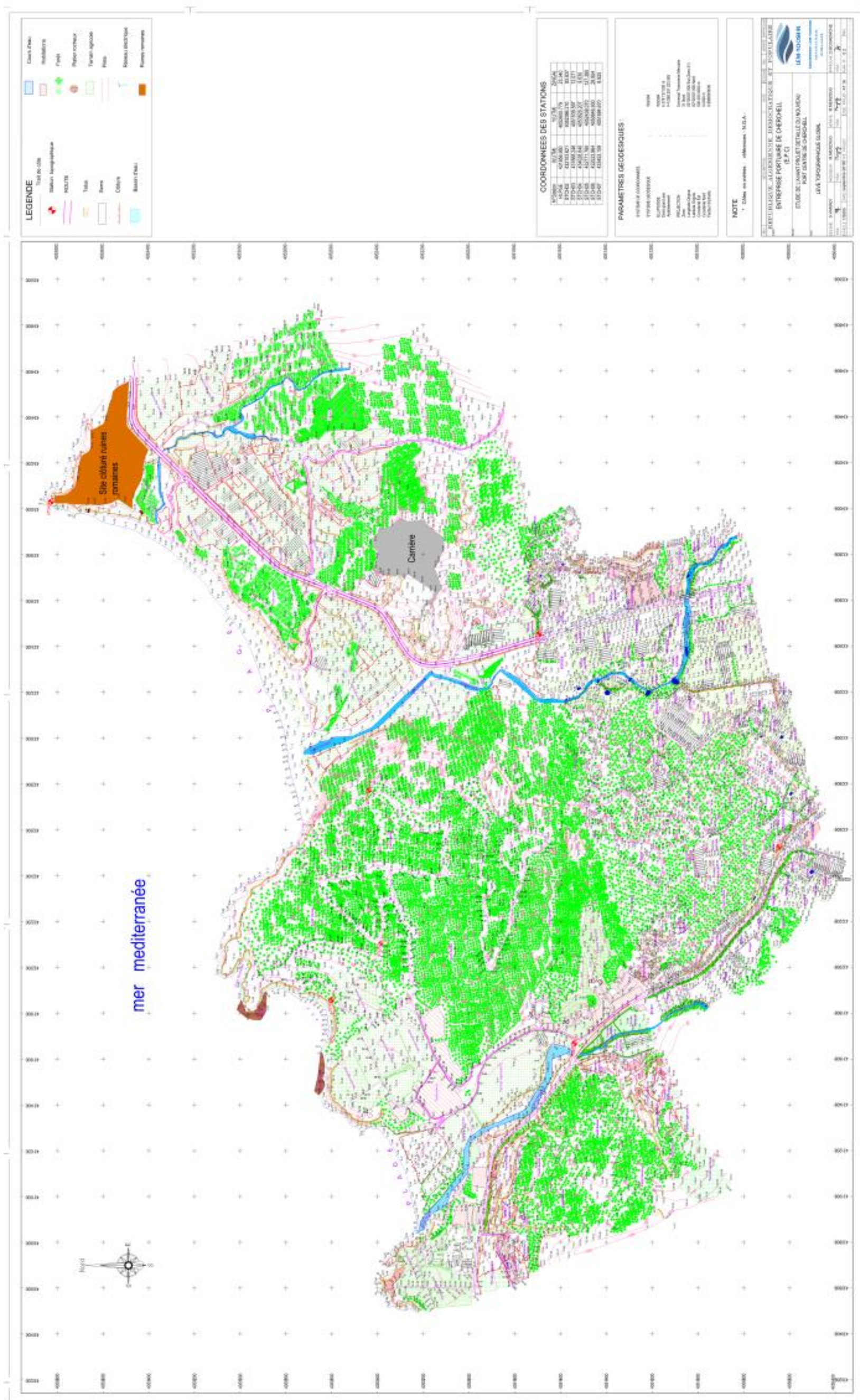


Figure 68 : Levé topographique de haute résolution réalisé à l'aide de GPS en mode RTK déterminant l'occupation de sol et la topographie de la région Est de Chercheil [LEM, 2016].

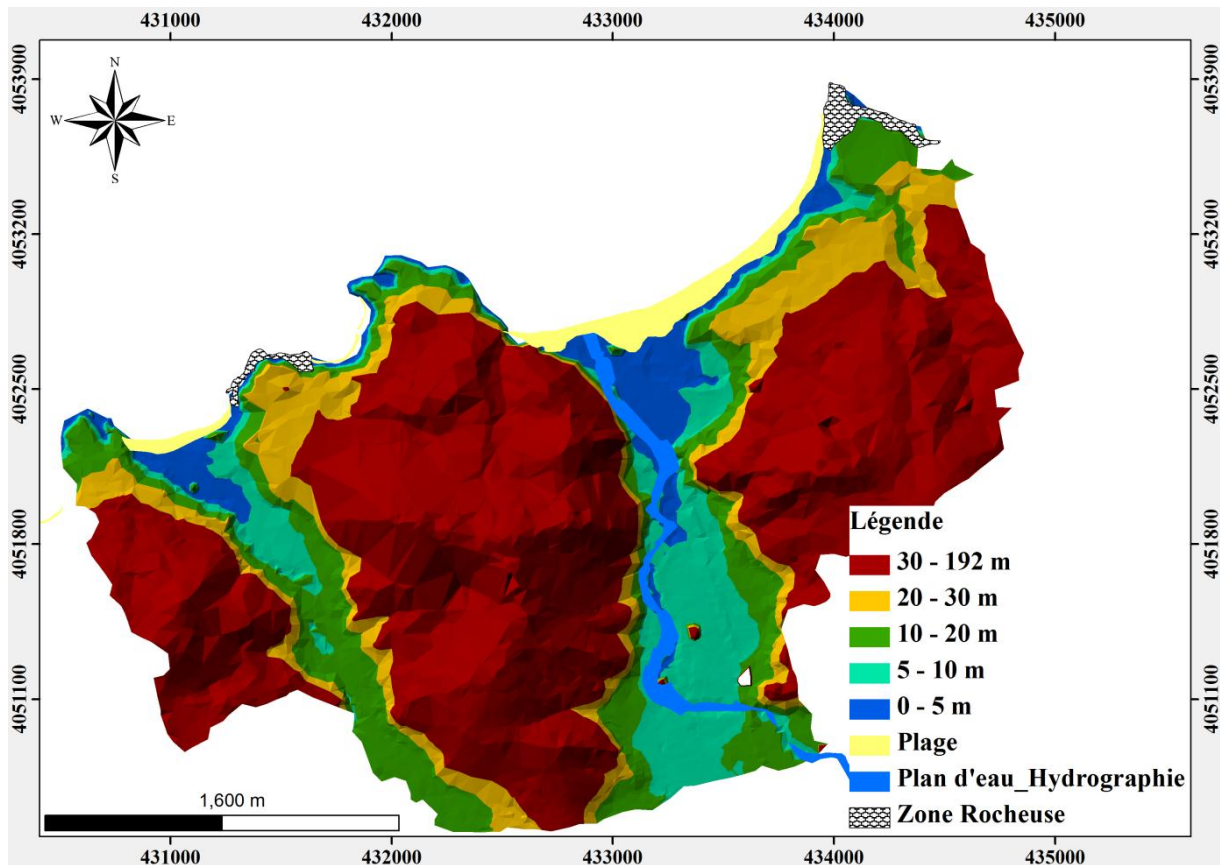


Figure 69 : Topographie 3D de la région Est de Cherchell.

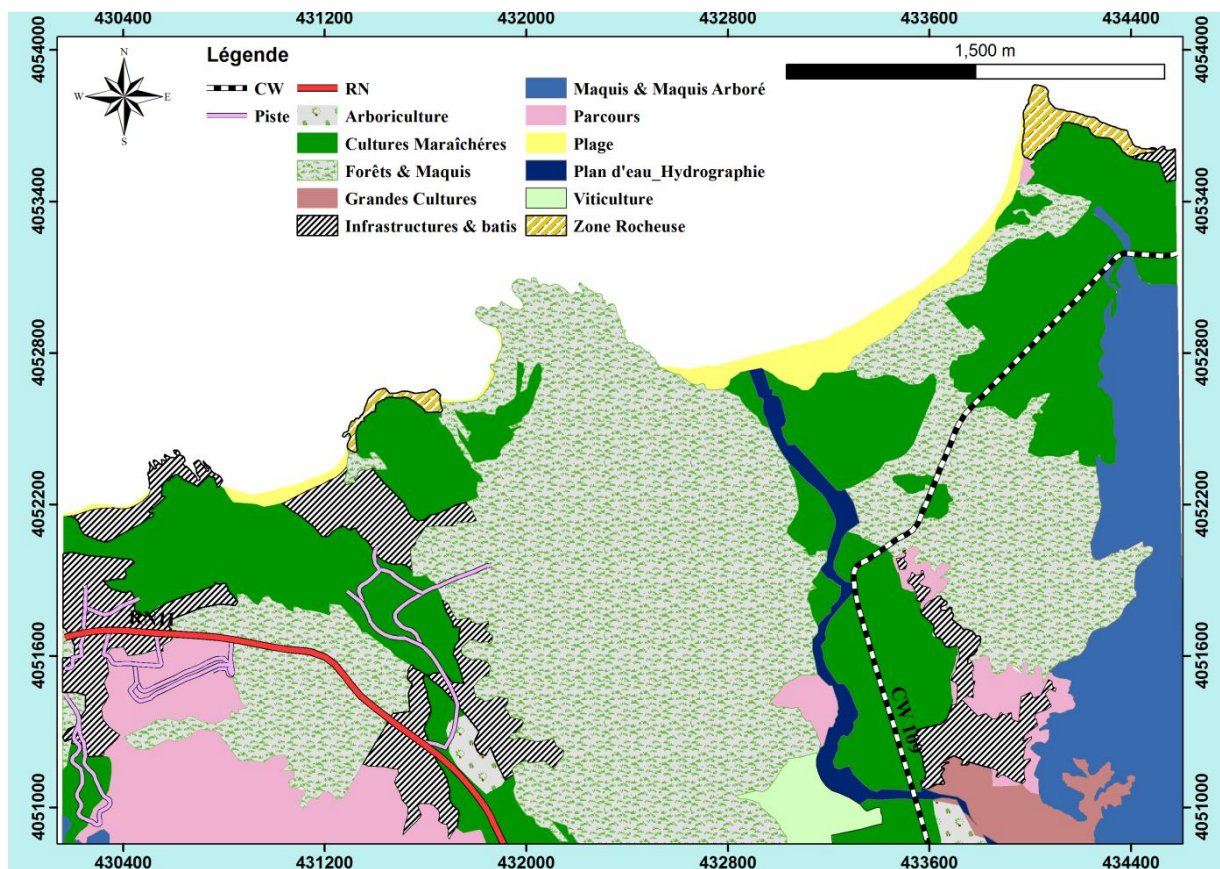


Figure 70 : Occupation des sols de la région Est de Cherchell.

### 2.3. Détermination et représentation du risque d'inondation aux infrastructures

Pour mieux représenter le risque d'inondation aux infrastructures (routes et bâtiments) sur les cartes des différents niveaux d'inondations marines pour la côte Est de Cherchell, nous avons utilisé l'indice de risque développé et amélioré par *Simard et al* [2015]. Cet indice est basé sur la profondeur de l'eau pendant une inondation par rapport aux infrastructures (Tableau 3). L'indice pour les bâtiments est basé sur des valeurs différentes que pour les routes puisque les conséquences de l'inondation ne sont pas les mêmes pour chacune ; ainsi, l'indice de risque aux bâtiments est plutôt relatif aux dommages et celui aux routes est plutôt à l'accès. L'avantage de cet indice est de montrer des degrés de risque par rapport à la profondeur d'eau ainsi leurs points de distribution. Un code de couleurs attribué à chaque indice afin de faciliter la lecture sur la carte.

**Tableau 3 :** Indices de risque d'inondation aux infrastructures (routes et bâtiments) [*Simard et al., 2015*]

Route		Indice	Bâtiments	
Profondeur d'eau	Accès		Risque de dommage	Profondeur d'eau
>1 m	Impossible	5	Maximal	>1,5 m
0,6 to 1 m	Dangereux	4	Très élevé	1 to 1,5 m
0,3 to 0,6 m	Difficile	3	Elevé	0,5 to 1 m
0,1 to 0,3	Limité	2	Moyen	0,1 to 0,5 m
-0,1 to 0,1 m	Passable	1	Faible	-0,1 to 0,1 m
< -0,1 m	Normal	0	Nul	< -0,1 m

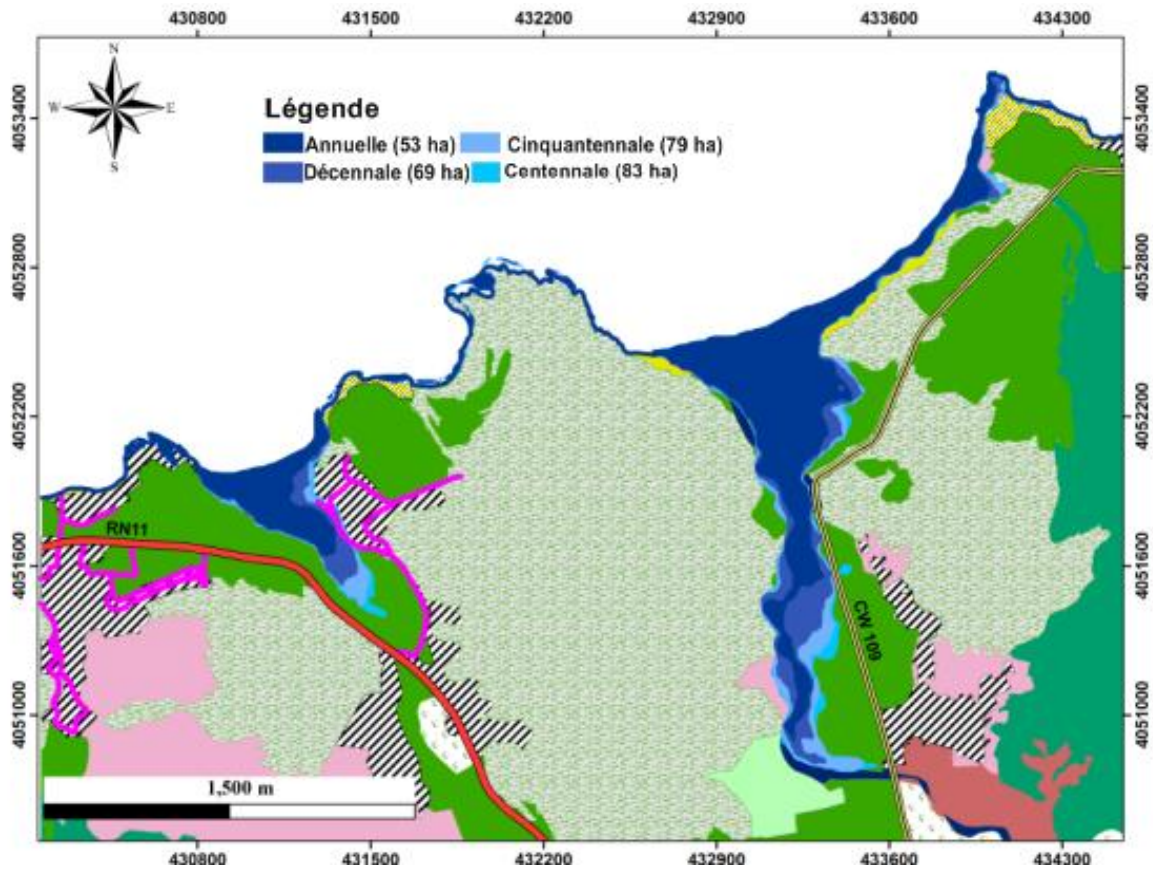
## 3. Résultats

### 3.1. Niveaux d'inondation

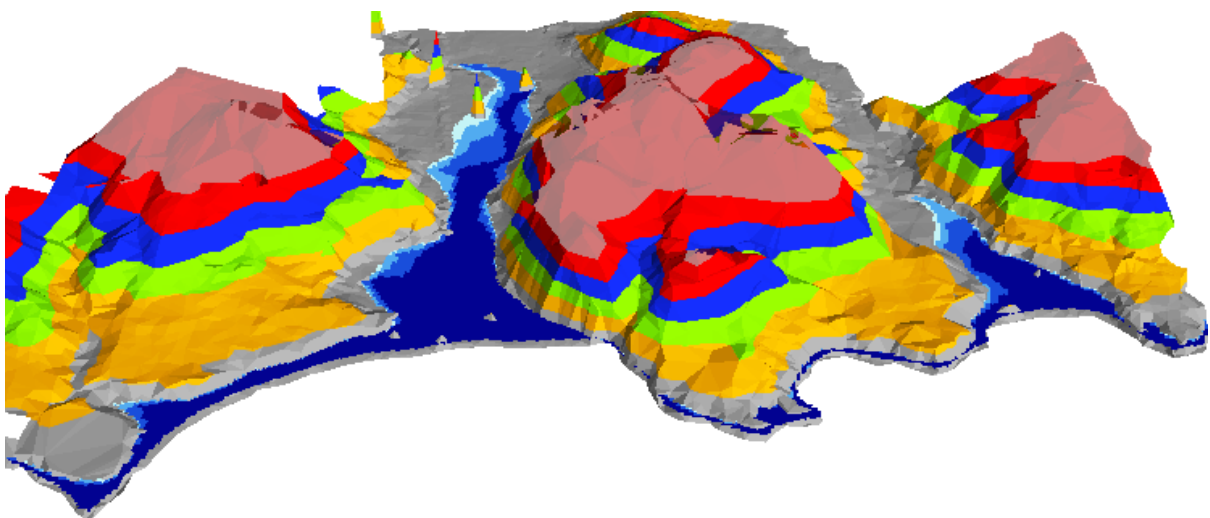
Les niveaux d'inondation ont été évalués pour les différents scénarios de niveaux marins extrêmes étudiés. Les résultats obtenus montrent que les niveaux d'inondation sont de 5,37 m, 6,52 m, 7,22 m et 7,51 m pour des périodes de retours de 1 an, 10 ans, 50 ans et 100 ans respectivement (Fig.71, 72).

L'étendue maximum des zones à risque montre qu'au niveau de la région Est de Cherchell, la submersion marine se ferait au niveau des vallées des oueds El Hachem et El Bellaa, avec une extension plus importante de zones submergées à l'Est. L'essentiel des surfaces des terres qui seraient potentiellement submergées en cas d'événements extrêmes extrême se ferait avec un niveau d'inondation minimum. Environ 64% (soit 53 ha) de terrains inondés dues aux niveaux marin extrême annuelles, 19% (16 ha) de terrains inondés dus aux niveaux marin extrême décennales, 12% (10 ha) de terrains inondés dû aux niveaux marin extrême cinquantennale,

5% (soit 4 ha) de terrains inondés dus aux niveaux marin extrême centennales. Les superficies inondées pour les déférentes périodes de retour sont beaucoup plus importantes à l'Est qu'à l'Ouest. Cela est dû à la topographie particulièrement basse de la vallée d'oued El Hachem proche de rivage.



**Figure 71 :** Localisation des terres inondées et leurs superficies associées pour les déférentes périodes de retours des niveaux marins extrêmes pour la côte Est de Cherchell.



**Figure 72 :** Représentation 3D des terres inondables dans la région Est de Cherchell.

### **3.2. Analyse de risques liés aux infrastructures**

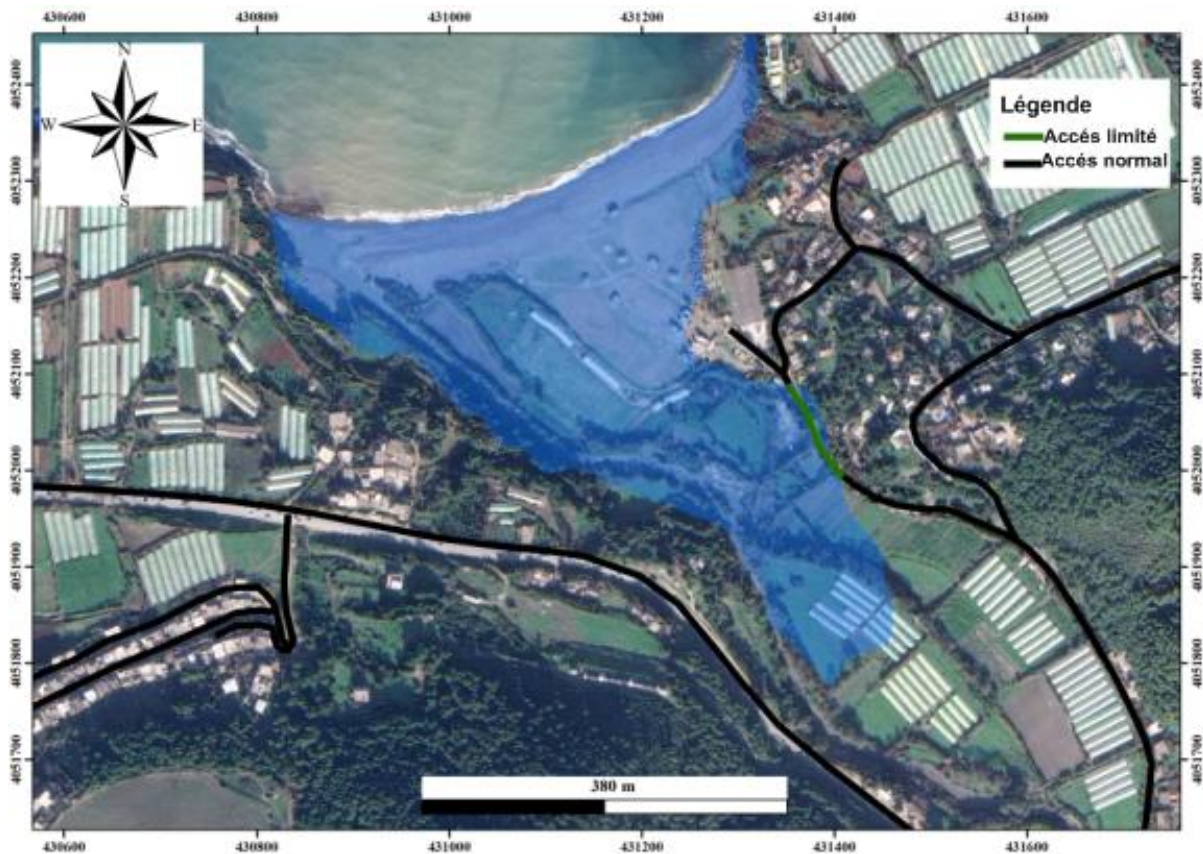
L'analyse de risques aux infrastructures a été réalisée pour les bâtiments et les routes se situant dans la côte Est de Cherchell. Les résultats montrent que la zone d'étude peut généralement être considérée comme présentant un faible niveau de risque d'inondation marine. Il y a des exceptions dans quelques secteurs, où l'intensité du risque est élevée en raison de la combinaison d'importantes valeurs de débordement (période de retour centennale) et de faibles niveaux topographiques. Par conséquent, ces secteurs représentent les zones les plus susceptibles d'être touchées par une surcote induite par des niveaux marins extrêmes. Toutefois, comme l'objectif de cette étude est d'entreprendre une analyse comparative entre les inondations, les résultats au niveau sectoriel ont été intégrés.

L'intensité du risque d'inondation marine est présentée uniquement pour le segment Ouest (El Bellaa) sur environ un km de côtes car les infrastructures de segment Est (Hamдания) ne sont pas touchées par les quatre périodes de retours de niveaux marin extrême.

Les figures (Fig. 73, 74, 75) présentent également les niveaux d'exposition des infrastructures au risque d'inondations pour les différentes périodes de retour. Les résultats indiquent que, les valeurs totales de l'indice d'exposition aux risques semblent être assez homogènes pour les différentes périodes de retour, ces valeurs de risque indiquent un faible risque d'inondation marine de point de vue des infrastructures.

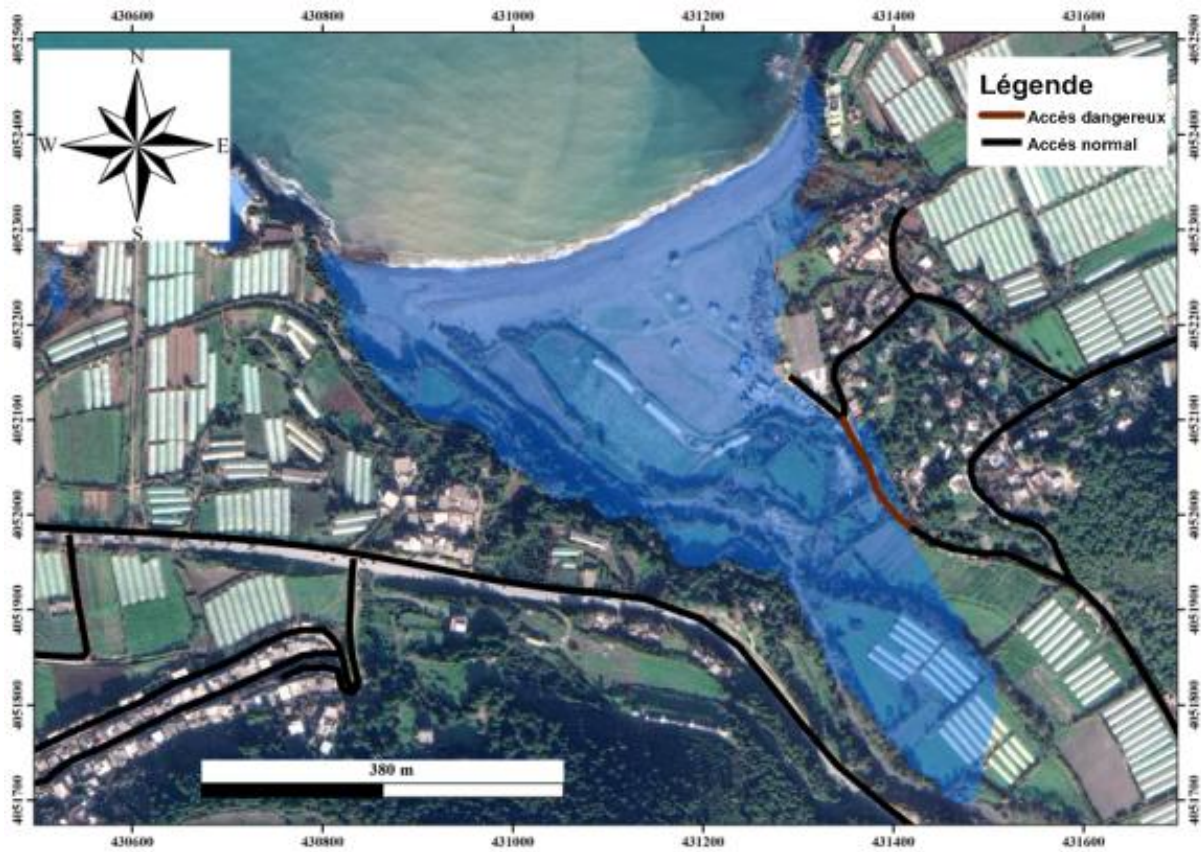
Cependant, une infime partie de Chemin communal semble de plus en plus affectée avec des niveaux marins extrêmes de périodes de retours importants.

Environ 100 m de chemin communal seront affectés par un niveau d'inondation décennale présente un accès limité aux véhicules et submergé par un niveau d'inondation de 0,2 m environ.



**Figure 73 :** Risque d'inondation décennale aux infrastructures dans la région de Bellaïa.

Pour une période de retour cinquantennal, environ 130 m de chemin communal seront affectés par un niveau d'inondation de 0,9 m et l'accès aux véhicules devient dangereux.



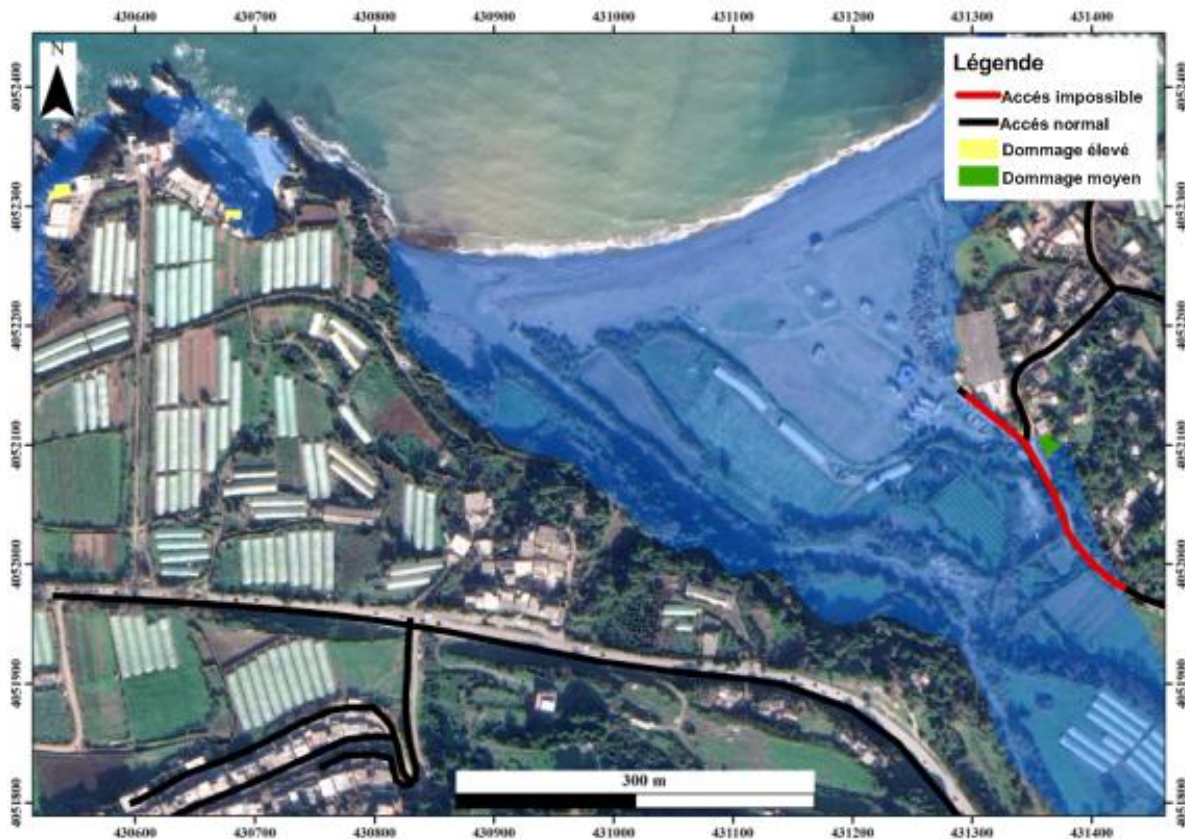
**Figure 74 :** Risque d'inondation cinquantennale aux infrastructures dans la région de Bellaïa.

Pour une période de retour centennal, 210 m de chemin communal seront affectés par un niveau d'inondation de 1,2 m où l'accès aux véhicules devient impossible.

Les autres infrastructures routières ne seront pas touchées par les différents niveaux d'inondations.

Les habitations, ne seront pas affectées que pour un niveau d'inondation maximale (période de retour de 100 ans) et uniquement 3 maisons seront touchées, le premier est proche de chemin communal, sera submergé de 0,15 m et subirait des dommages modérés. Les deux autres maisons se situent à l'extrémité Ouest, seront submergés de 0,6 m et seront affectés par des dommages élevés. Alors que les autres infrastructures de bâtiments ne seront pas touchées par les différents niveaux d'inondations.

En ce qui concerne les inondations de périodes de retours annuels n'auront causés aucun dommage pour les différentes infrastructures.



**Figure 75 :** Risque d'inondation centennale aux infrastructures dans la région de Bella.

#### 4. Discussion

De nos jours, les risques côtiers tels que les inondations marines ont un impact majeur sur l'aménagement du territoire. Cela touche les habitations, le réseau routier, les plages, les aquifères côtiers, les terres agricoles et les écosystèmes. Ces espaces vitaux risquent d'être affectés encore plus par la conjugaison d'événements extrêmes tels que les niveaux marin extrême, causeront d'énormes dégâts dans les zones à risques et dans de nombreux cas les dégâts se font d'une façon irréversible.

Malgré les niveaux d'inondations cartographiés lors de la présente étude pour le littoral Est de Cherchell, les infrastructures à risque d'endommagement par ces inondations restent minimales, ainsi la majorité des terrains inondés se fait avec des niveaux marins extrêmes de période de retour annuel (minimal). Cela est probablement dû à la topographie montagneuse de la région qui est largement supérieure par rapport aux niveaux d'inondation cartographiés. Les terres inondées marquées sur la partie Est environ trois fois plus importantes par rapport à

l'Ouest, cela en réponse avec la largeur importante de la vallée d'oued El Hachem (60 m) et sa topographie particulièrement basse près de rivage, ce qui s'explique par la pénétration des inondations plus loin à l'arrière-pays. Par contre la vallée d'oued El Bellaa rétrécie, sa largeur ne dépasse pas 40 m et sa topographie est particulièrement élevée près de rivage, ce qui s'explique la faible pénétration des inondations à l'arrière-pays.

La côte Est de Cherchell est caractérisée par des terres fertiles, et un climat méditerranéen subhumide, la rendant très sollicitée par les activités agricoles qui constituent la première vocation économique de la région. La pénétration des eaux salées dans les sols lors des inondations marine provoquera le phénomène de la salinisation des sols [Alfieri et al., 2014], ce qui affectera profondément l'économie de la région, en raison de sa grande vocation agricole.

La région Est de Cherchell dispose d'un aquifère côtier qui est le seul aquifère de toute la commune de Cherchell. Cette ressource inestimable participe beaucoup au développement économique de la région, satisfait les besoins d'irrigation et d'alimentation en eau potable, surtout pendant la saison estivale due à l'accentuation touristique de la région. Cette aquifère, aujourd'hui menacée par le risque d'intrusion marine [Amarni et al., 2020], et sera de plus en plus affecté par les inondations marines qui risque de contaminer les eaux des aquifères côtiers par l'intrusion marine [Alfieri et al., 2014].

Dans le futur, l'élévation accélérée du niveau de la mer exacerbera le risque d'inondation marine causée par les houles de tempêtes extrêmes [Cazenave et Nerem, 2004; Church et al., 2006; Overpeck et Weiss, 2009; Pfeffer et al., 2008; Rahmstorf, 2007], et le risque d'inondation marine pour la côte Est de Cherchell sera plus important et aura des impacts plus graves.

Les impacts humains des inondations marines sur la côte Est de Cherchell se résument par l'affectation des secteurs d'agriculture et du tourisme, ainsi que la raréfaction d'eau douce qui sera la contrainte majeure pour les populations qui utilisent encore l'eau de l'aquifère.

### **Conclusion**

La cartographie de risque d'inondations marines due aux houles de tempêtes extrêmes pour des périodes de retour annuelles, décennales, cinquantiennes et centennales est prévue pour la première fois pour la côte Est de Cherchell. La création de cartes de risques liés aux infrastructures, permettrait de sensibiliser davantage la population côtière aux risques d'inondation marine et les encourager à se préparer à l'éventualité d'un tel risque, ainsi de

définir des limites de planification, et des plans de gestion intégrée des zones côtières (GIZC), et constitue une méthode très efficace pour minimiser les dommages matériels.

L'adoption des modèles numériques de terrain, des systèmes d'informations géographiques, et les données des niveaux marins extrêmes pour le littoral Est de Cherchell, permet de quantifier les zones à risques d'inondations marines.

Le phénomène de submersion marine ou d'inondation marine peut engendrer un phénomène qui s'accroît de plus en plus, il s'agit de l'intrusion marine. En effet ces submersions répétées vont permettre au biseau salin de pénétrer à l'intérieur des terres.

## **Chapitre 2 : Intrusion marine dans l'aquifère côtier de Cherchell**

## Introduction

Les zones côtières sont des éléments socio-économiques d'une véritable importance pour le présent et l'avenir. Les interférences humaines affectent ces milieux fragiles et menacent leurs durabilités telles que les aquifères d'eau douce. Les aquifères côtiers sont des sources majeures d'approvisionnement en eau douce, en particulier dans les zones à faible pluviométrie. Les réserves d'eau souterraine sont généralement très stables car le temps d'écoulement des eaux souterraines est très lent [Niazi, 2007]. En effet cette ressource précieuse est menacée par la surexploitation et la diminution des niveaux piézométriques, d'où la possibilité d'être contaminé par l'intrusion des eaux salées marines [Niazi, 2007]. Les impacts du changement climatique, (faibles précipitations et l'élévation attendue du niveau de la mer), pourraient accroître la salinité des aquifères côtiers [Medejerab et Henia, 2011; Szczypta, 2012]. Ce risque a fait l'objet de plusieurs études à travers le monde ; Inde [Chachadi et al., 2003], Portugal [Lobo-Ferreira et al., 2003], USA [Moghaddam et al., 2019; Tasnim et Tahsin, 2016], Maroc [Batchi et al., 2014; Batchi et al., 2017; Niazi, 2007], Tunisie [Saidi et al., 2011].

L'Algérie, n'est pas à l'abri de ce risque et plusieurs études en été effectués ces dernières années pour l'évaluation de la vulnérabilité des aquifères côtiers à l'intrusion marine, dont en cite, Guerbes-Annaba [Guezgouz et al., 2013], El Nador-Tipaza [Bouderbala et al., 2016], Mitidja [Djoudar et al., 2017], Bouteldja-El Taref [Hallal et al., 2019], Souk el Thenine-Bejaya [Boudjelil et Djafari, 2018], Collo-Skikda [Djabri et al., 2019; Mahrez et al., 2018].

La plaine alluviale de Cherchell, dans la région nord-centre de l'Algérie, est l'une des zones côtières caractérisées par des vocations agricoles et touristiques. Le choix de cette zone répond aux perturbations hydrologiques que connaît la région après la construction de barrages Boukerdene en 1992 dans le sous-bassin versant de la région, à environ 11 km de la côte, et à 3 km de l'aquifère. Ce barrage piège les eaux tombées dans ce sous bassin versant, empêchant l'écoulement de l'eau et l'alimentation de l'aquifère, ainsi ses lâcher riches en fraction fine colmatent les sols en empêchant l'infiltration d'eau dans le sol et donc la recharge de l'aquifère. Ce qui a provoqué la baisse des niveaux piézométriques [Tadrist et al., 2016] et l'intrusion d'eau de mer tendent à le confirmer.

La méthodologie adoptée dans ce travail, est fondée sur celle établie du modèle GALDIT, destinée aux aquifères côtiers [Chachadi et Lobo-Ferreira, 2001a] et modifiée par les mêmes auteurs en 2005. Cette méthode permet d'évaluer la sensibilité et la qualité des eaux souterraines côtières, par la détermination des caractéristiques intrinsèques de l'aquifère [Lobo-Ferreira et al., 2003]. Ce modèle est basé sur six paramètres : présence d'eau

souterraines (G), conductivité hydraulique de l'aquifère (A), profondeur de l'aquifère au-dessus de niveau de la mer (L), distance perpendiculaire au ravin (D), impact d'existence d'une intrusion marine dans le passé (I), épaisseur de l'aquifère (T). Par la suite on intègre ces paramètres dans un système d'informations géographiques (SIG), qui est un très bon outil d'aide à la décision. La carte de vulnérabilité à l'intrusion marine obtenue pour l'aquifère de Cherchell, sert à identifier les parties de l'aquifère les plus vulnérables à l'intrusion marine.

### 1. Aperçu sur la vulnérabilité à l'intrusion marine des aquifères côtiers

Dans le domaine des ressources en eau le terme de vulnérabilité est utilisé dans le contexte d'évaluation de la performance des systèmes tel que défini par *Hashimoto et al* [1982]. Ces auteurs définissent trois concepts du rendement du système : *la probabilité de défaillance du système par rapport à sa fiabilité ; la rapidité de retour du système à l'état satisfaisant après que sa défaillance survenue est exprimée par sa résilience, et la gravité des conséquences d'une défaillance mesurée par sa vulnérabilité.* Ce concept de vulnérabilité est peut-être utilisé dans le contexte de l'intrusion marine dans les eaux souterraines « défaillance du système » par la surexploitation des eaux souterraines « la gravité des conséquences » affectant la qualité de l'eau en tant que ressource.

Dans notre contexte la vulnérabilité des aquifères côtiers à l'intrusion marine correspond à celle qui intègre les caractéristiques intrinsèques de l'aquifère, et échappent pour la plupart à des facteurs humains. Il est donc proposé de redéfinir la vulnérabilité des eaux souterraines à l'intrusion de l'eau de mer, conformément aux conclusions et recommandations de la conférence internationale sur la vulnérabilité des eaux souterraines à l'intrusion marine, tenue en 1987 aux Pays-Bas [*Andersen et Gosk, 1987; Duijvenbooden et Waegeningh, 1987*]: *comme suit la sensibilité de la qualité des eaux souterraines à un pompage imposé des eaux souterraines ou à une élévation du niveau de la mer, ou aux deux, dans la ceinture côtière, qui est déterminée par les caractéristiques intrinsèques de l'aquifère.*

## 2. Données et méthodes

### 2.1. Méthodologie

La méthode qui répond aux besoins de l'étude se base sur le modèle GALDIT destiné aux aquifères côtiers. Il a été développé pour la première fois lors du projet "EU- India INCO-DEV COASTIN" [*Mahrez et al., 2018*] et dont l'objectif était de déterminer la vulnérabilité des aquifères côtiers à l'intrusion marine par [*Chachadi et Lobo-Ferreira, 2001b*] et amélioré par les mêmes auteurs en 2005. La condition principale à retenir pour appliquer la méthode

GALDIT est que le fond de l'aquifère, se trouve sous le niveau moyen de la mer et l'aquifère soit en contacte directe avec la mer [Chachadi, 2005]. Cette méthode se base sur des caractéristiques hydrogéologiques, hydrologiques et géomorphologiques de l'aquifère étudié [Chachadi et Lobo-Ferreira, 2001a; Chachadi et Lobo Ferreira, 2007; Chachadi et al., 2003]. Cette méthode est une approche de cartographie, simple à utiliser, représente des paramètres mesurables pour lesquels les données sont généralement disponibles [Batchi et al., 2014; Bouderbala et al., 2016; Boudjelil et Djafari, 2018; Djabri et al., 2019; Djoudar et al., 2017; Guezgouz et al., 2013; Kazakis et al., 2018; Mahrez et al., 2018; Najib et al., 2012; Niazi, 2007; Trabelsi et al., 2016].

Les différents paramètres adoptés dans le modèle GALDIT et les données utilisées pour la cartographie destinée à l'aquifère de Cherchell sont les suivants :

### 2.1.1. Paramètre G (type d'aquifère ; Groundwater occurrence)

L'eau souterraine se trouve dans les couches géologiques, soit confinées, non confinées ou confinées en cas de fuite. L'aquifère de Cherchell est libre au sud entre Sidi Ammar (Zouriche) et Bouaroua, et confiné au Nord [Mancet, 1972].

### 2.1.2. Paramètre A (conductivité hydraulique ; Aquifer hydraulic conductivity)

Il représente la perméabilité d'un sol ou d'une roche à l'eau sous l'effet d'un gradient hydraulique [Castany, 1982a ; Castany, 1982b]. Plus la conductivité hydraulique est élevée face à la mer, plus le risque d'intrusion marine est élevé. La conductivité hydraulique d'un aquifère est le rapport entre la transmissivité et l'épaisseur de l'aquifère [Mahrez et al., 2018].

$$K = \frac{T}{b} \quad (4)$$

K : Conductivité hydraulique (m/jr) ;

T : Transmissivité de l'aquifère (m<sup>2</sup>/jr) ;

b : Épaisseur de l'aquifère (m).

La conductivité hydraulique calculée pour l'aquifère de Cherchell varie de 10 et 22 m/jr.

### 2.1.3. Paramètre L (profondeur de l'aquifère au-dessus de niveau de la mer ; Depth to groundwater level above sea)

C'est un facteur très important pour l'évaluation de l'intrusion marine d'un aquifère côtier, car il détermine la pression hydraulique disponible pour repousser le front de mer. Lorsque le niveau piézométrique diminue et atteint leurs niveaux minimums au-dessus de niveau de la mer, la vulnérabilité à l'intrusion marine augmente. Les niveaux piézométriques au-dessus de niveau de la mer augmentent du Nord au Sud, allant de 0,8 m au Nord et 16 m au Sud.

### 2.1.4. Paramètre D (distance de la mer ; Distance from the shore)

L'impact de l'intrusion marine diminue lorsqu'on s'éloigne du rivage vers l'intérieur des terres. L'aquifère côtier de Cherchell est en contacte directe avec la mer et s'étale à l'arrière-pays ayant distance de 8 km perpendiculairement au rivage couvrant une superficie de 1300 ha.

### 2.1.5. Paramètre I (impact de l'existence d'une intrusion marine ; Impact on existing status of sea water intrusion)

Le paramètre I est déterminé par le ratio  $Cl^-/(HCO_3^- + CO_3^{2-})$  [Chachadi, 2005]. Plus ce ratio augmente, plus la vulnérabilité à l'intrusion marine augmente [Revelle, 1941].

- (i) zones pénétrées par l'eau de mer en toute saison où le rapport  $Cl^-/(HCO_3^- + CO_3^{2-})$  dans les eaux souterraines est supérieur à 2,
- (ii) zones où prédomine une intrusion marine saisonnière où le rapport  $Cl^-/(HCO_3^- + CO_3^{2-})$  dans les eaux souterraines est compris entre 1,5 et 2, et
- (iii) zones où aucune intrusion marine n'a été observée dans le passé le rapport  $Cl^-/(HCO_3^- + CO_3^{2-})$  dans les eaux souterraines et l'indice est inférieur à 1,5 [Chachadi, 2005]. Les paramètres de ce ratio se trouvent dans (Tableau 4).

**Tableau 4 :** Paramètres physico-chimiques des eaux souterraines de l'aquifère de Cherchell [Mohamed et Bensmaili, 2016].

Numéro de puit	Cl <sup>-</sup> (mg/l)	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> (mg/l)
P1	195	549	30,76
P2	186	519	7,28
P4	277	549	7,75
5	178	397	22,09
P6	221	534	30,07
P7	127	442	9,79
P9	103	503	17,63
P10	175	564	19,95
P14	360	307	17,39
P16	229	549	9,77

### 2.1.6. Paramètre T (Épaisseur de l'aquifère ; Thickness of the aquifer)

L'épaisseur importante d'un aquifère côtier le rend sensible à l'intrusion marine. L'épaisseur de l'aquifère de Cherchell est de 5 m au Nord et 20 m au sud [*Mancet, 1972*].

## 2.2. Caractéristiques des paramètres

Chaque paramètre est caractérisé par son propre poids, son taux d'importance (l'échelle) et sa pondération [*Chachadi et Lobo-Ferreira, 2007*] (Tableau 5).

### 2.2.1. Poids de l'indicateur

Le poids d'un indicateur représente l'importance relative de l'indicateur dans le processus d'intrusion marine. Les indicateurs les plus significatifs ont des poids de 4 et le moins important de 1 indiquant un paramètre de moindre importance dans le processus d'intrusion marine [*Chachadi et Lobo-Ferreira, 2007*].

### 2.2.2. Taux d'importance

Chacun des indicateurs est subdivisé en variables selon les attributs spécifiés pour déterminer l'importance relative de la variable en question sur le processus d'intrusion d'eau de mer. Les valeurs d'importance varient entre 2,5 et 10. Une valeur d'importance élevée indique une grande vulnérabilité à l'intrusion d'eau de mer [*Chachadi et Lobo-Ferreira, 2007*].

### 2.2.3. La pondération

Chaque indicateur se caractérise par sa propre pondération, cette pondération alphanumérique est déférente d'un indicateur à un autre selon leurs sensibilités au risque d'intrusion marine [*Chachadi and Lobo-Ferreira, 2007*].

**Tableau 5 :** Paramètres de GALDIT selon [*Chachadi and Lobo-Ferreira, 2007*]

Facteur	Poids	Très faible 2.5	Faible 5	Modérée 7,5	Elevée 10
type d'aquifère	1	Contrainte barrière imperméable ou recharge // à la côte	Semi-confiné	libre	confiné
Conductivité hydraulique (m/jr)	3	<5	5-10	10-40	>40
profondeur de l'aquifère au-dessus de niveau de la mer (m)	4	> 2	1,5-2	1-1,5	<1
distance de la mer (m)	4	>1000	750-1000	500-750	<500
impacte de l'existence d'une intrusion marine	1	<1	1-1,5	1,5-2	>2
Epaisseur de l'aquifère (m)	2	<5	5-7,5	7,5-10	>10

### 2.3. Critère de décision

Somme totale des scores des indicateurs individuels obtenus en multipliant les valeurs des taux d'importances par les poids des indicateurs correspondants, puis la division de la somme obtenue sur la somme des poids utilisées qui est de 15. Des valeurs d'importance plus élevées de la variable correspondent à des aquifères plus vulnérables à l'intrusion d'eau de mer [Chachadi et Lobo-Ferreira, 2007].

Cet indice de vulnérabilité IG des aquifères côtiers par rapport à l'intrusion marine selon la formule de Chachadi et Lobo-Ferreira [2007] est comme suit :

$$IG = \frac{1G + 3A + 4L + 4D + 1I + 2T}{15} \quad (5)$$

Une fois l'indice GALDIT est calculé, il est possible d'identifier les zones les plus susceptibles d'être sensible les unes par rapport aux autres aux intrusions d'eau de mer. Les valeurs de l'indice GALDIT sont comprises entre 2,5 et 10. Les valeurs les plus élevées indiquent que le potentiel d'intrusion d'eau de mer est élevé [Chachadi et Lobo-Ferreira, 2007].

IG < 5 : Vulnérabilité faible ;

5 < IG < 7,5 : Vulnérabilité modérée ;

IG > 7,5 : Vulnérabilité élevée.

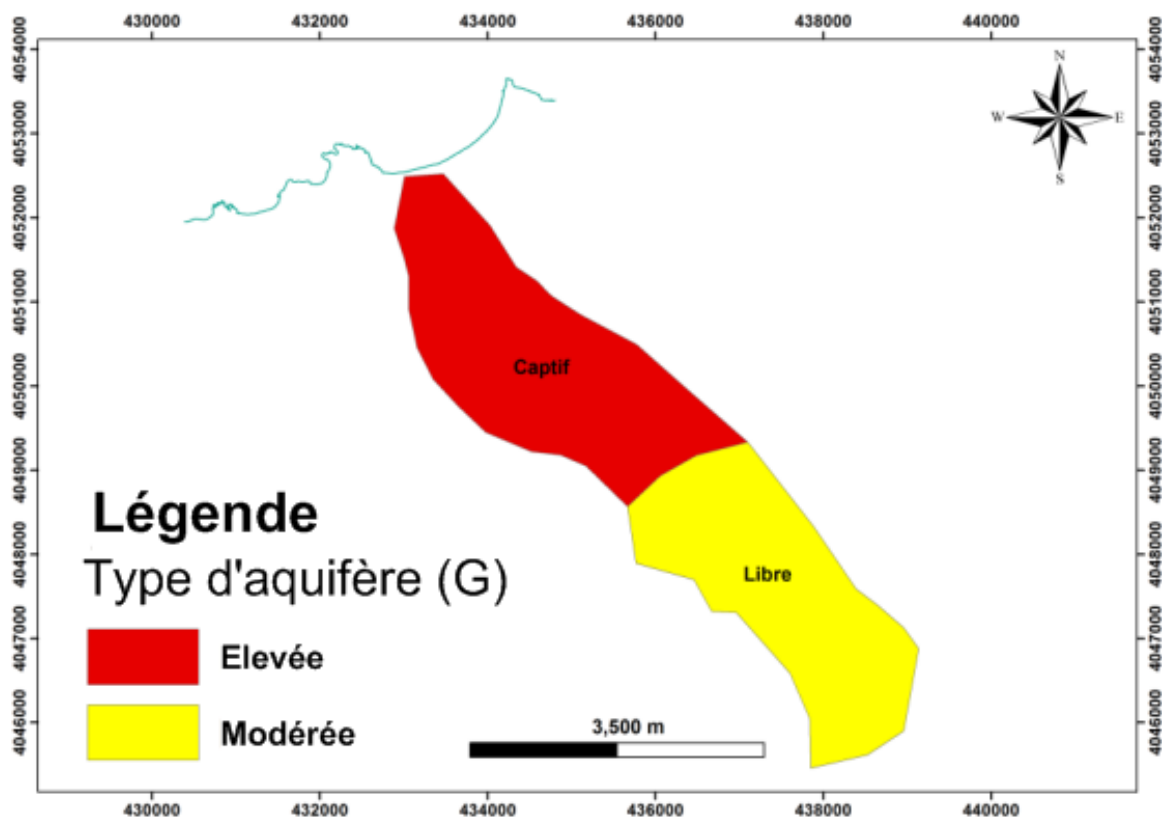
Le logiciel SIG Arcgis 10.3 a été utilisé pour la réalisation des différentes cartes de vulnérabilité pour chaque paramètre et la carte de vulnérabilité finale en raison de la combinaison des six paramètres.

### 3. Résultats

Les six paramètres de l'indice GALDIT ont été calculé pour déterminer la vulnérabilité de l'aquifère de Cherchell à l'intrusion de l'eau de mer. Plusieurs cartes ont été élaborées.

#### 3.1. Type d'aquifère (G)

L'occurrence des eaux souterraines dans les formations géologiques représente le type d'aquifère, ces dernières pouvant être soit confinées (captives), semi-confinées (semi-captives) ou non confinées (libres). Par conséquent, l'aquifère libre, souvent soumis à un pompage intensif, est beaucoup plus exposé à l'intrusion marine que l'aquifère semi-confiné [Chachadi et Lobo-Ferreira, 2007]. D'après la campagne géophysique réalisé dans la région en 1996, l'aquifère de Cherchell est libre au Sud et confiné au Nord, la couche de confinement est composée de marne et de calcaire. De ce fait le modèle lui accorde une valeur de 10 pour la partie avale confiné de l'aquifère et 7,5 pour la partie amont libre (Fig.76).



**Figure 76 :** Application de la méthode GALDIT à l'aquifère de Cherchell, représentation du paramètre, type d'aquifère (G).

### 3.2. Conductivité hydraulique (A)

La conductivité hydraulique, est considérée comme une mesure de la vitesse de déplacement de l'eau à travers la zone saturée en eau. L'ampleur de mouvement de front d'eau de mer est influencée par la conductivité hydraulique [Chachadi et Lobo-Ferreira, 2001a; Lobo-Ferreira et al., 2003], plus la conductivité hydraulique est élevée, plus le risque de l'intrusion de l'eau de mer est facilitée. Les valeurs obtenues par le calcul de la conductivité hydraulique de l'aquifère de Cherchell varient de 10 à 22 m/j. De ce fait une valeur de 7,5 est attribuée à ce paramètre (Fig.77).

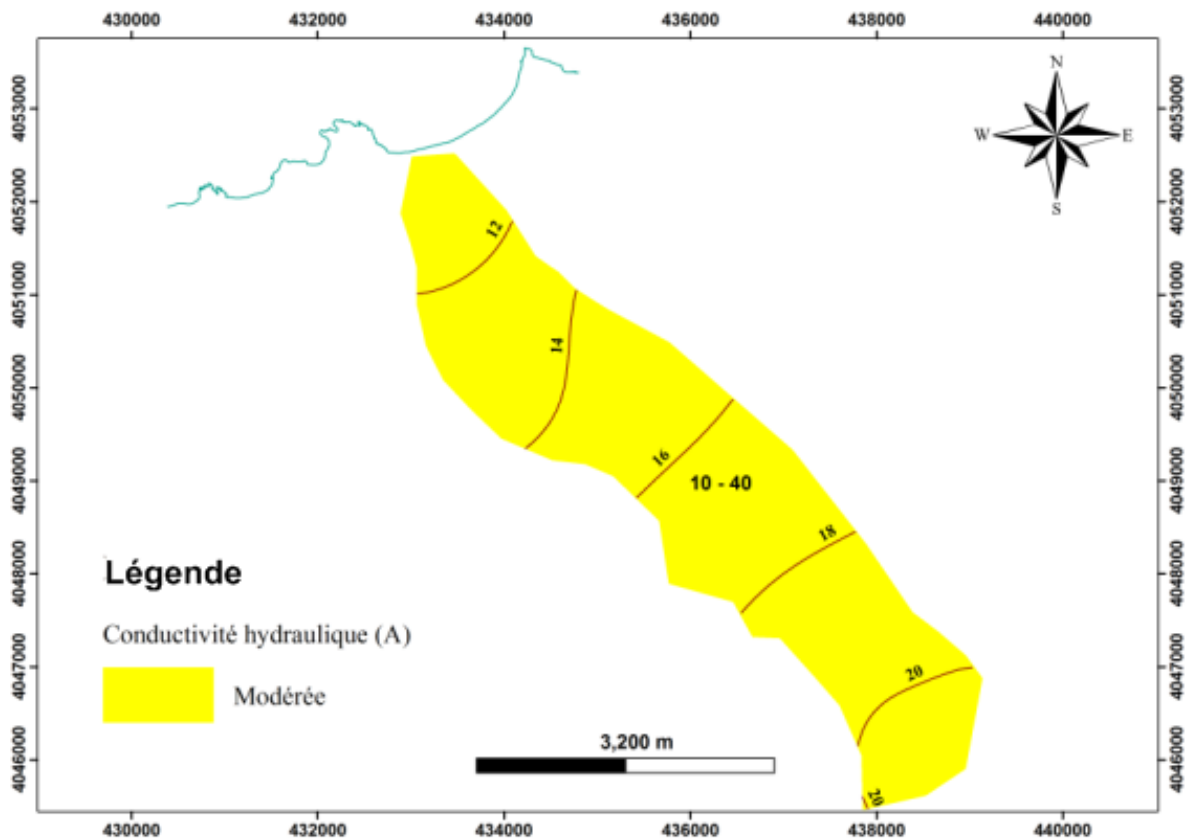
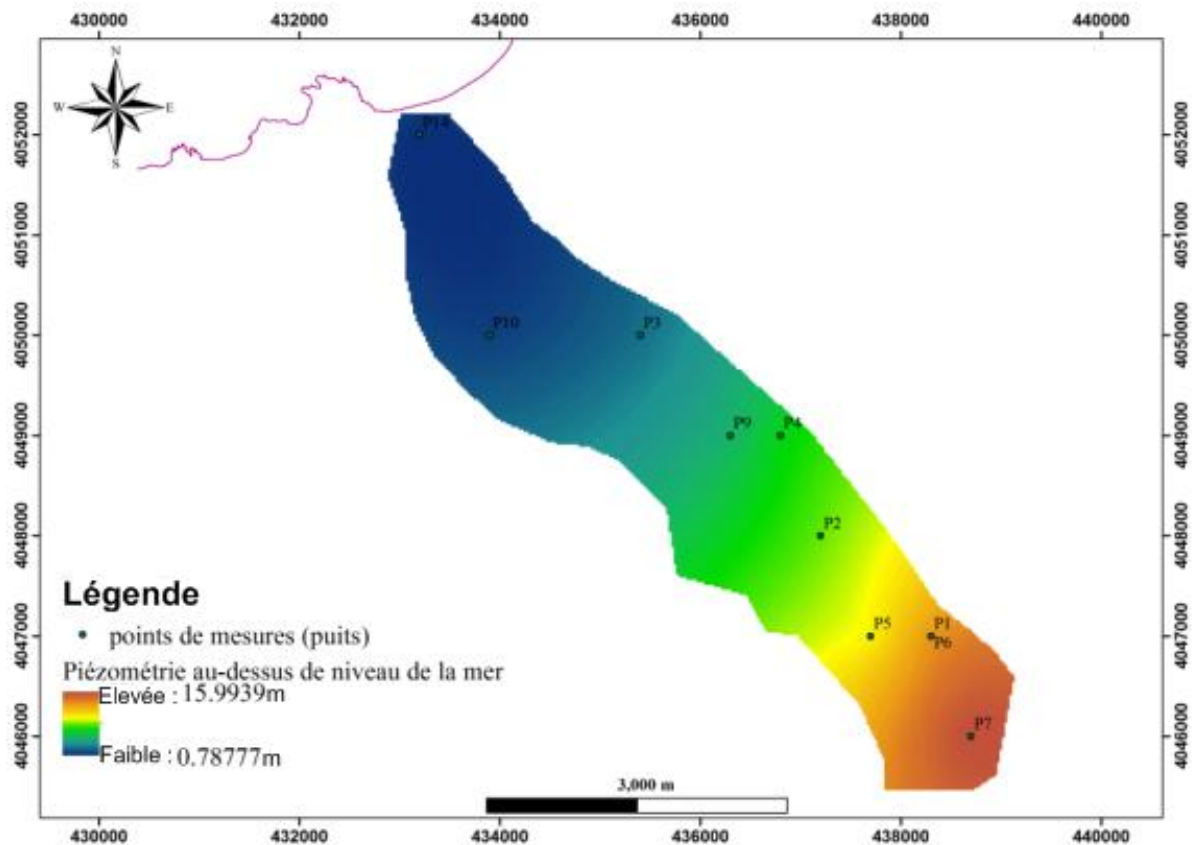


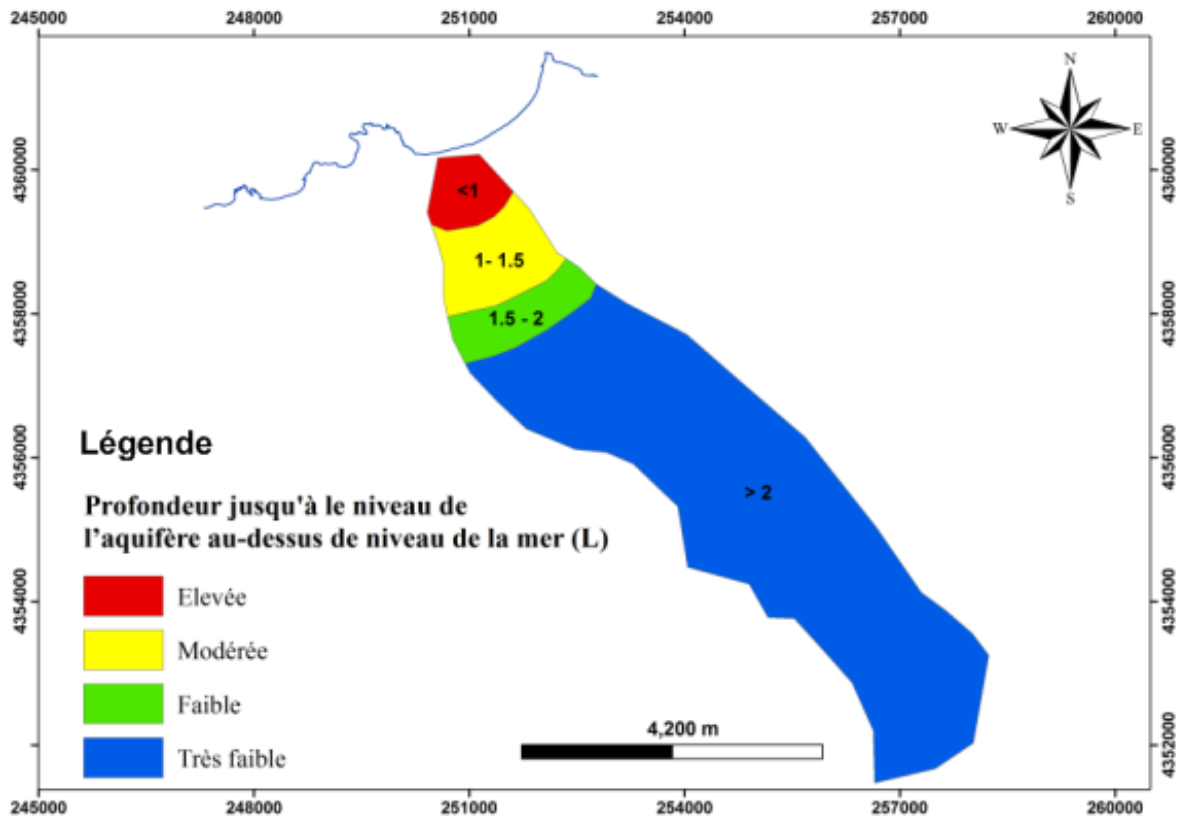
Figure 77 : Application de la méthode GALDIT à l'aquifère de Cherchell, représentation du paramètre, conductivité hydraulique (A).

### 3.3. Profondeur de l'aquifère au-dessus de niveau de la mer (L)

La profondeur de l'aquifère au-dessus de niveau de la mer, est liée directement aux conditions piézométriques de l'aquifère étudié. L'aquifère de Cherchell se trouve à des profondeurs au-dessus de niveau de la mer allant de 0,8 m au Nord et 16 m au Sud (Fig.78), de ce fait des valeurs de 2,5- 5 -7,5 et 10 ont été attribués par la profondeur de l'aquifère au-dessus de niveau de la mer, pour les niveaux piézométriques >2 m entre 1,5 m et 2 m entre 1 m et 1,5 m et enfin < 1 m respectivement (Fig.79).



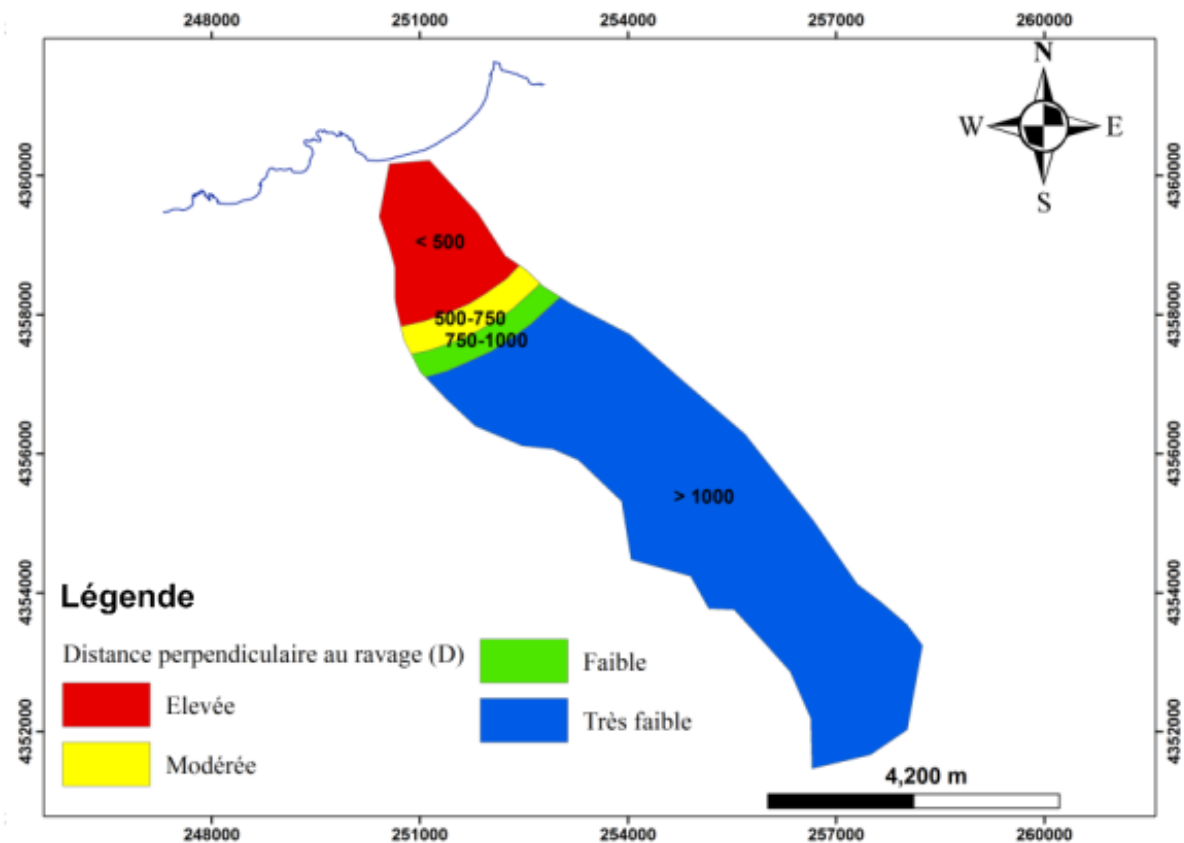
**Figure 78 :** Distribution des points de mesures (puits) et répartition piézométrique au-dessus de niveau de la mer sur l'aquifère de Cherchell.



**Figure 79 :** Application de la méthode GALDIT à l'aquifère de Cherchell, représentation du paramètre, profondeur de l'aquifère au-dessus de niveau de la mer (L).

### 3.4. Distance de la mer (D)

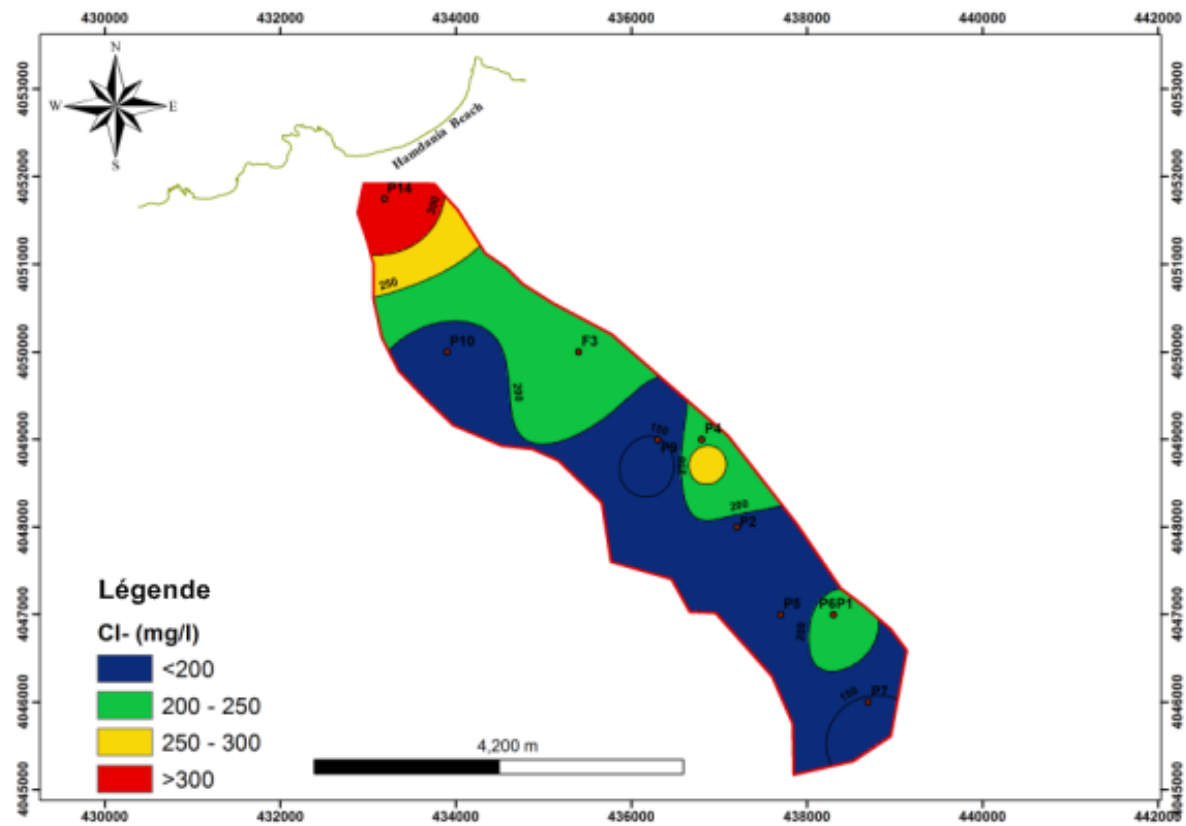
L'impact de l'intrusion marine diminue généralement à mesure que l'on se déplace vers l'intérieur des terres à angle droit par rapport au rivage [Chachadi, 2005]. L'aquifère de Cherchell se trouve en contact direct avec la mer (plage Hamdania) et s'étale sur une longueur de 8 km à l'arrière-pays. De ce fait des valeurs de 2,5 5 7,5 et 10 ont été attribués à des distances > 1000 m entre 750 m et 1000 m entre 500 m et 750 m et enfin < 500 m de rivage respectivement (Fig.80).



**Figure 80 :** Application de la méthode GALDIT à l'aquifère de Cherchell, représentation du paramètre, distance perpendiculaire par rapport à la mer (D).

### 3.5. Impact de l'intrusion marine (I)

Le déséquilibre existant dans l'interface eau de mer/eau douce devrait être pris en compte lors de la cartographie de la vulnérabilité d'un aquifère à l'intrusion d'eau de mer [Chachadi, 2005]. Le chlore est l'ion dominant dans l'eau de mer et disponible en petite quantité dans les eaux douces, par contre les bicarbonates sont caractéristiques des eaux douces et se trouvent en toute petite quantité dans l'eau de mer [Chachadi, 2005]. Le rapport  $Cl^- / (HCO_3^- + CO_3^{2-})$  permet d'identifier l'étendue d'intrusion d'eau de mer dans les aquifères côtiers [Chachadi, 2005]. Plus la valeur de ce ratio augmente, le risque d'intrusion marine dans l'aquifère augmente. Les résultats de ce ratio varient de 0,19 et 1,10 pour l'aquifère de Cherchell. De ce fait une valeur de 2,5 est attribuée aux valeurs de ratio  $< 1$  et une valeur de 5 est attribuée aux valeurs de ratio  $> 1$  (Fig. 81, 82, 83).



**Figure 81 :** Distribution des concentrations de Cl<sup>-</sup> sur l'aquifère de Cherchell.

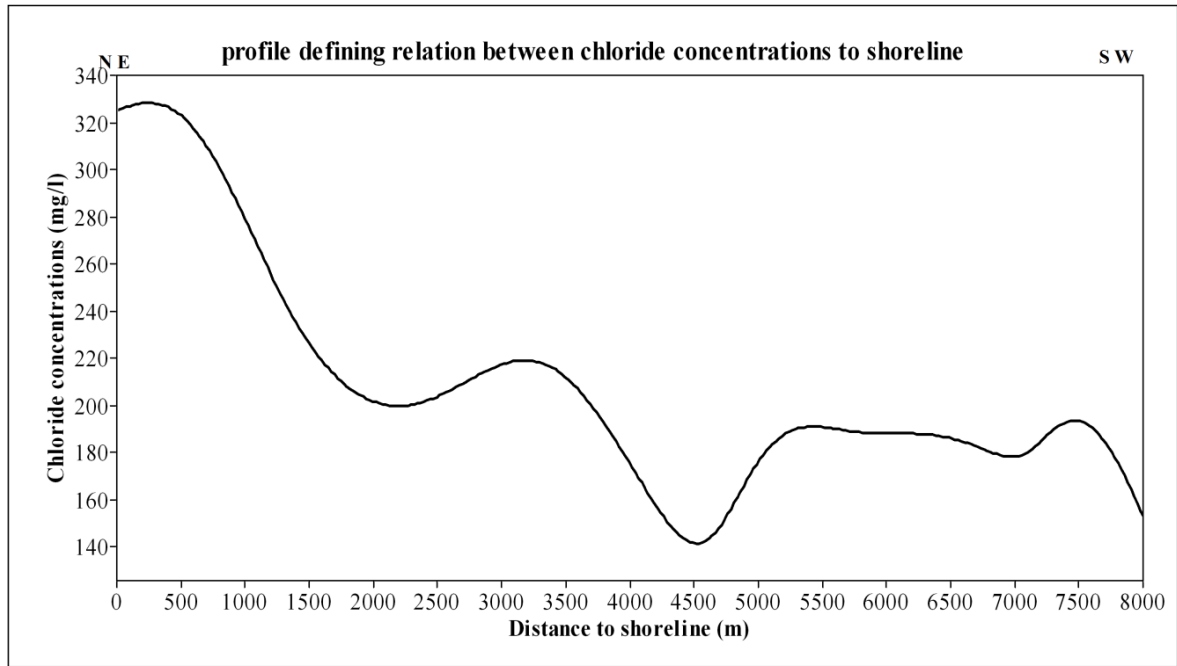


Figure 82 : Profil de variation des concentrations de Cl<sup>-</sup> par rapport au rivage.

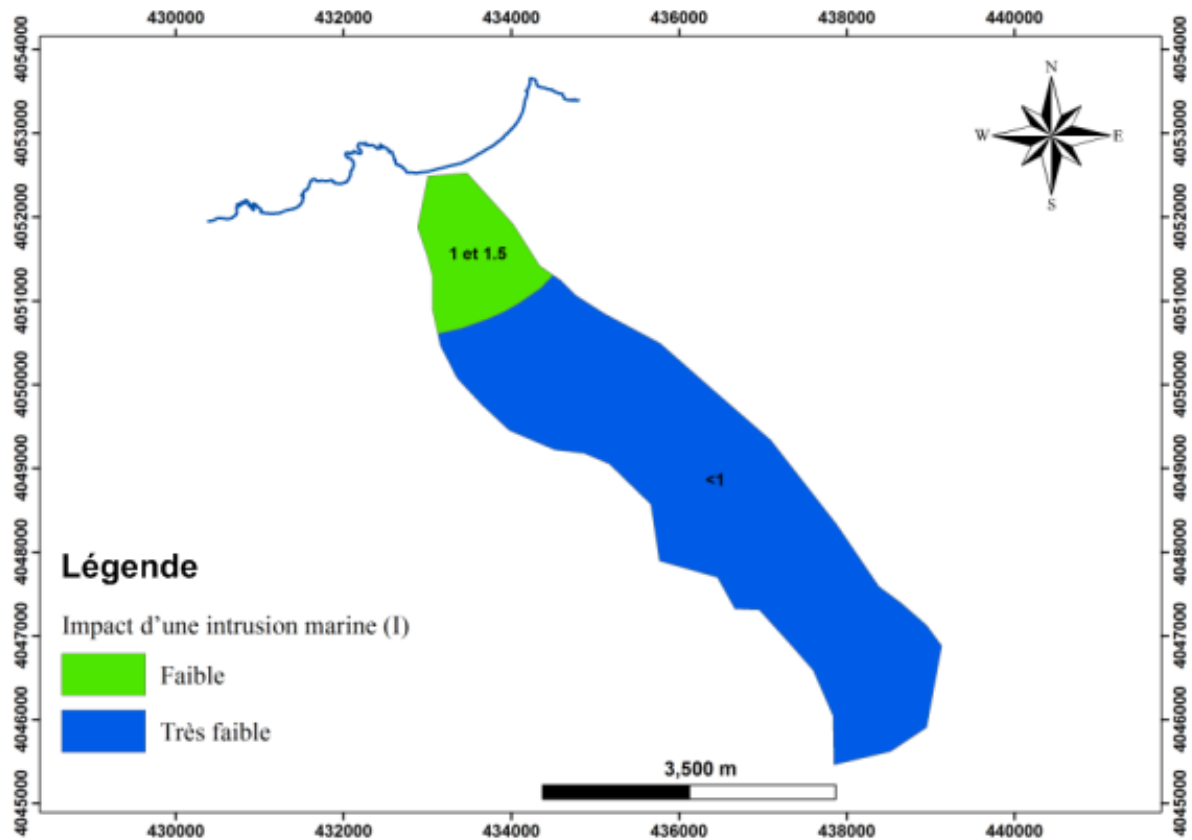
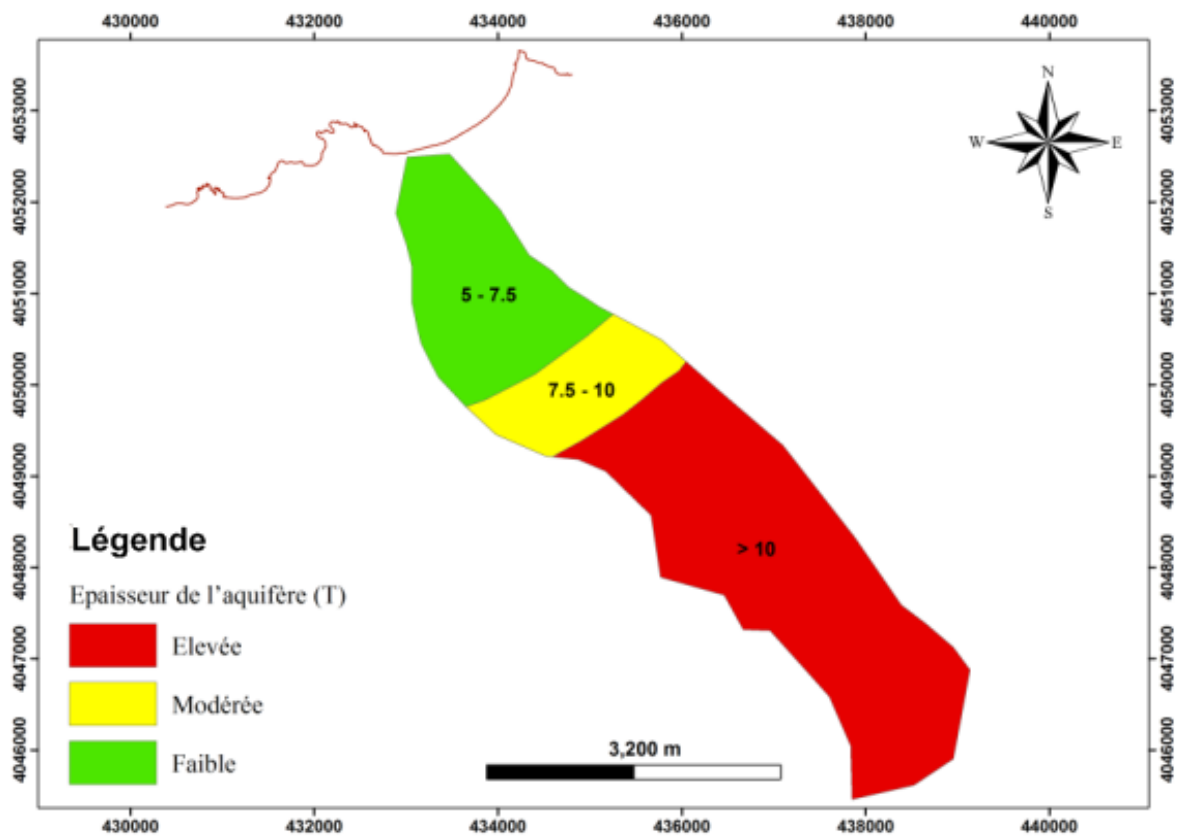


Figure 83 : Application de la méthode GALDIT à l'aquifère de Cherchell, représentation du paramètre, impact de présence d'une intrusion marine (I).

### 3.6. Épaisseur de l'aquifère (T)

Ce facteur est considéré comme amplificateur de la magnitude de l'intrusion marine dans les régions côtières. En effet plus l'épaisseur de l'aquifère est grande plus l'intrusion marine s'étend [Chachadi et Lobo-Ferreira, 2007]. D'après les travaux de [Mancet, 1972], l'épaisseur de l'aquifère de Cherchell est de 5 m dans la limite avale et augmente pour atteindre 20 m en amont. Les valeurs attribuées à ce paramètre sont : 2,5 5 7,5 et 10 pour des épaisseurs < 5 m, entre 5 m et 7,5 m, entre 7,5 m et 10 m et > 10 m respectivement (Fig.84).



**Figure 84 :** Application de la méthode GALDIT à l'aquifère de Cherchell, représentation du paramètre, épaisseur de l'aquifère (T).

### 3.7. Calcul de l'indice GALDIT pour l'aquifère de Cherchell

Les six indices calculés ont conduit à l'élaboration de plusieurs couches et la superposition de ses couches dans un système d'informations géographiques (SIG), permettent la réalisation de la carte finale de vulnérabilité de l'aquifère de Cherchell à l'intrusion marine. Cette carte GALDIT permet d'identifier les zones significatives et sensibles qui pourraient être affectées par une intrusion d'eau de mer. Les valeurs de cet indice GALDIT varient entre 4,83 et 8,5 avec trois classes bien distinctes ( $< 5$ , entre 5 et 7,5 et  $> 7,5$ ) représentent respectivement une vulnérabilité à l'intrusion marine faible, modérée et élevée (Fig. 85).

#### 3.7.1. Zones à vulnérabilité élevée

Ces zones caractérisent la frange littorale où l'aquifère est de nature confinée, et le faible niveau piézométrique au-dessus de niveau de la mer ( $< 1$  m). Sa faible distance à la mer (500 m) et l'épaisseur de l'aquifère qui est de 5 m à proximité de la mer, la rendent fortement menacée par la remontée de biseau salé. Cette zone s'étale sur une surface de 54 ha (4,2%), et sur une longueur de 800 m à l'intérieur des terres. Cette zone est fortement menacée par la montée rapide de biseaux salés, vu la formation sableuse de la région qui reste toujours vulnérable sur toute la partie Nord.

#### 3.7.2. Zone à vulnérabilité modérée

Cette zone caractérise le centre de l'aquifère, qui coïncide avec une piézométrie modeste entre 1 et 2 m au-dessus de niveau de la mer. Cette zone est sollicitée par une agriculture moderne très consommatrice en eau. La plaine est relativement large à ces endroits (environ 60 m), ce qui la rend très sollicitée par l'agriculture moderne, donc avec un probable épuisement de l'aquifère, par la surexploitation excessive de son réservoir d'eau. Ceci qui le rend menacé par la remontée de biseau salé. La surface occupée par cette zone est de 305 ha correspond à (23,4%) de l'aquifère.

#### 3.7.3. Zone à vulnérabilité faible

Cette zone est caractérisée par sa distance importante de rivage (environ 2,5 km), et son niveau piézométrique  $> 2$  m au-dessus de niveau de la mer, ce qui lui permet de fonctionner comme zone de charge de l'aquifère. De ce fait, elle contribue au maintien de l'équilibre hydrodynamique de l'aquifère. Cette zone présente une surface 942 ha (72,4% de la surface totale de l'aquifère).

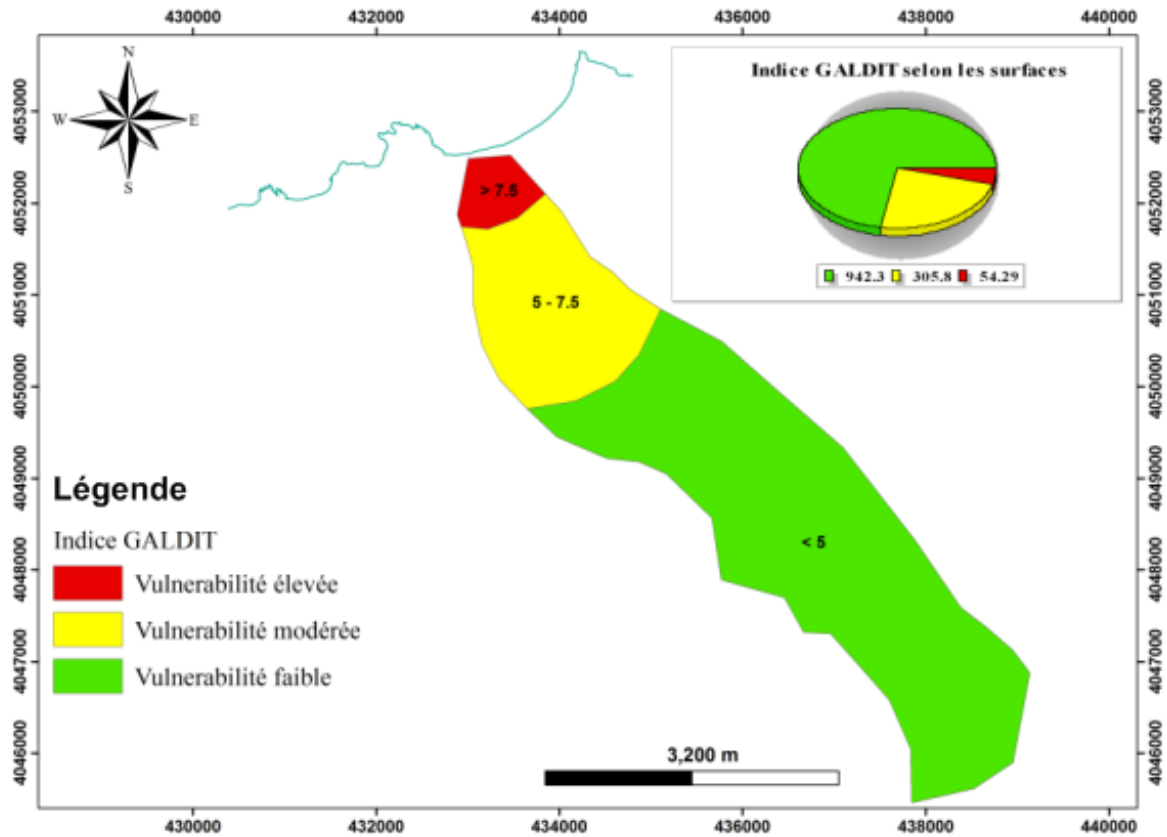


Figure 85 : Application de l'indice GALDIT à l'aquifère de Cherchell.

#### 4. Discussion

La méthodologie GALDIT a été mise en œuvre dans la région de Cherchell dans le but d'évaluer la vulnérabilité de l'aquifère côtier de la région à l'intrusion d'eau de mer. La zone de vulnérabilité élevée représente 4,5% de la superficie totale de l'aquifère. Cette vulnérabilité élevée atteint une longueur de 800 m vers l'intérieur des terres. Près de 23,4% de la surface de l'aquifère possède une vulnérabilité modérée, tandis que la partie la plus importante de l'aquifère (72,1%) est représenté par une faible vulnérabilité à l'intrusion d'eau de mer.

La carte de vulnérabilité finale est en accord avec le système hydrogéologique de l'aquifère côtier de Cherchell. Les pratiques actuelles de l'exploitation des eaux souterraines, qui se caractérisent par un pompage excessif de l'eau souterraine et le déclin des sources d'alimentation surfacique, provoquent un rabattement important de l'aquifère. Ceci va provoquer l'inversement de l'écoulement d'eau souterraine de la côte vers l'intérieur des terres, qui se traduit par l'élévation de concentration de chlore (Cl-) en aval.

La fertilisation des sols, et le climat méditerranéen subhumide, rend la région très sollicitée par les activités agricoles qui constitue la première vocation économique de la région. La

variation des formes (montagne, plaine, forêt, plages sableuses, côtes rocheuses et falaises) offre à la région une vue pittoresque.

Le principal problème du site est la quantité d'eau transmise à l'aquifère. Le déficit d'apport en eau est lié à l'implantation du barrage Boukerdene dans le sous bassin versant de la région. Cette situation stoppe l'écoulement des eaux de ruissèlement descendant des piémonts, en provoquant la diminution des quantités d'eau infiltrée dans le sol en empêchant l'alimentation de l'aquifère. L'impact des changements climatiques, tels que les faibles précipitations et la modification attendue du niveau de la mer, pourraient accroître la salinité des aquifères côtiers [Mahrez et al., 2018]. Toutefois, l'alimentation de l'aquifère par les eaux de surface devrait être nécessaire pour envisager l'équilibre. Des canaux artificiels doivent être mis en place pour alimenter l'aquifère par le surplus des eaux de barrage pendant les périodes pluvieuses. La libération des pores par l'arrosage de la partie superficielle du sol facilite la pénétration de l'eau et la recharge de l'aquifère, en renforçant les réserves d'eau souterraine et pousse le biseau salé vers la mer. La surveillance des profondeurs des puits est importante, elle ne doit pas dépasser la couche superficielle de l'aquifère, pour ne pas épuiser l'aquifère et empêcher le biseau salé. Il faudrait aussi penser à la réorientation des cultures modernes aux cultures moins exigeantes en eau. L'alimentation de la plage Hamdania, par des apports solides, semble nécessaire, pour stopper l'avancée de la mer, qui menace la durabilité de l'aquifère. Pour une bonne protection de la qualité de l'aquifère, des évaluations mensuelles semblent nécessaires

### **Conclusion**

La méthode GALDIT a été appliquée pour évaluer l'intrusion de l'eau de mer dans l'aquifère de Cherchell. La carte finale souligne que la partie littorale de l'aquifère souffre d'une vulnérabilité élevée aux intrusions d'eau de mer, alors que le reste de la zone est représentée par une vulnérabilité faible à modérée. Certains paramètres, comme le type d'aquifère, le niveau d'eau souterraine, la distance du rivage, et l'épaisseur de l'aquifère, sont ceux dont l'amplitude est la plus élevée. La surexploitation des ressources en eau souterraine, et le manque d'apport de recharge constitue le principal problème, même si un plan de gestion sera adopté. L'intrusion marine peut avoir des effets néfastes sur tout le système environnemental de la zone côtière puisqu'elle affectera les sols et les eaux douces souterraines très vitales pour la population. Une évaluation de tous les impacts possibles induits par les activités anthropiques semble nécessaire afin d'identifier toutes les sources de salinisation.

Dans l'ensemble, la carte obtenue par la cartographie de la vulnérabilité de l'aquifère de Cherchell à l'intrusion marine, constitue une base de données importante pour les décisions futures en matière de gestion de l'aquifère. Dans ce contexte, l'utilisation durable à long terme de l'aquifère de Cherchell constituer l'objectif principal, de point de vue qu'il est le seul aquifère dans la région.

Les trois paramètres analysés dans les chapitres précédents (érosion côtière, submersion marine et intrusion marine) vont définir le degré vulnérabilité de la région de Cherchell, qui fera l'objet de notre prochain chapitre.

## **Partie IV : Vulnérabilité côtière**

### **Chapitre 1 : Évaluation de la vulnérabilité physique et socio-économique**

## Introduction

L'exploitation et le développement de la côte de Cherchell présente certains risques liés aux problèmes d'érosion et aux inondations côtières. Ces impacts peuvent augmenter avec l'élévation prévue du niveau de la mer Méditerranée [GIEC, 2014; Jimenez et Sánchez-Arcilla, 1997]. Ceci sera l'un des défis majeurs pour la côte algérienne dans les années à venir, s'ajoutant à la mauvaise gestion ou parfois la non-gestion des espaces côtiers.

Cependant, les études menées pour l'évaluation de la vulnérabilité côtière en Algérie sont rares, principalement en raison de l'absence de données de base. Cela a affecté la façon d'exploitation de la côte sur une longue période. Les principales applications de l'indice de vulnérabilité côtière (IVC) en Algérie se résument à une approche physique de la région d'Alger [Mihoubi et al., 2014] qui ne prend pas en compte les paramètres socio-économiques. Une autre approche utilise certains paramètres socio-économiques tels que la baie de Bejaia [Djouder, 2018], baie d'Alger [Rabehi et al., 2018]. Ces travaux ont démontré un état dégradé, avec des perspectives assez pessimistes.

À cet effet, la vulnérabilité physique et socio-économique de la côte de Cherchell a été évaluée, en utilisant les variables les plus influentes de la vulnérabilité des zones côtières mondiale, en se basant sur la méthode de Hammar-Klose and Thieler, [2001] pour l'indice de vulnérabilité physique ainsi la méthode de McLaughlin and Cooper, [2010] pour l'indice de vulnérabilité socio-économique.

Il est nécessaire d'évaluer l'indice de vulnérabilité côtière de la côte de Cherchell et d'identifier des options d'adaptation. L'utilisation d'une base de données intégrée dans un système d'information géographique (SIG) a permis de mieux caractériser les indices de vulnérabilité physique et socio-économique (IVC<sub>phys</sub> et IVC<sub>socio-éco</sub>) et de les cartographier. L'évaluation de vulnérabilité côtière permet non seulement de distinguer les secteurs les plus vulnérables, nécessitant une intervention urgente, mais permet aussi aux gestionnaires d'adapter des pratiques et des politiques de planification pour une meilleure occupation et préservation de ces espaces fragiles.

## 1. Données et méthodes

### 1.1. Indice de vulnérabilité physique

#### 1.1.1. Méthodologie

L'étude de vulnérabilité de la zone côtière s'appuie sur une démarche participative ainsi que sur le calcul de l'Indice de Vulnérabilité Côtière (IVC) de *Gornitz et al.*, [1994] qui prend en compte les variables suivantes : la géomorphologie ; l'érosion/accrétion de la ligne du rivage ; la pente de la côte ; la remontée relative du niveau de la mer ; la hauteur moyenne des houles ; l'amplitude moyenne de la marée. Cette approche, proposé par *Gornitz* [1990; 1991] et améliorées par *Hammar-Klose et Thieler* [2001] a pour but d'évaluer la vulnérabilité sur la côte Est des États-Unis. Le même principe a été utilisé dans le calcul de l'indice de vulnérabilité côtière (IVC) pour estimer la menace d'élévation du niveau de la mer dans l'Atlantique, le Golfe du Mexique et sur les côtes du Pacifique [*Thieler et Hammar-Klose, 2000; Thieler et Hammar-Klose, 1999; Thieler et Hammar-Klose, 2000a; b*]. La simplicité de la méthode de l'IVC et la fiabilité des résultats présentée conduit plusieurs chercheurs à suivre la même méthode pour la réalisation de leurs travaux de recherche [*Bagdanavičiūtė et al., 2015; Djouder, 2018; Doukakis, 2005; Dwarakish et al., 2008; Etienne, 2014; Kumar et Kunte, 2012; Mujabar et Chandrasekar, 2013; Niazi, 2007; Özyurt et Ergin, 2010; Paskoff, 2004; Rao et al., 2008; Romieu et al., 2010; Vittal Hegde et Radhakrishnan Reju, 2007*].

Ce choix de méthode *Hammar-Klose et Thieler*, [2001] a été basé sur le fait que la thématique traitée s'articule autour du volet « forçage de la mer » et les facteurs géologiques qui rendent (ou non) la zone d'étude comme étant vulnérable. Chaque variable est dotée d'une valeur relative de risque basée sur l'importance potentielle de sa contribution aux changements physiques sur la côte. Ces variables sont classées selon une échelle linéaire de 1 à 5, et suivant un ordre de vulnérabilité croissant : la valeur 1 correspondrait à un risque très faible, et 5 au plus élevé *Hammar-Klose and Thieler*, [2001]. Les segments du littoral avec des valeurs d'indice élevées auront des reliefs bas, un substrat facilement érodable, un recul du trait de côte important, et seront exposés à des énergies élevées de vagues [*Gornitz et al., 1994*]. Une fois que chaque section de littoral est assignée d'une valeur de risque basée sur chaque variable spécifique de données, l'indice côtier de vulnérabilité est calculé en utilisant l'équation de [*Hammar-Klose et Thieler, 2001; Thieler et Hammar-Klose, 2000; Thieler et Hammar-Klose, 1999; Thieler et Hammar-Klose, 2000a; b*] . C'est la racine du produit des différentes variables divisées par le nombre de variables utilisé :

$$IVC = \sqrt{a * b * c * d * e * \frac{f}{6}} \quad (6)$$

Avec : (a. la géomorphologie, b. la pente de la côte, c. la remontée relative du niveau de la mer, d. érosion/accrétion de la ligne du rivage, e. l'amplitude moyenne de la marée, f. la hauteur moyenne des houles) représentant l'indice des six facteurs ou variables de vulnérabilité pris en compte (Tableau 6).

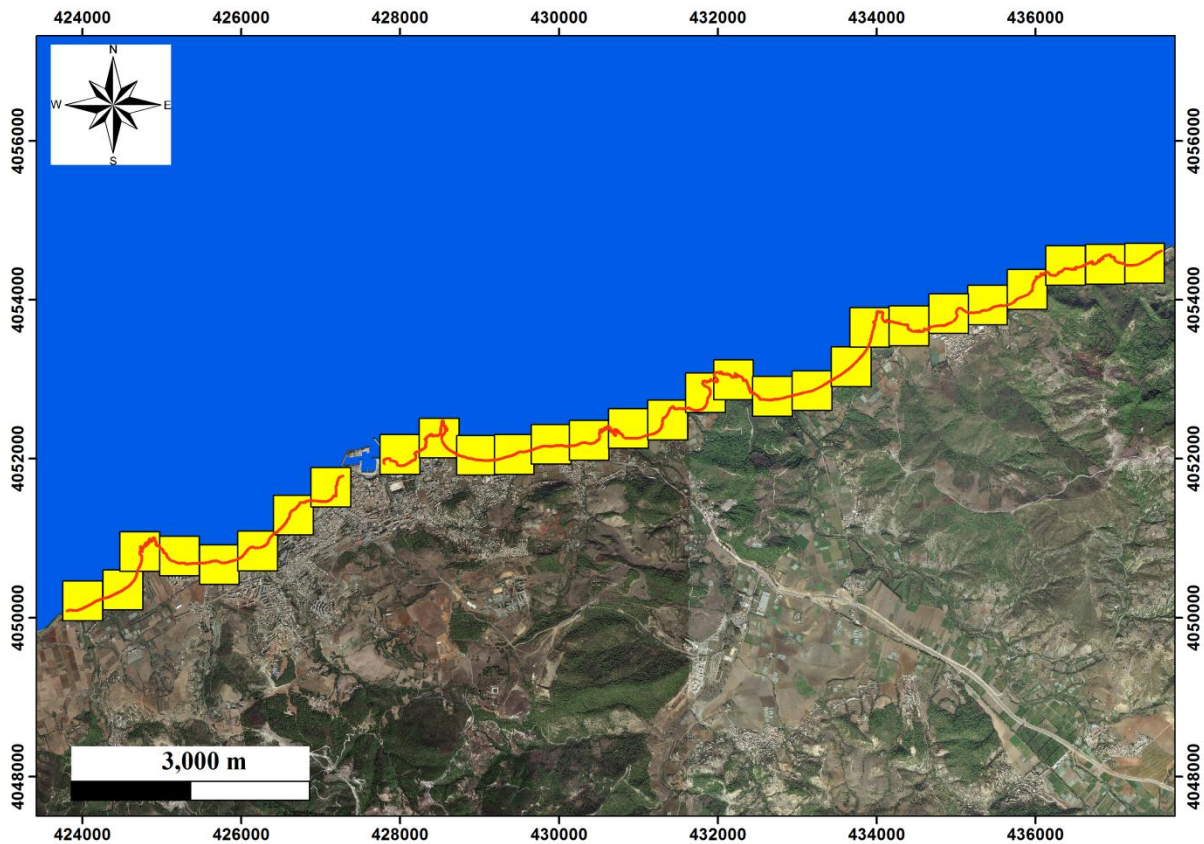
**Tableau 6 :** Niveaux des six variables de la classification côtière faite par l'USGS sur la côte Atlantique des États-Unis [*Hammar-Klose et Thieler, 2001; Thieler et Hammar-Klose, 2000; Thieler et Hammar-Klose, 1999; Thieler et Hammar-Klose, 2000a; b*]

IVC Variable	Très faible 1	Faible 2	Modérée 3	Elève 4	Très élevé 5
Géomorphologie	Côte rocheuse à falaise haute	Côte à falaise moyenne	Côte à falaise basse	Lagune	Côtes deltaïques, marais, cordon
b) Pente côtiers (%)	> 12	12 et 9	9 et 6	6 et 3	< 3
c) Elévation relative de niveau de la mer (mm/an)	<1,8	1,8 et 2,5	2,5 et 3,0	3,0 et 3,4	> 3,4
d) Variation du trait de côte (m/an)	> 2,0	2,0 et 1,0	- 1,0 et + 1,0	- 1,1 et - 2,0	< - 2,0
e) Marée (m)	> - 6,0	4,1 et 6,0	2,0 et 4,0	1,0 et 1,9	< 1,0
f) Hauteurs des vagues (m)	< 0,55	0,55 et 0,85	0,85 et 1,05	1,05 et 1,25	> 1,25

Les valeurs de l'IVC obtenues par analyse statistique des divisions par quantiles attribuées à chaque segment du littoral ont été classées en quatre catégories, avec une vérification visuelle [*Thieler et Hammar-Klose, 1999*]. Chacune de ces catégories indique le degré de vulnérabilité physique de la côte : faible vulnérabilité ( $IVC_{phys} < 25 \%$ ), vulnérabilité modérée ( $25 \% < IVC_{phys} < 50 \%$ ), vulnérabilité élevée ( $50 \% < IVC_{phys} < 75 \%$ ), vulnérabilité très élevée ( $IVC_{phys} > 75 \%$ ).

Avant tout calcul et analyse statistique, une présentation graphique des cellules de calcul sont nécessaires, avec un choix optimal de dimension de ces entités virtuelles. En suivant la méthode de [*Hammar-Klose et Thieler, 2001*], nous avons choisi des cellules de dimension 500\* 500 m, car l'étude s'effectue sur une grande échelle (27 km) (Fig.86), afin de mieux

illustrer la vulnérabilité de notre zone d'étude par rapport aux facteurs physiques. Les cellules de calcul sont numérotées de 1 à 29 de l'Est vers l'Ouest.



**Figure 86 :** Découpage du littoral de Cherchell en profils de longueurs identiques 500\*500 m selon la méthode de [Hammar-Klose et Thieler, 2001].

### 1.1.2. Constitution de la base de données

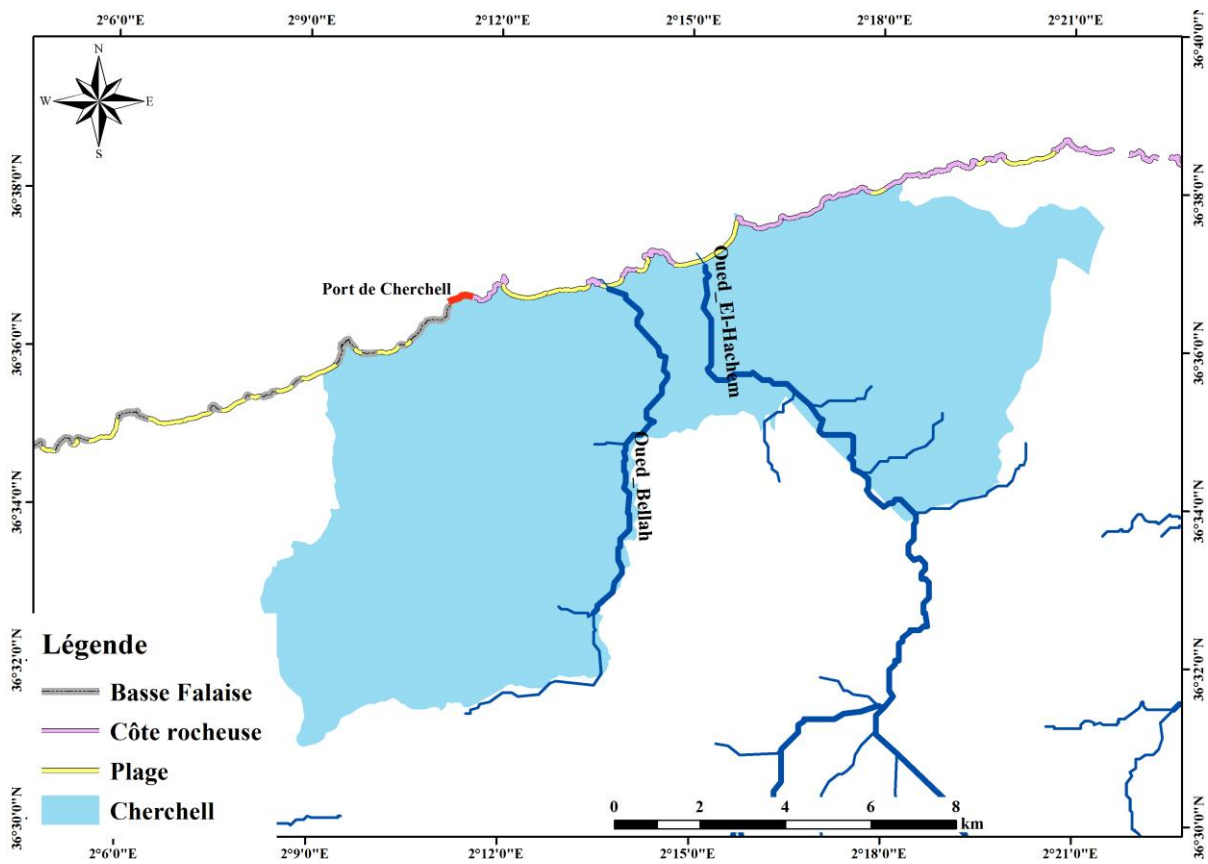
Afin de développer une base de données pour l'évaluation de la vulnérabilité du site d'étude, les données relatives à chacune des six variables ont été recueillies.

#### 1.1.2.1. Variables géologiques

Les variables géologiques (géomorphologie, le taux de changement historique du rivage et la pente côtière), expliquent la résistance relative du littoral à l'érosion et la tendance à long terme d'érosion/accrétion et la vulnérabilité à la submersion.

**a) Variable géomorphologie**

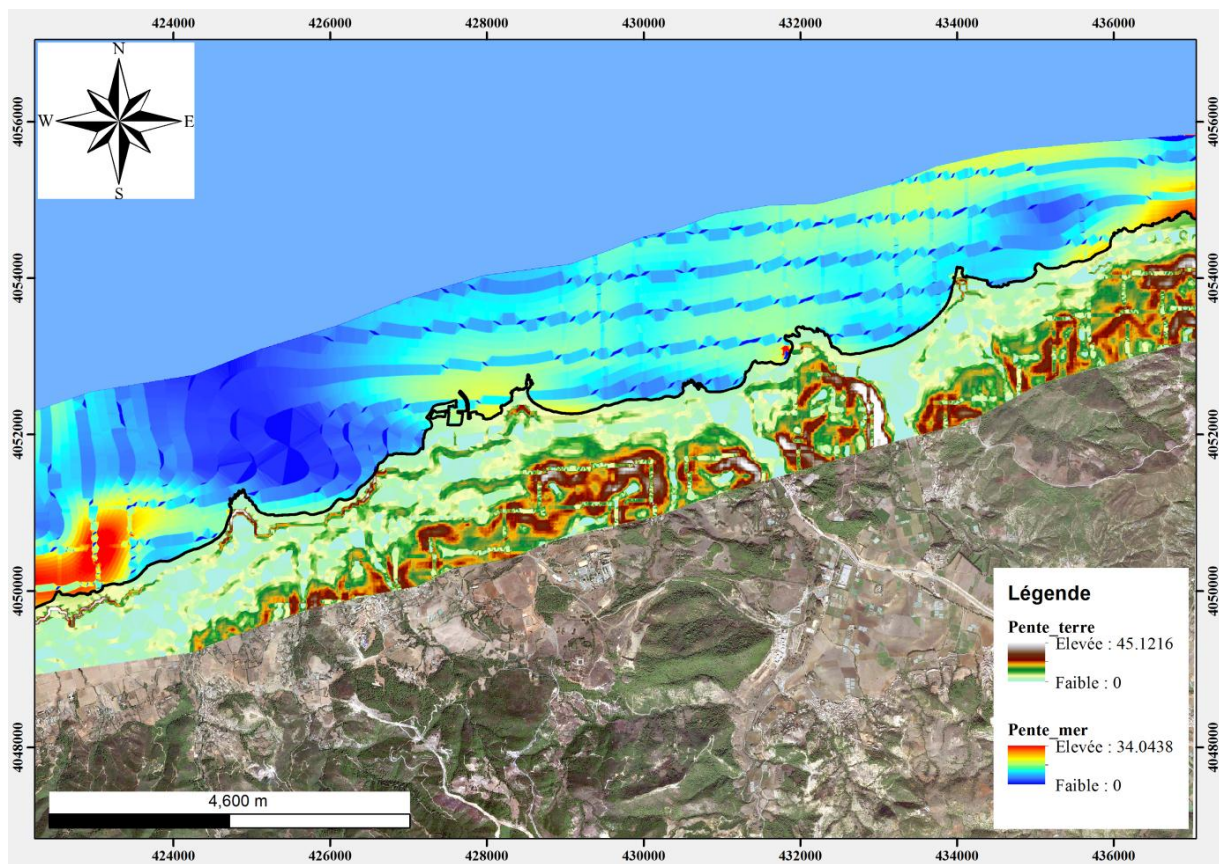
La variable géomorphologie exprime l'érodabilité relative des différents types de relief. Cette érodabilité des reliefs est liée aux degrés de résistance des matériaux qui les composent aux processus érosifs [Thieler et Hammar-Klose, 1999]. La forme d'une côte influence considérablement sa réaction aux conditions du milieu marin. Les côtes rocheuses et les côtes à falaises expriment un risque très faible, par contre les plages expriment un risque très élevé lors de l'évaluation de la vulnérabilité à l'érosion (Tab.6). La détermination de cette variable est effectuée en se basant sur la carte géomorphologique (Fig.87) ainsi que les sorties sur terrain.



**Figure 87 :** Géomorphologie de la côte de Cherchell et ses environs.

**b) Variable pente côtière**

La pente côtière, est une variable quantitative, permet une évaluation de deux risques, érosion et submersion marine. Les bandes côtières à faible pente sont plus sensibles à l'érosion, aux tempêtes et tsunamis que les bandes côtières à pente élevées [Gaki Papanastassiou *et al.*, 2010]. Du point de vue vulnérabilité physique, les zones côtières à faible pente (< 3%) présentent un degré de vulnérabilité très élevée, et les zones côtières à fortes pentes (> 12%) présente un degré de vulnérabilité très faible. Dans cette étude, la pente de la côte de Cherchell a été calculée à partir d'une carte topo bathymétrique (Fig.88).



**Figure 88 :** Topo-bathymétrie de Cherchell.

**c)        Variable érosion/accrétion de la ligne du rivage**

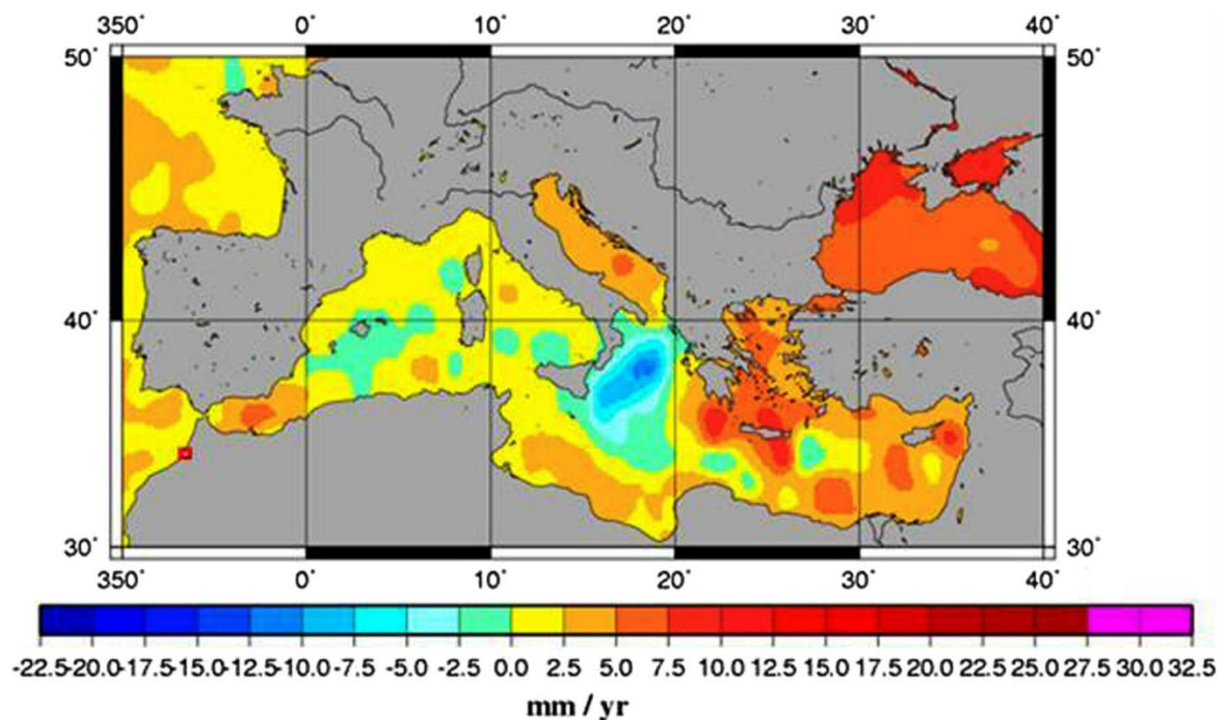
Du point de vue vulnérabilité, les tronçons côtiers en recul ne peuvent pas compenser les pertes engendrées par l'érosion ou submersions. Par conséquent ils sont considérés plus vulnérables, alors que les zones côtières en accrétion sont considérées comme moins vulnérables par ce qu'ils se déplacent vers la mer, ce qui entraîne un gain de la terre. Dans cette étude, en raison du manque de données, les taux d'érosion/accrétion de trait de côte ont été calculés seulement pour les côtes sableuses. Les côtes rocheuses et les côtes à falaises sont considérés comme stables. Ces taux d'érosion/accrétion du trait de côte ont été calculés sur une période de 58 ans pour la plage Hamdania, en utilisant une photographie aérienne (1959) et d'images satellitaires (2009-2013-2017). Par contre, pour les plages Tizirine et Centre, l'étude s'est faite sur une période de 37 ans, en utilisant des photos aériennes (1980 pour la plage Tizirine, 1980-1996 pour la plage Centre) et des images satellitaires (2009-2013-2017 pour la plage Tizirine, 2009-2017 pour la plage Centre). Le traitement des données a été réalisé à l'aide de logicielle Arcgis 10.3. La base de données crée a été analysé à l'aide du système d'analyse numérique '*Digital Shoreline Analysis System (DSAS 4.3)*', afin de calculer les taux de changement de trait de côte avec comme méthode de calcul la méthode des points extrêmes '*End Point Rate (EPR)*' [*Thieler et al., 2009*]. Des notes de risque sont attribuées en fonction des résultats obtenus (voir Partie II : Chapitre I. Cinématique côtière).

### 1.1.2.2. Variables de forçage de la mer

Les variables du processus physique notamment l'élévation du niveau de la mer, la hauteur moyenne des houles et l'amplitude des marées, contribuent toutes aux risques submersion d'un segment particulier du littoral sur des échelles de temps allant de quelques heures à plusieurs siècles.

#### a) Variable remontée relative de niveau de la mer

L'élévation de niveau de la mer accentue les risques d'érosion et de submersion dans les zones côtières basses. Par conséquent, lors de l'étude de la vulnérabilité, le taux d'élévation de niveau de la mer est un paramètre important à prendre en considération. Plus ce taux est élevé, plus la côte est vulnérable. Dans cette étude, on a opté pour les mesures effectuées par les satellites d'altimétrie spatiale Topex/Poséidon et Jason 1 (Fig.89), pour la période allant de 1993 et 2006, en Méditerranée occidentale. Ces mesures sont très utiles puisqu'il n'existe aucune mesure historique des marégraphes dans la côte de Cherchell.

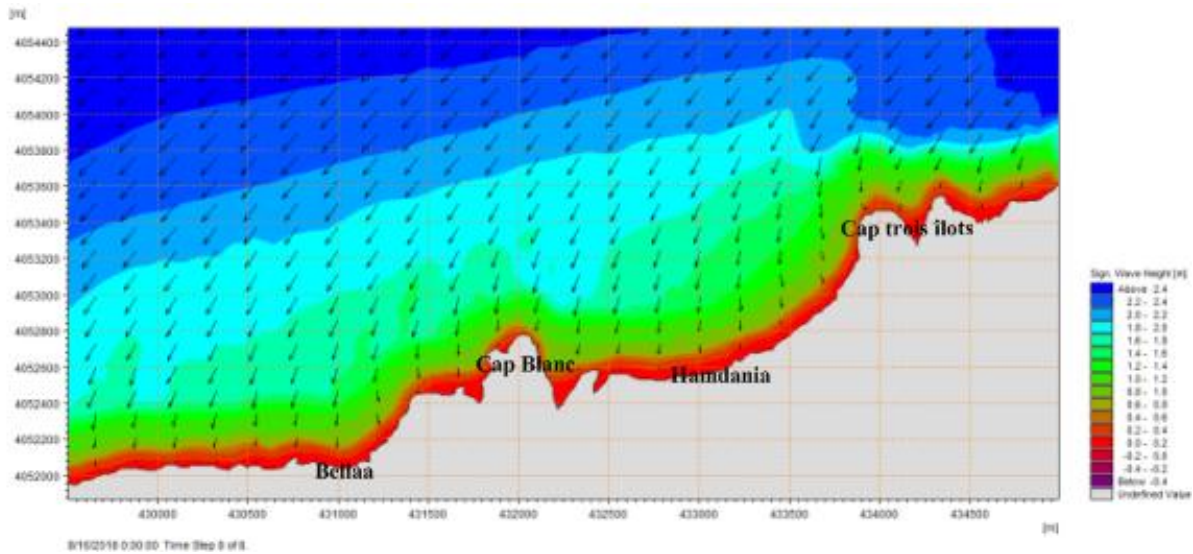


**Figure 89 :** Distribution géographique des vitesses de variation du niveau de la mer entre 1993 et 2006 par les satellites d'altimétrie spatiale Topex/Poséidon et Jason 1

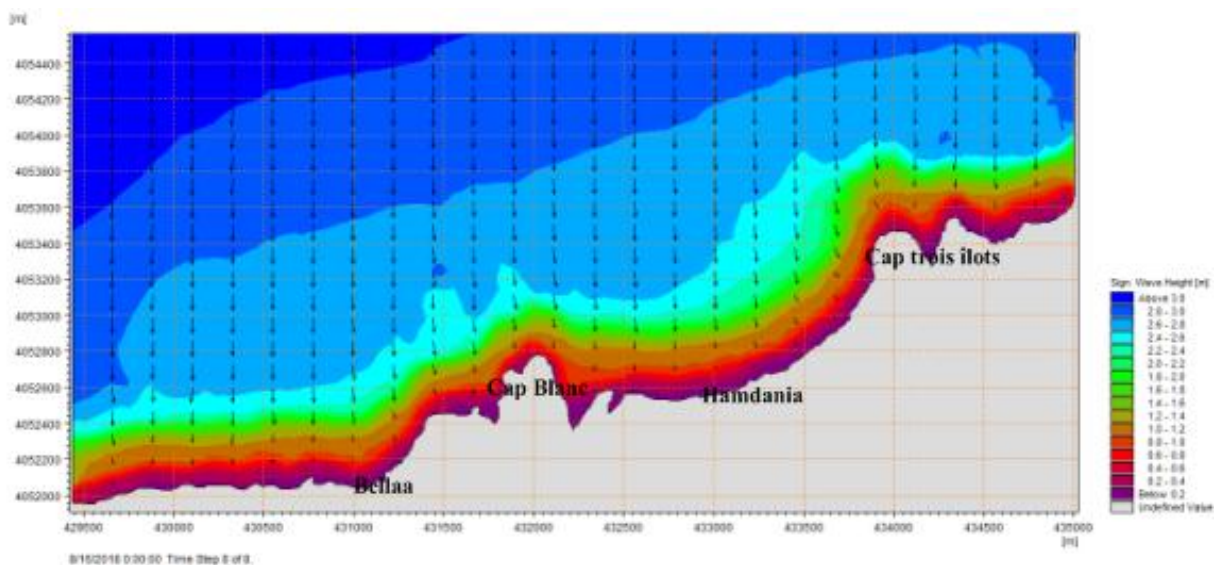
[<http://www.legos.obs-mip.fr>].

### b) Hauteur significative des vagues à la côte (Hs)

La hauteur significative des vagues est définie comme la hauteur moyenne, de crue à la crête des tiers les plus hautes [Hammar-Klose and Thieler, 2001]. Plus les vagues sont hautes ( $> 3,4$  m), plus leur énergie augmente et le risque engendré est élevé. Aux fins de la présente étude, on a opté pour la simulation numérique des données de houle à la côte à l'aide de logiciels MIKE 21-SW (Fig.90, 91, 92, 93, 94, 95, 96).



**Figure 90 :** Hauteurs significatives des houles à la côte dans la partie Est de Cherchell (houle  $45^{\circ}$ NE).



**Figure 91 :** Hauteurs significatives des houles à la côte dans la partie Est de Cherchell ( $360^{\circ}$ N).

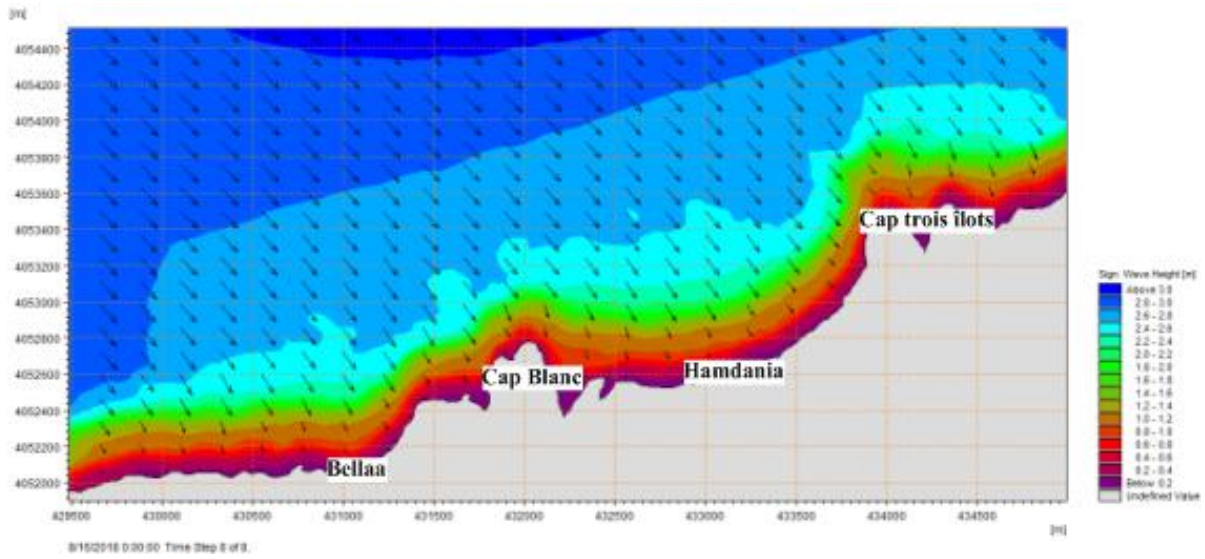


Figure 92 : Hauteurs significatives des houles à la côte dans la partie Est de Cherchell (315°NW).

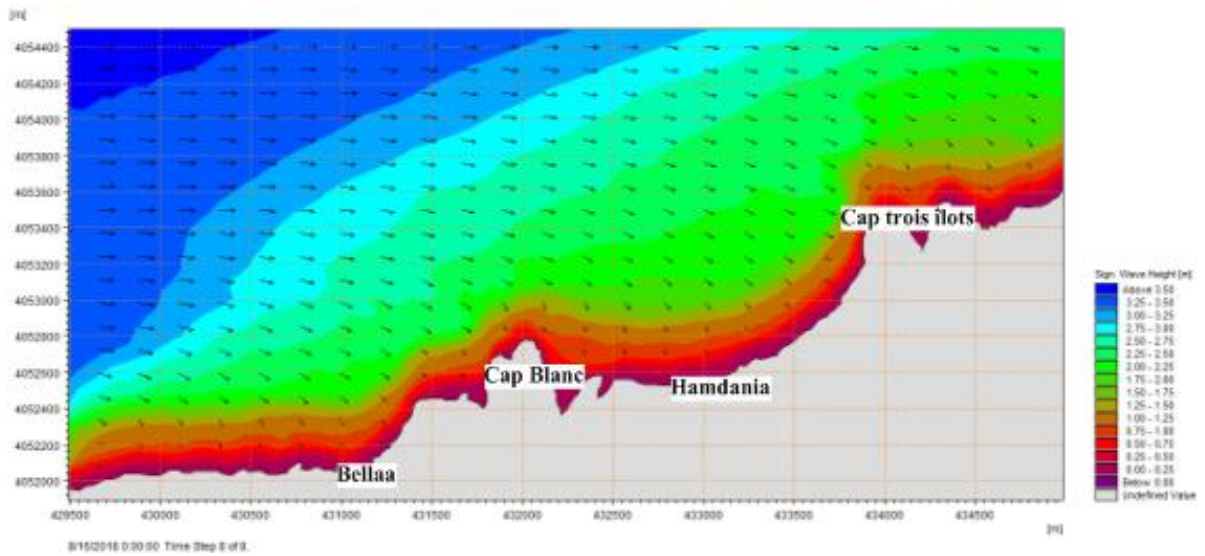


Figure 93 : Hauteurs significatives des houles à la côte dans la partie Est de Cherchell (270°W).

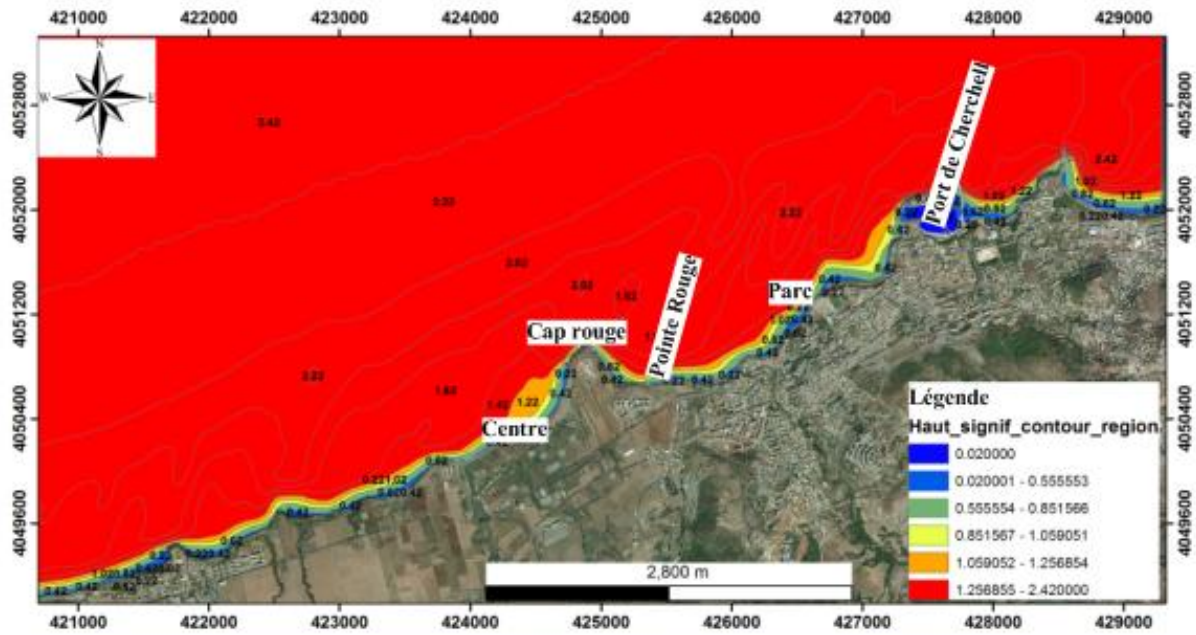


Figure 94 : Hauteurs significatives des houles à la côte dans la partie Ouest de Cherchell (45°NE) [LEM, 2016].

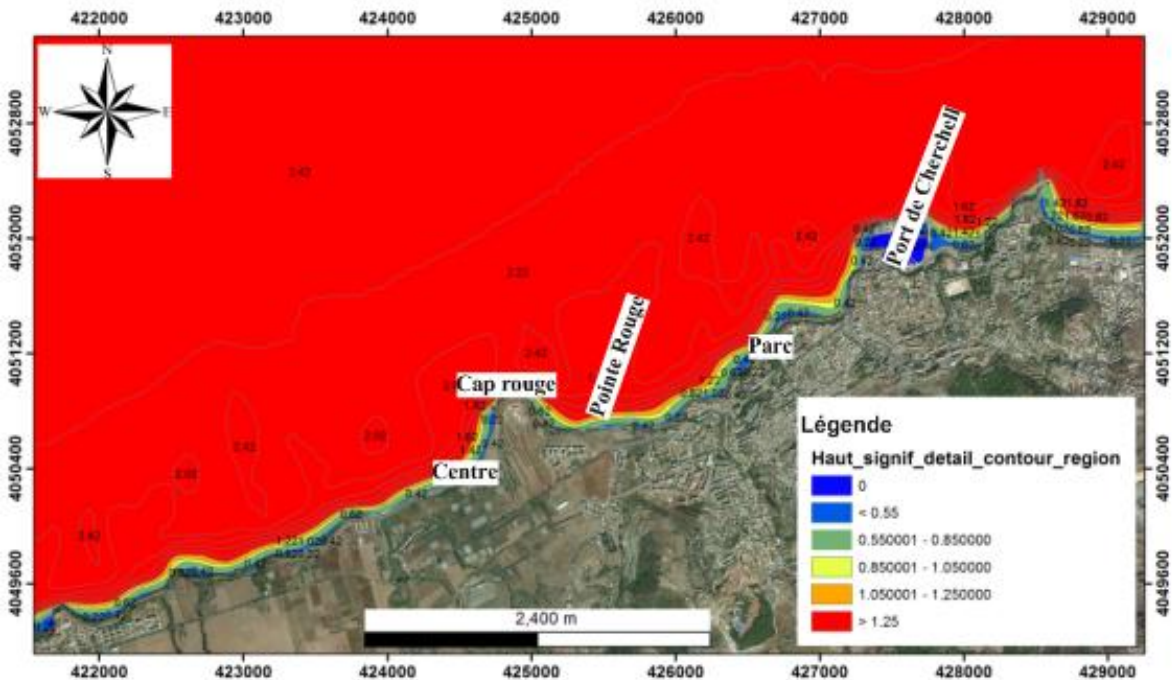
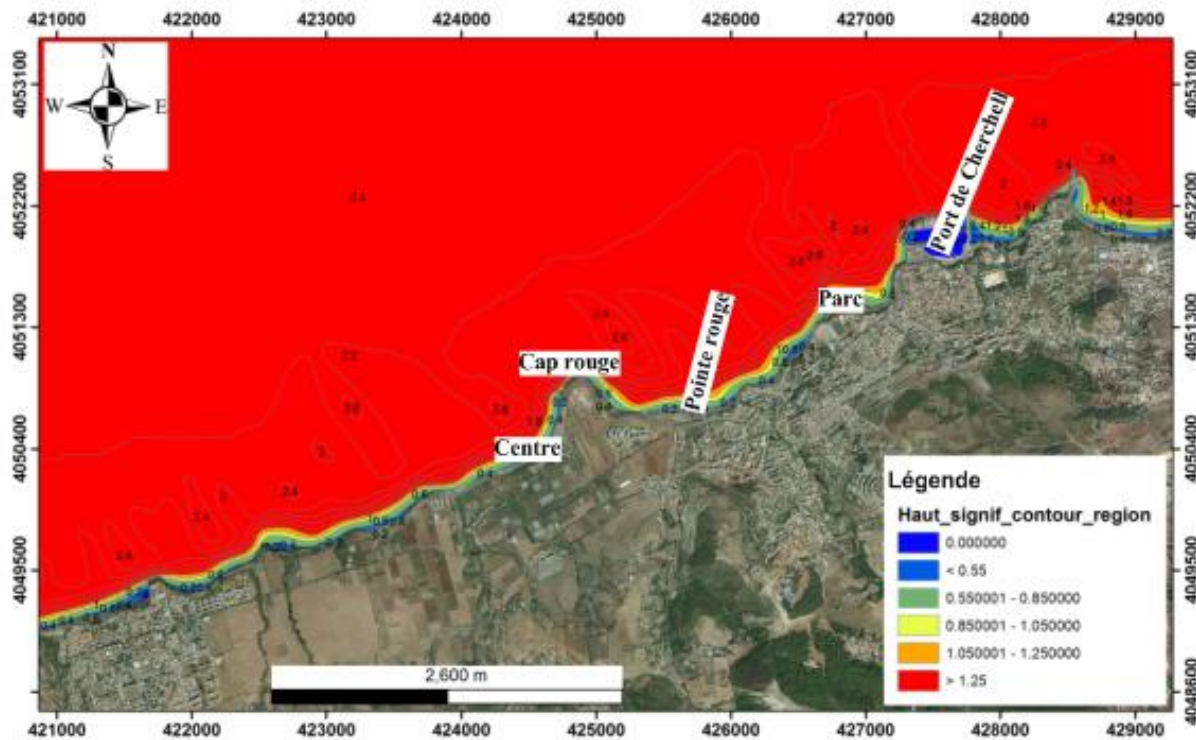


Figure 95 : Hauteurs significatives des houles à la côte dans la partie Ouest de Cherchell (360°N) [LEM, 2016].



**Figure 96 :** Hauteurs significatives des houles à la côte dans la partie Ouest de Cherchell (315°NW) [LEM, 2016].

### c) Variable amplitude moyenne de la marée

Les zones macro-tidales sont moins vulnérables que celles qui ont un régime micro-tidal [Dwarakish et al., 2008; Gaki Papanastassiou et al., 2010]. En effet, il y'a une grande probabilité que de fortes vagues coïncident avec la marée haute et provoquent donc une érosion forte et une submersion marine due à un estran étroit [Dwarakish et al., 2008; Dwarakish et al., 2009; Gorokhovich et al., 2013; Joevivek et al., 2013]. En outre, une haute amplitude des marées est généralement associée à un large estran dans lequel l'énergie des vagues peut être dissipée [Gornitz, 1991]. Dans cette étude, les zones côtières à faible marée (< 1 m) sont considérées comme très vulnérables, par contre les zones côtières à forte marée (> 6 m) sont considérées comme peu vulnérables (Tableau 5). La marée moyenne sur la côte algérienne est de 34 cm.

## **1.2. Indice de vulnérabilité socio-économique**

### **1.2.1. Méthodologie**

Les zones côtières sont densément peuplées et très productives [McGranahan *et al.*, 2007; Small *et Nicholls*, 2003]. Ces zones sont très convoitées par diverses activités économiques : industrielles, commerciales, agricoles et touristiques. Le développement incontrôlé et l'urbanisation anarchique rendent ces milieux dégradables. L'évaluation de la vulnérabilité des composantes socio-économiques est une nécessité pour estimer leur degré de sensibilité pour les protéger [Gornitz, 1993]. La majorité des études de vulnérabilité des côtes porte sur l'aspect physique. Plusieurs auteurs ont admis que l'inclusion de l'aspect socio-économique dans l'évaluation de la vulnérabilité améliore la qualité d'étude et identifiait les zones côtières les plus vulnérables [Djouder, 2018; Felsenstein *et Lichter*, 2014; McLaughlin *et Cooper*, 2010; McLaughlin *et al.*, 2002].

La méthode de l'évaluation de la vulnérabilité socio-économique d'une côte développée pour la première fois par McLaughlin *et al.*, [2002] et améliorée par McLaughlin *and Cooper*, [2010]. Généralement l'étude de vulnérabilité socio-économique d'une côte, nécessite six variables : ces variables sont ; les agglomérations, le réseau routier, les chemins de fers, occupation des sols, le patrimoine culturel, statuts de protection [McLaughlin *et Cooper*, 2010; McLaughlin *et al.*, 2002]. D'après la communauté scientifique et les décideurs, ces variables sont des composantes essentielles des régions côtières mondiales. C'est la raison de les utiliser pour évaluer la vulnérabilité socio-économique de la côte de Cherchell.

Chaque variable socioéconomique est classée sur une échelle de 1 à 5 en fonction de leur degré de vulnérabilité à l'érosion côtière et aux submersions marines. La valeur 1 correspond à un risque très faible alors que la valeur 5 correspond à un risque très élevé (Tableau 7). De ce fait les segments côtiers les plus vulnérables sont ceux qui contiennent des tissus urbains importants, un réseau routier développé, des sites historiques et culturels. Les moins vulnérables correspondent, à des zones libres de toute intervention humaine.

**Tableau 7** : représentation des variables retenues pour le calcul du IVC socioéconomique [McLaughlin et al., 2002; McLaughlin and Cooper, 2010].

Variable	Très faible 1	Faible 2	Modérée 3	Élevée 4	Très élevée 5
Agglomération	Absente	Village	Petite ville	Ville	Grande ville
Réseau routier	Absent		Route		Autoroute
Chemin de fer	Absent				Présent
Occupation du sol	Plans d'eau, espace vert, roches nues	Prairie naturel	Forêt	Activité agricole	Zone urbaine, d'infrastructure et industrielle
Héritage culturel	Absent				Présent
Statut de protection	Absent		International		National

Les six variables utilisées ont été combinées pour calculer l'indice de vulnérabilité socio-économique. Le calcul de cet indice est le même que celui de la vulnérabilité physique.

### 1.2.2. Constitution de la base de données

#### a) Variable agglomération

Une cote densément peuplée a une valeur économique importante [Hughes et al., 1992]. Ainsi un centre urbain est plus peuplé qu'un village et son impact dans le développement de la zone est plus important, donc plus vulnérable. Les données utilisées proviennent des plans d'aménagement côtier de la wilaya de Tipaza [PAC in DGPC, 2017], ainsi qu'une image Google earth 2019 (Fig.97).

#### b) Variable réseau routier et chemin de fer

Ce sont les facteurs clés de développement social et économique des zones côtières. Ils permettent la circulation des populations et le transport des marchandises. Les zones côtières à réseaux de circulation développés sont plus vulnérables, car l'endommagement de ces derniers par l'érosion ou submersion, engendre des pertes économiques et commerciales importantes [McLaughlin et Cooper, 2010] (Fig.97).

#### c) Variable occupation de sol

L'occupation de la côte détermine son importance économique et influence sa vulnérabilité. Les zones urbanisées et industrialisées sont considérées très vulnérables, alors que les zones naturelles (roches nues, plages et cours d'eau) sont moins vulnérables [McLaughlin et Cooper, 2010].

Pour bien mener cette étude, les variables (agglomération, route, chemin de fer, occupation des sols) sont extraites des plans d'aménagement côtier de la wilaya de Tipaza [*PAC in DGPC, 2017*] et par la digitalisation d'une image de Google earth 2019 (Fig.97).

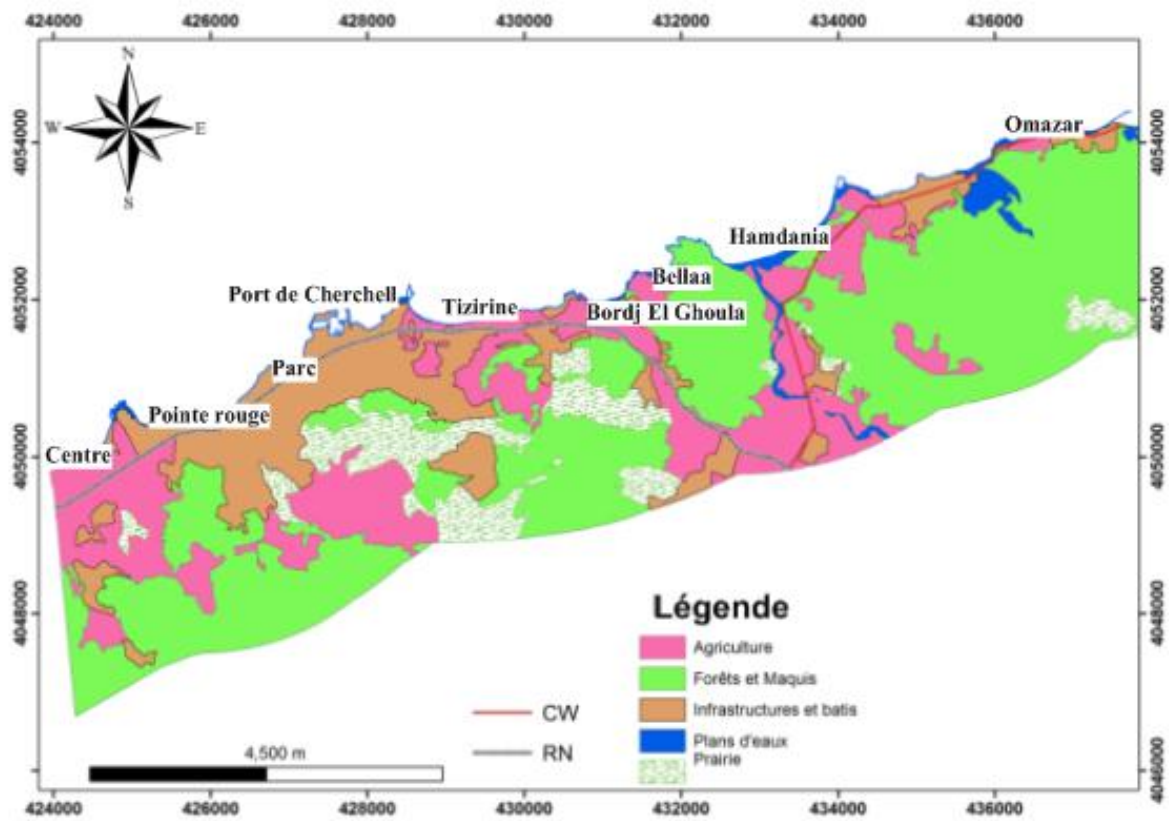
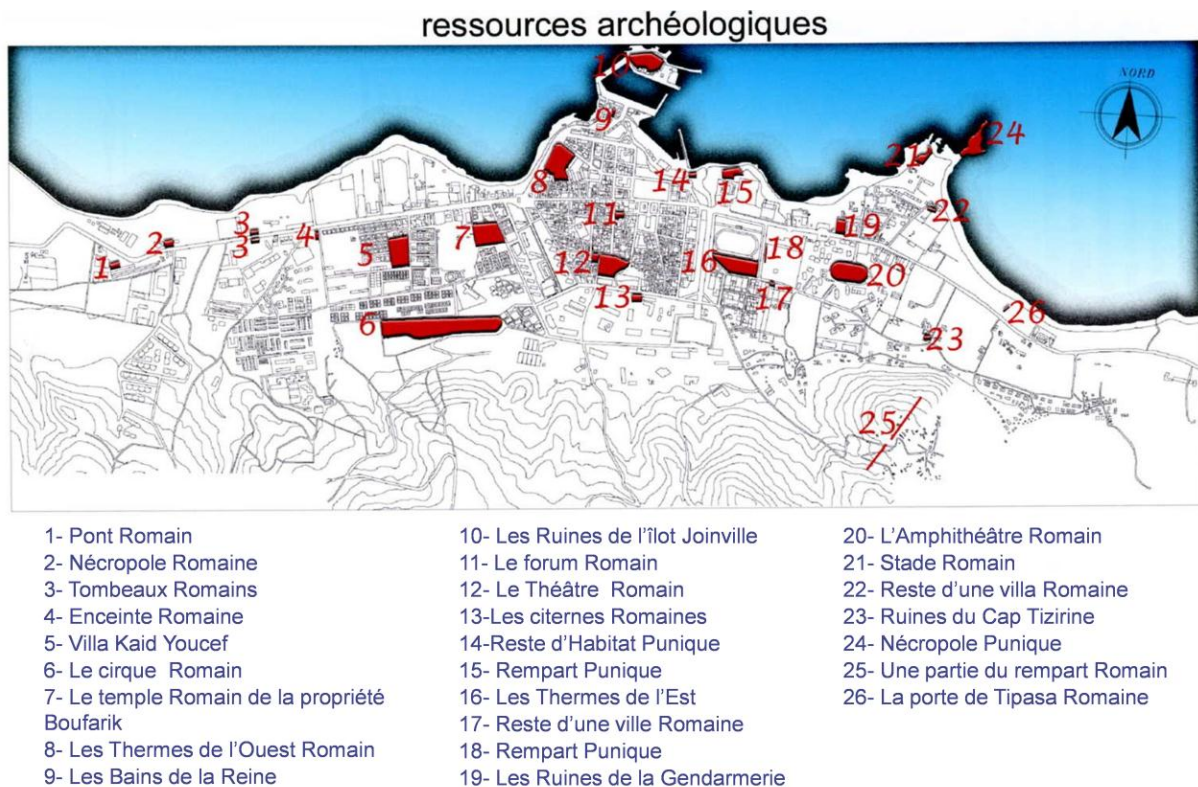


Figure 97 : Occupation des sols de la région de Cherchell (image Google earth, 2019).

#### d) Variable patrimoine culturel

Le patrimoine culturel concerne les monuments historiques et les sites archéologiques localisés dans la région. Ces vestiges sont de grandes valeurs touristiques, sociales et culturelles. Sa présence indique que le segment côtier est très vulnérable et leur absence indique que le segment côtier n'est pas vulnérable [McLaughlin et Cooper, 2010]. Cette variable a été identifiée par des observations sur le terrain (Fig.98, 99).



**Figure 98** : Localisation des sites historique et archéologique dans la ville de Cherchell [PAC in DGPC, 2017].



**Figure 99** : Exemples de quelques sites historiques de la région de Cherchell [*PAC in DGPC, 2016*].

**e) Variable statut de protection**

Le statut de protection concerne les zones côtières importantes du point de vue environnemental et écologique. Ces zones sont délimitées et protégées par des législations nationales ou internationales. Les zones côtières à désignation nationale sont considérées plus vulnérables, alors que les zones côtières à désignation internationale comme peu vulnérable [*McLaughlin et Cooper, 2010*].

## 2. Résultats

### 2.1. Indice de vulnérabilité physique

#### 2.1.1. Aspects biophysiques

Cette réponse est différente d'un segment côtier à un autre. Les indices de vulnérabilité élevés appartiennent aux côtes basses, composées de matériaux friables et soumis à une forte énergie des vagues et à une érosion importante des berges [Gornitz *et al.*, 1994]. En effet, sur le littoral de Cherchell, les six variables physiques participent à la détermination du degré de vulnérabilité. L'influence de chaque paramètre est comme suivie (Tableau 8).

**Tableau 8** : Valeurs attribuées à l'ensemble des cellules et des six indices influentes la vulnérabilité physique de la côte de Cherchell

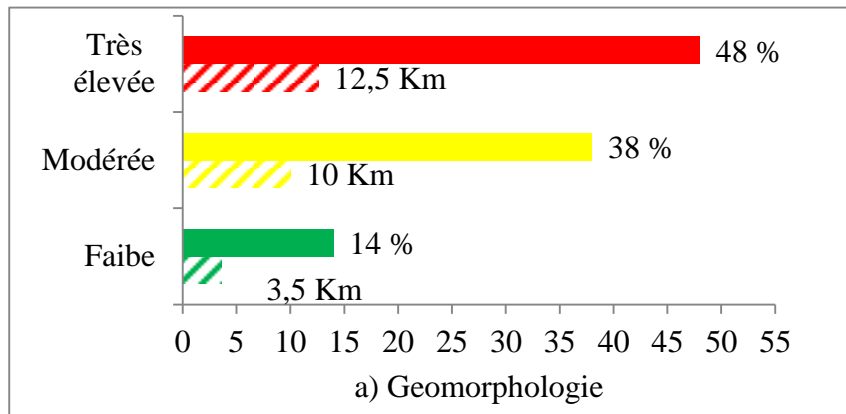
N° de la cellule	Géomorphologie	Pente de la côte	Erosion/accrétion des rives	Élévation moyenne de niveau de la mer	Houle a la côte	La marrée
1	3	2	3	3	1	5
2	5	2	3	3	1	5
3	3	2	3	3	1	5
4	3	2	3	3	1	5
5	3	2	3	3	1	5
6	3	3	3	3	1	5
7	3	3	3	3	1	5
8	5	5	4	3	1	5
9	5	5	4	3	1	5
10	5	5	4	3	1	5
11	5	5	4	3	1	5
12	3	2	3	3	1	5
13	5	3	3	3	1	5
14	3	3	3	3	1	5
15	5	5	3	3	1	5
16	3	3	3	3	1	5
17	5	3	3	3	1	5
18	5	4	3	3	1	5
19	5	4	3	3	1	5
20	3	3	3	3	1	5
21	3	3	3	3	1	5
22	2	5	3	3	1	5
23	2	5	3	3	1	5
24	5	4	3	3	1	5
25	5	4	3	3	1	5
26	2	4	3	3	1	5
27	2	2	3	3	1	5
28	5	3	3	3	1	5
29	5	3	3	3	1	5

### 2.1.1.1.      Variable géomorphologique

La géomorphologie, comme variable non numérique, indique le niveau relatif de dégradation naturelle des reliefs côtiers. Le faciès géomorphologique du littoral de Cherchell à l'exception du port de Cherchell, est dominé par deux formes de reliefs : l'une friable et l'autre rocheuse. D'après (Fig.100, 101), près de la moitié du littoral de Cherchell (48% soit 12,5 km) contenant des côtes rocheuses présentent une vulnérabilité modérée. En revanche plus d'un tiers (38% soit 10 km) couvre les plages sablonneuses présentent une vulnérabilité très élevée. Tandis qu'une faible partie du littoral (14% soit 3,5 km) présente des falaises, rentre dans la classe de faible vulnérabilité.



Figure 100 : Vulnérabilité de la variable géomorphologie sur le littoral de Cherchell.



**Figure 101 :** Classification de la variable géomorphologie sur le littoral de Cherchell (longueur et pourcentage relatifs) selon les différentes classes de vulnérabilité physique.

### 2.1.1.2. Variable pente côtière

Parmi les variables considérées, la pente côtière est un indicateur principal du risque de submersion et de dégradation naturelle des reliefs côtiers. Les résultats obtenus par la cartographie de cette variable montrent que près d'un quart (24,2% soit 6,3 km) du littoral de Cherchell représente une vulnérabilité faible, avec des pentes côtières comprises entre 9 et 12%, le long des hautes falaises. Plus d'un tiers (34,5% soit 9 km) de ce dernier possède une vulnérabilité modérée, avec des pentes côtières comprises entre 6 et 9% au niveau des falaises basses. En revanche 17,2% du littoral (soit 4,5 km), exposé à une vulnérabilité élevée avec des pentes variées entre 3 et 6% au niveau des côtes rocheuses, tandis que près d'un quart 24,1% (6,2 km) du littoral présente une vulnérabilité très élevée avec des pentes < 3%, le long des plages sableuses (Fig.102, 103).



Figure 102 : Vulnérabilité de la variable pente côtière sur le littoral de Cherchell.

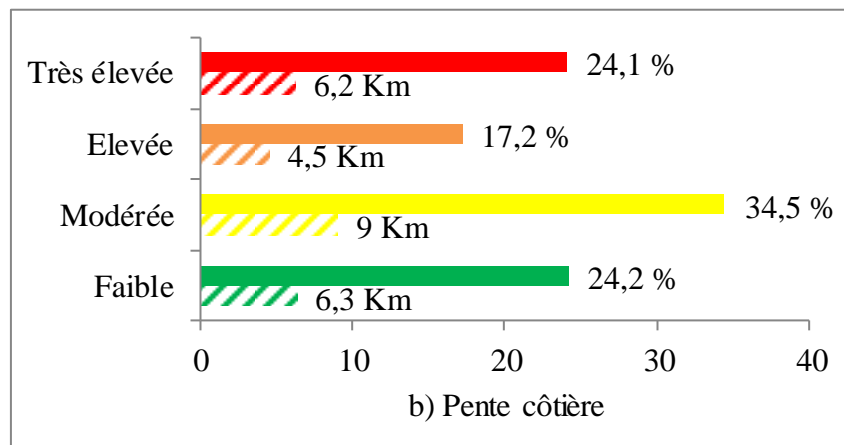


Figure 103 : Classification de la variable pente côtière sur le littoral de Cherchell (longueur et pourcentage relatifs) selon les différentes classes de vulnérabilité physique.

### 2.1.1.3. Variable taux d'érosion/accrétions des rives

Les résultats obtenus pour l'évolution du trait de côte, révèlent que 93% (24,2 km) des plages étudiées (Hamdania, Tizirine et Centre) présentent une vulnérabilité modérée, avec une alternance entre érosion et accrétion, avec des taux variant entre + 0,85 m/an et -1 m/an. En revanche 7% (1,8 km) de côtes présentent une vulnérabilité élevée, avec un taux d'évolution oscillant entre -1 et -1,45 m/an le long de la plage Hamdania (Fig.104, 105).

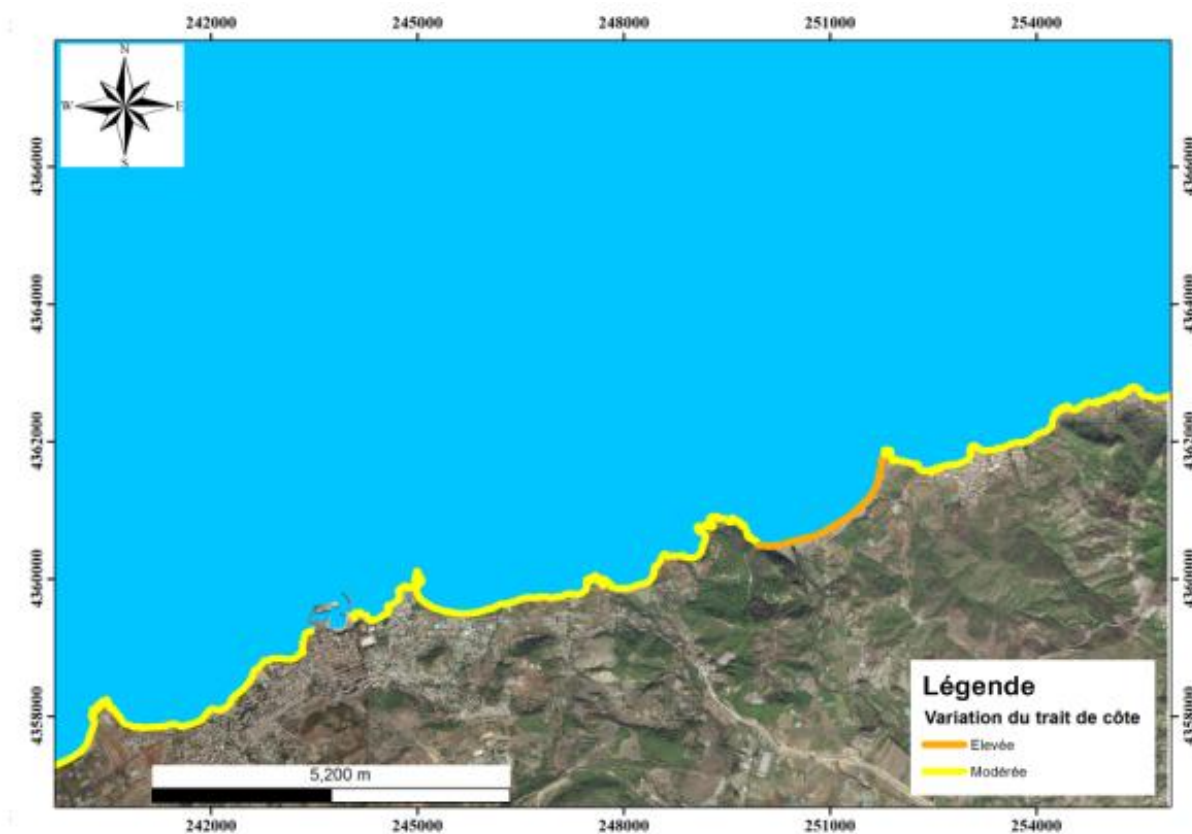


Figure 104 : Vulnérabilité de la variable érosion/accrétion sur le littoral de Cherchell.

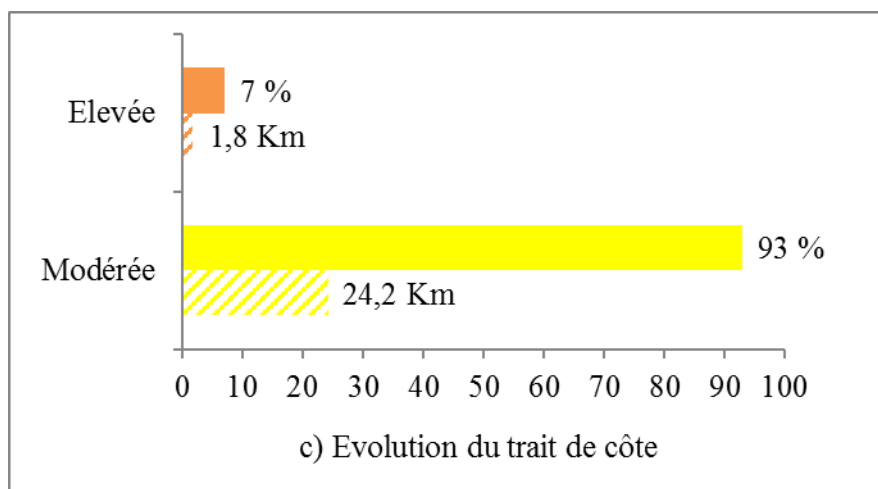
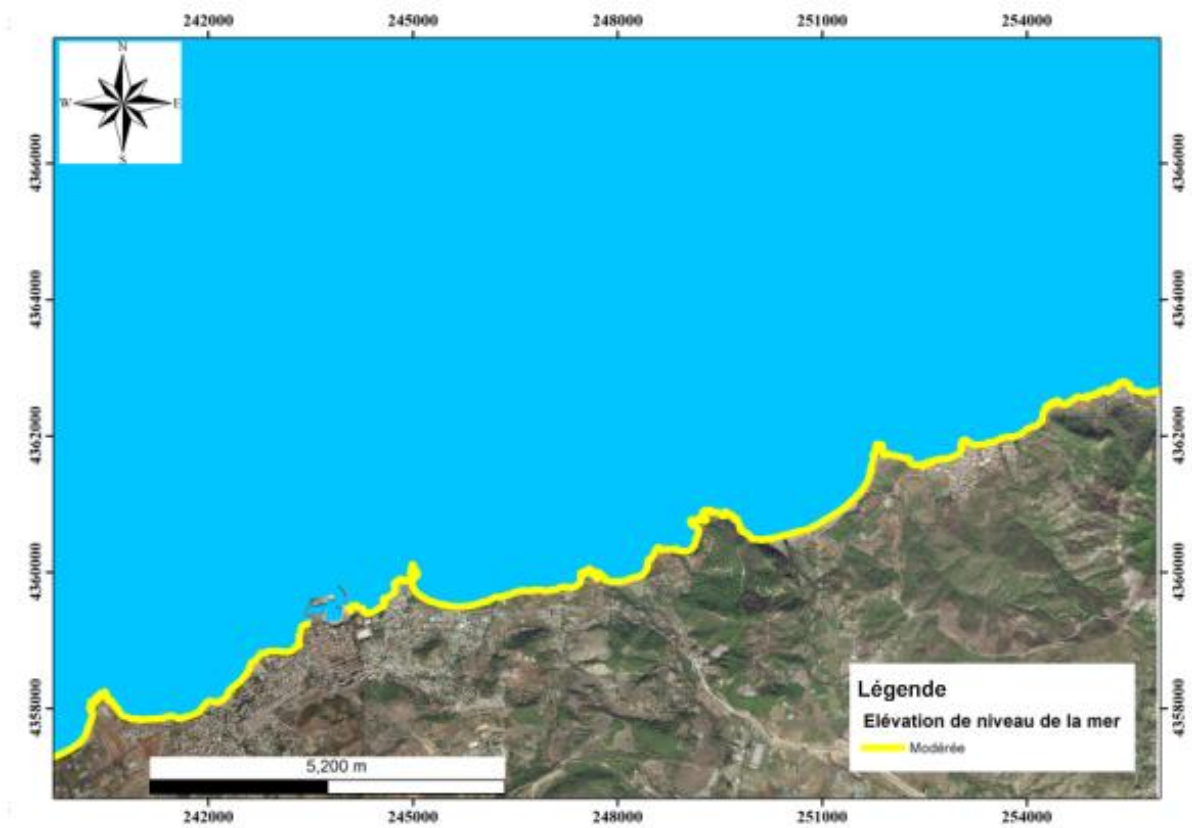


Figure 105 : Classification de la variable érosion/accrétion sur le littoral de Cherchell (longueur et pourcentage relatifs) selon les différentes classes de vulnérabilité physique.

#### 2.1.1.4. Taux d'élévation du niveau de la mer

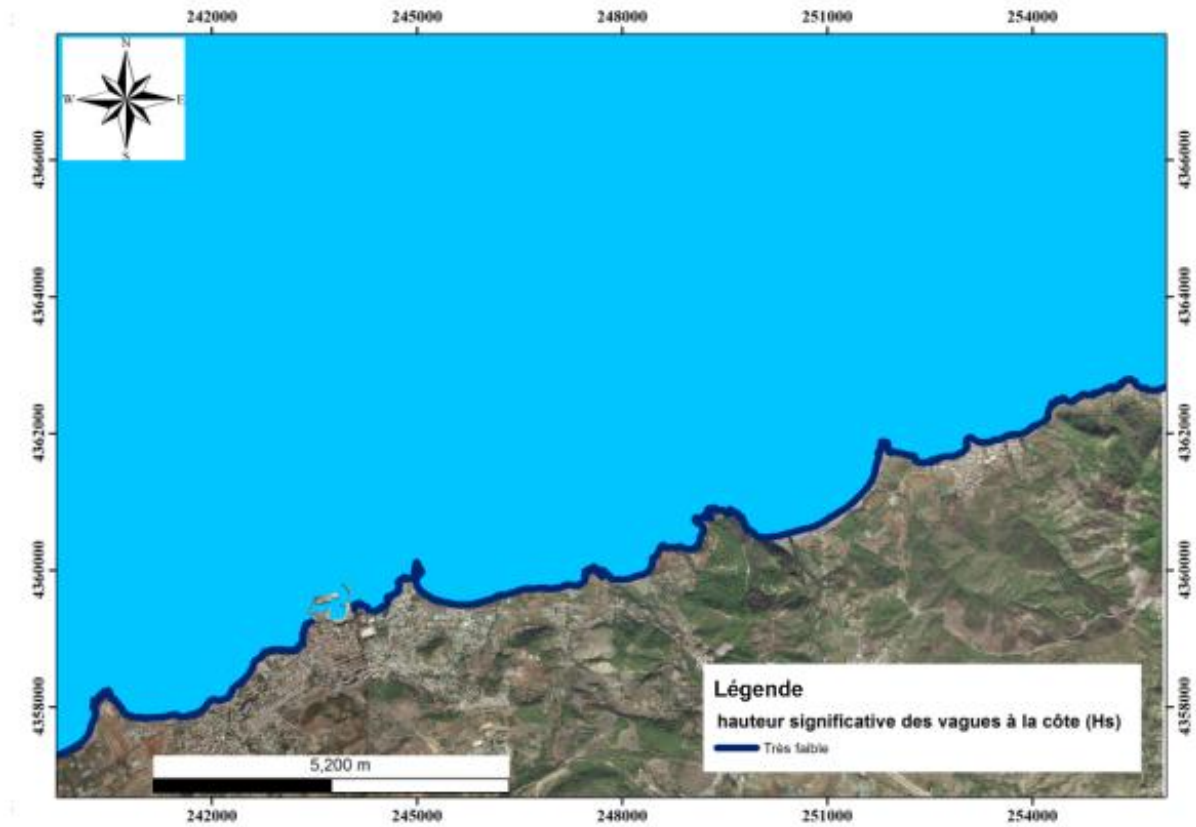
D'après les mesures effectuées par les satellites Topex/Poséidon et Jason 1, la côte de Cherchell a révélé un taux d'élévation de niveau de la mer de 2,5 mm/an pendant la période 1993-2006 (Fig.106). La vulnérabilité relative à cette élévation eustatique sur la côte de Cherchell est modérée.



**Figure 106 :** Vulnérabilité de la variable élévation de niveau de la mer sur le littoral de Cherchell.

### 2.1.1.5. Hauteurs significatives des vagues

Les résultats obtenus par la simulation numérique des houles, révèlent que les valeurs des houles significatives sur la côte de Cherchell sont  $< 0,55$  m. En conséquence, l'ensemble du littoral est dans la classe de très faible vulnérabilité (Fig.107).



**Figure 107 :** Vulnérabilité de la variable hauteur significative des vagues à la côte sur le littoral de Cherchell.

### 2.1.1.6.      La marée

La marée sur la côte algérienne est semblable à toutes les côtes Méditerranéennes, très faible. L'amplitude des marées le long des côtes algériennes est de  $\pm 34$  cm par rapport au niveau général de la mer. Sur la base de ces résultats, la côte de Cherchell est micro-tidale et présente une vulnérabilité très élevée (Fig.108).

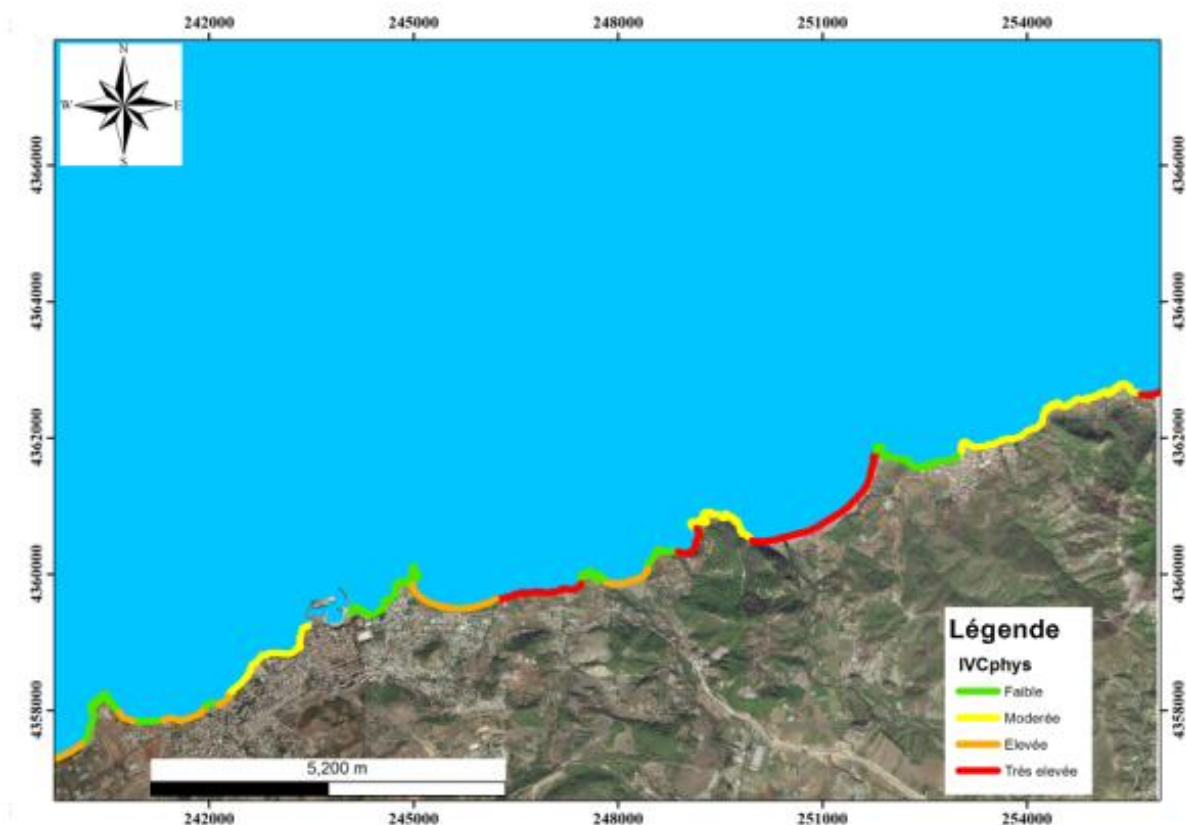


Figure 108 : Vulnérabilité de la variable marée sur le littoral de Cherchell.

### 2.1.2. Indice de vulnérabilité physique de la côte de Cherchell

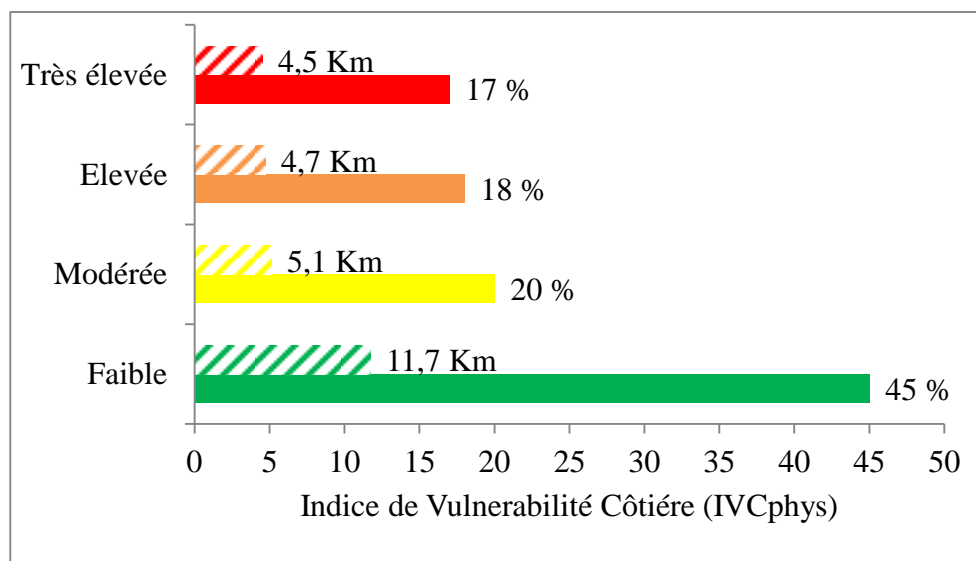
La combinaison des six paramètres a permis de déterminer l'indice de vulnérabilité côtière selon la formule de [Gornitz *et al.*, 1994; Thieler *et Hammar-Klose*, 1999]. Il révèle une vue d'ensemble sur les régions possibles d'être affectées par les changements physiques, et par la suite exposées à une érosion côtière et aux submersions.

Les valeurs de cet indice varient entre 5,47 et 15,81 avec une médiane de 8,66. Les quatre niveaux de vulnérabilité côtière sont obtenus grâce à un traitement statistique des données des IVC. Ainsi, les quartiles 25%, 50% et 75% ont été identifiés pour la détermination des quatre niveaux de vulnérabilités côtière (vulnérabilité faible, modérée, élevée et très élevée). Les valeurs des IVC relatives aux vulnérabilités faible, modérée, élevée et très élevée sont respectivement comme suit : entre 5,47 et 8,21 entre 8,21 et 8,66, entre 8,66 et 12,24 et entre 12,24 et 15,81 (Fig.109).



**Figure 109 :** Indice de vulnérabilité côtier (IVCphys) pour le littoral de Cherchell.

Les résultats obtenus sur l’histogramme suivant (Fig.110), révèlent que près de deux tiers (65%) du littoral de Cherchell présentent une vulnérabilité faible à modérée au niveau des falaises et des côtes rocheuses sur un linéaire de 16,8 km, et un tiers (35%) de ce littoral présente une vulnérabilité élevée à très élevée ou les effets physiques d’érosion et de submersion pourraient être les plus importantes au niveau des accumulations sableuses sur un linéaire côtier de 9,2 km.



**Figure 110 :** Pourcentage du littoral de Cherchell pour chaque degré de vulnérabilité physique.

Sur les 27 km du littoral étudié, près de la moitié (45%) du littoral possède une vulnérabilité faible au risque d’érosion et de submersion par rapport aux caractéristiques physiques de la côte (soit 11,7 km) et se caractérise par des falaises dures et parfois tendres avec une hauteur qui varie de 10 à 40 m. Ces falaises sont d’Est en Ouest : Cap des trois îlots, Pointe Riadh, Cap Tizirine, falaise de Cherchell, et la falaise de Cap Rouge.

Une partie du littoral, (20%) se caractérise par une vulnérabilité modérée au risque d’érosion et de submersion marine par rapport aux caractéristiques physique de la côte (soit 5,1 km) et se caractérise par des côtes rocheuses relativement basses avec une hauteur qui ne dépasse pas 7 m. Cette vulnérabilité est causée par la structure morphologique et la pente modérée qui varie de 6 à 9%. Ces zones sont d’Est en Ouest : côte rocheuse d’Oumazar, Cap blanc, et la côte rocheuse de Chechell.

Une part du littoral de Cherchell, (18%) est exposée à une vulnérabilité élevée aux risques d’érosion et de submersion marine par rapport aux caractéristiques physiques de la côte (soit

4,7 km) et se caractérise par des plages sableuses avec un faible taux d'accumulation. Ces plages sont d'Est en Ouest : Bourdj El Ghoula, la partie Ouest de la plage Tizirine, Parc, Pointe Rouge, et la plage Centre.

Une partie du littoral de Cherchell, (17%) est exposée à une vulnérabilité très élevée aux risques d'érosion et de submersion (soit 4,5 km) par rapport aux caractéristiques physiques de la côte et se caractérise par des plages sableuses à matériaux friable et à pente faible et se localisent d'Est en Ouest à la plage d'Oumazar, Hamdania, Bellaa et la partie Est de la plage Tizirine.

## **2.2. Vulnérabilité socioéconomique**

### **2.2.1. Variables socio-économiques**

Les indices de vulnérabilité élevés appartiennent aux grande villes a réseaux routiers et chemin de fer dense à héritage culturel important par contre les indices de vulnérabilité faible appartiennes aux zones dépourvues de toute installations humaine [McLaughlin et Cooper, 2010]. En effet, sur le littoral de Cherchell, les six variables socio-économiques participent à la détermination du degré de vulnérabilité. L'influence de chaque paramètre est comme suit (tableau 9).

**Tableau 9** : Valeurs attribuées à l'ensemble des cellules et des six indices influants la vulnérabilité socio-économique de la côte de Cherchell

N° de la cellule	Agglomération	Réseau routier	Chemin de Fer	Occupation du sol	Héritage culturel	Statut de protection
1	1	1	1	4	1	1
2	5	1	1	5	1	1
3	5	1	1	1	1	1
4	5	5	1	5	1	1
5	5	5	1	5	1	1
6	5	5	1	5	5	1
7	5	5	1	5	5	1
8	5	5	1	5	5	1
9	5	5	1	5	5	1
10	5	1	1	5	5	1
11	5	5	1	4	1	1
12	3	5	1	4	1	1
13	2	5	1	4	5	1
14	2	1	1	5	1	1
15	1	1	1	4	1	1
16	2	1	1	4	1	1

17	1	1	1	3	1	1
18	1	1	1	1	1	1
19	1	1	1	1	1	1
20	1	1	1	1	1	1
21	1	3	1	1	1	1
22	1	1	1	1	5	1
23	2	3	1	5	1	1
24	3	3	1	5	1	1
25	1	3	1	1	1	1
26	2	3	1	4	1	1
27	3	3	1	5	1	1
28	3	3	1	5	1	1
29	3	3	1	5	1	1

### 2.2.1.1. Agglomérations

La ville de la région de Cherchell se situe dans la partie Ouest près du port de Cherchell. C'est une zone où les échanges économiques sont importants, et qui ont ainsi été le siège de plusieurs civilisations (romaine, antique et coloniale). En allant vers l'Est, les agglomérations deviennent moins importantes, tels que les quartiers Tizirine et Bellaa, et les agglomérations secondaire de Hamdania et d'Oumazar dans l'extrémité Est du site d'étude (Fig.111).

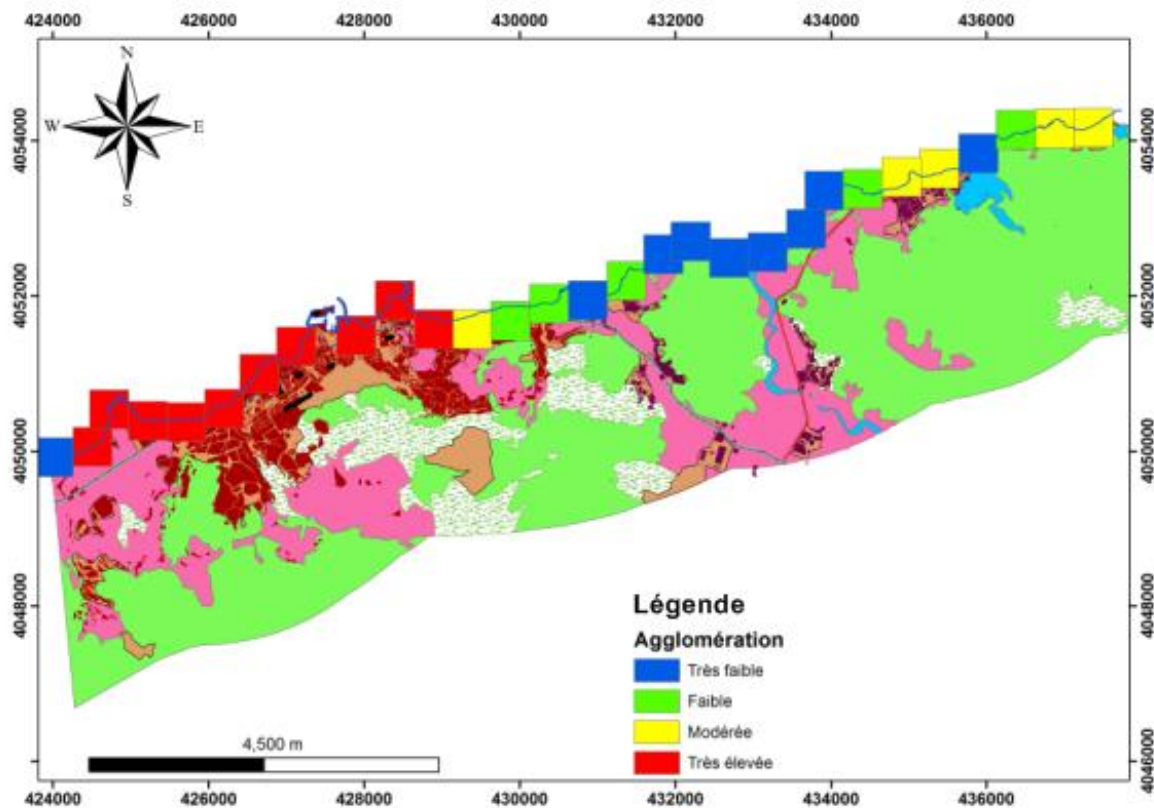


Figure 111 : Vulnérabilité de la variable agglomération sur le littoral de Cherchell.

### 2.2.1.2. Réseau routier

Deux types de réseaux routiers dominant à Cherchell, un chemin de wilaya à l'Est à vulnérabilité modérée, une autoroute à l'Ouest à vulnérabilité très élevée. Par contre, aucun réseau routier n'est marqué au centre dû à la vulnérabilité très faible de ce segment de côte (Fig.112).

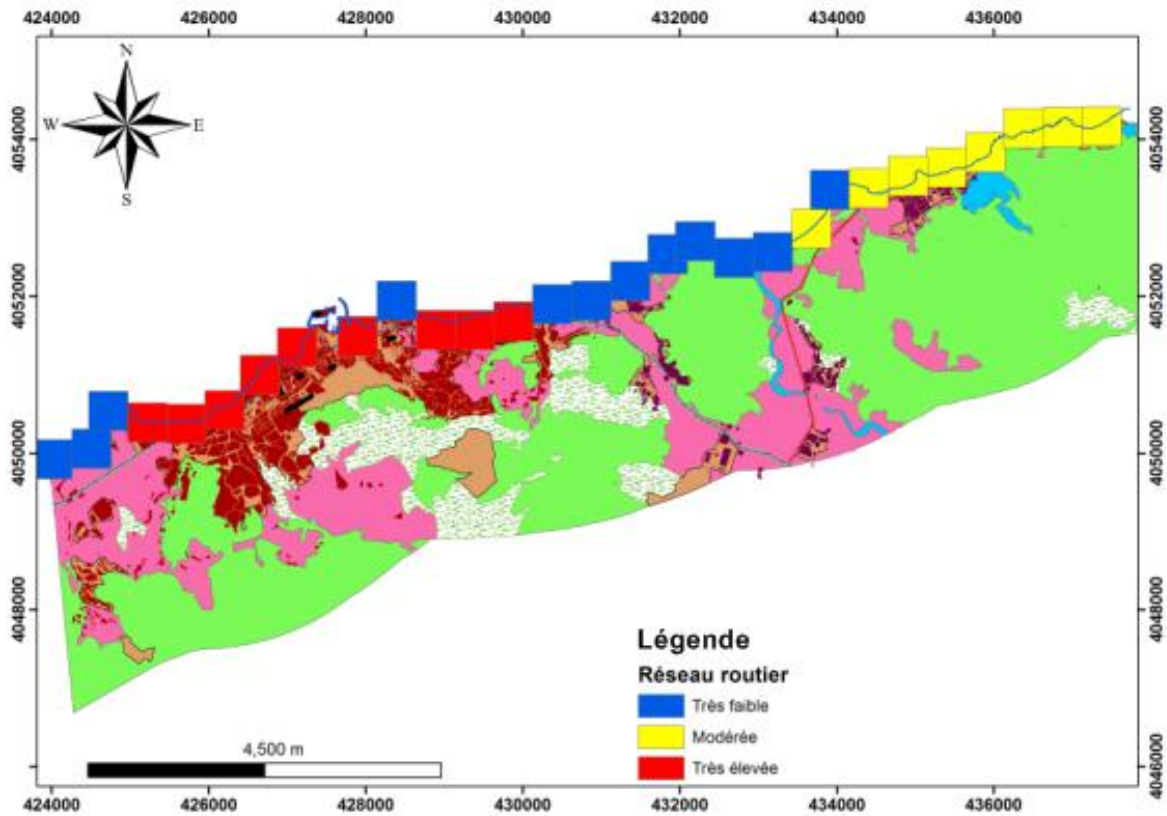
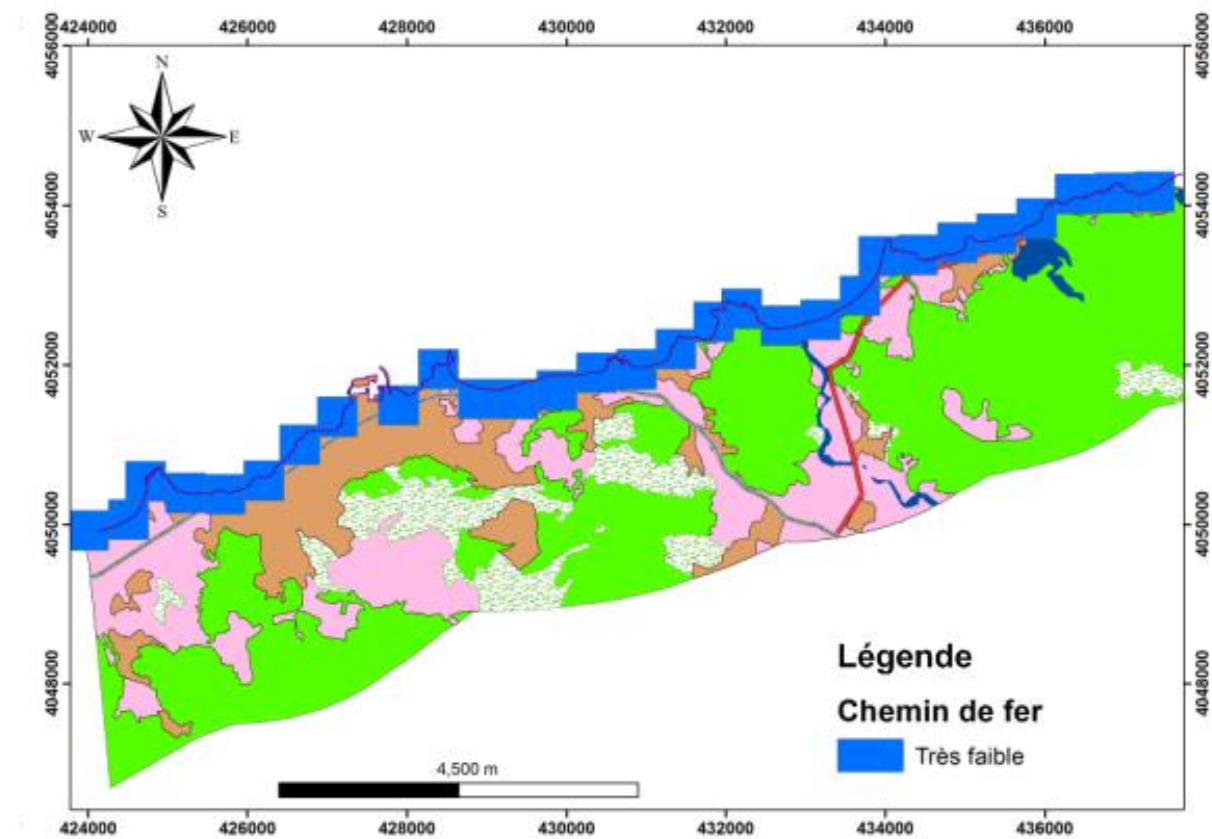


Figure 112 : Vulnérabilité de la variable réseau routier sur le littoral de Cherchell.

### 2.2.1.3.      Chemin de fer

Jusqu'à présent, la côte de Cherchell est dépourvue de chemin de fer, et la valeur de vulnérabilité à attribuer à cette variable est très faible (Fig.113).



**Figure 113 :** Vulnérabilité du variable chemin de fer sur le littoral de Cherchell.

#### 2.2.1.4. Occupation des sols

La moitié du littoral de Cherchell possède une vulnérabilité très élevée, due à l'urbanisation importante de la région, tandis qu'un quart de la région possède une vulnérabilité élevée due aux activités agricoles, et que le dernier quart est dépourvu de toute activité humaine, est présenté par des plans d'eau, espaces verts, roches nues et parfois des forêts, la vulnérabilité de ces zones étant donc très faible à modérée. (Fig.114).

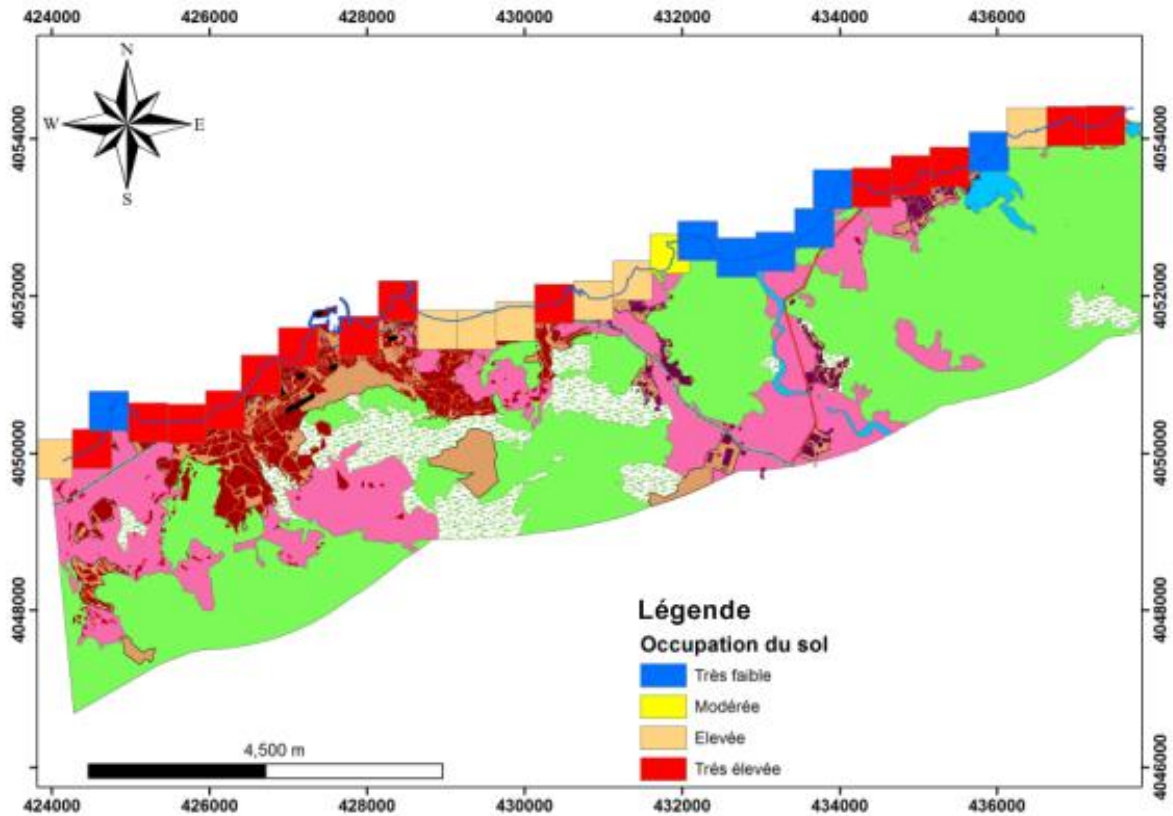


Figure 114 : Vulnérabilité de la variable occupation des sols sur le littoral de Cherchell.

### 2.2.1.5. Héritage culturel

L'héritage culturel est dominé dans la partie Ouest au niveau de la ville de Cherchell, le siège des civilisations romaine, antique et coloniale, à l'exception de quelques vestiges à l'Est dans la région de Hamdania. Ces vestiges sont placés parmi le patrimoine national, est donc sa cotation de vulnérabilité est très élevée. Le reste de littoral ne contient pas de vestiges historiques et donc son degré de vulnérabilité est très faible (Fig.115).

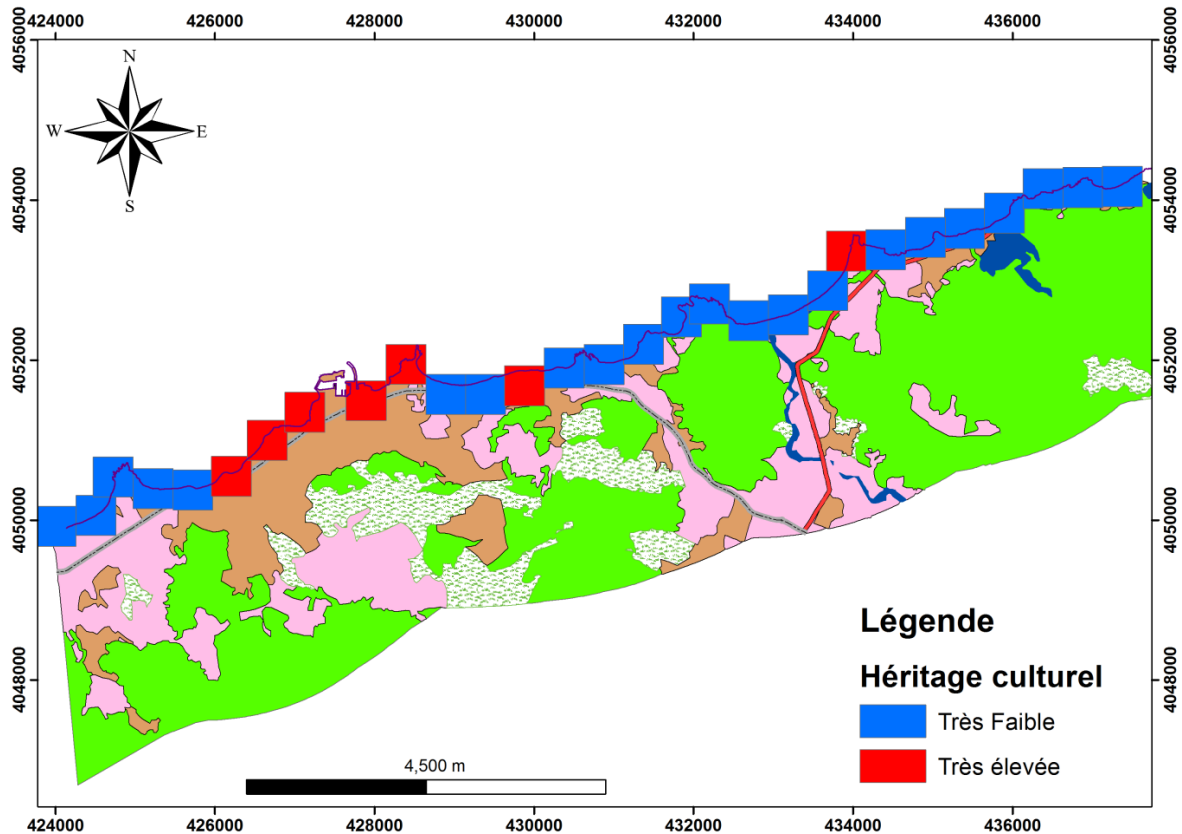
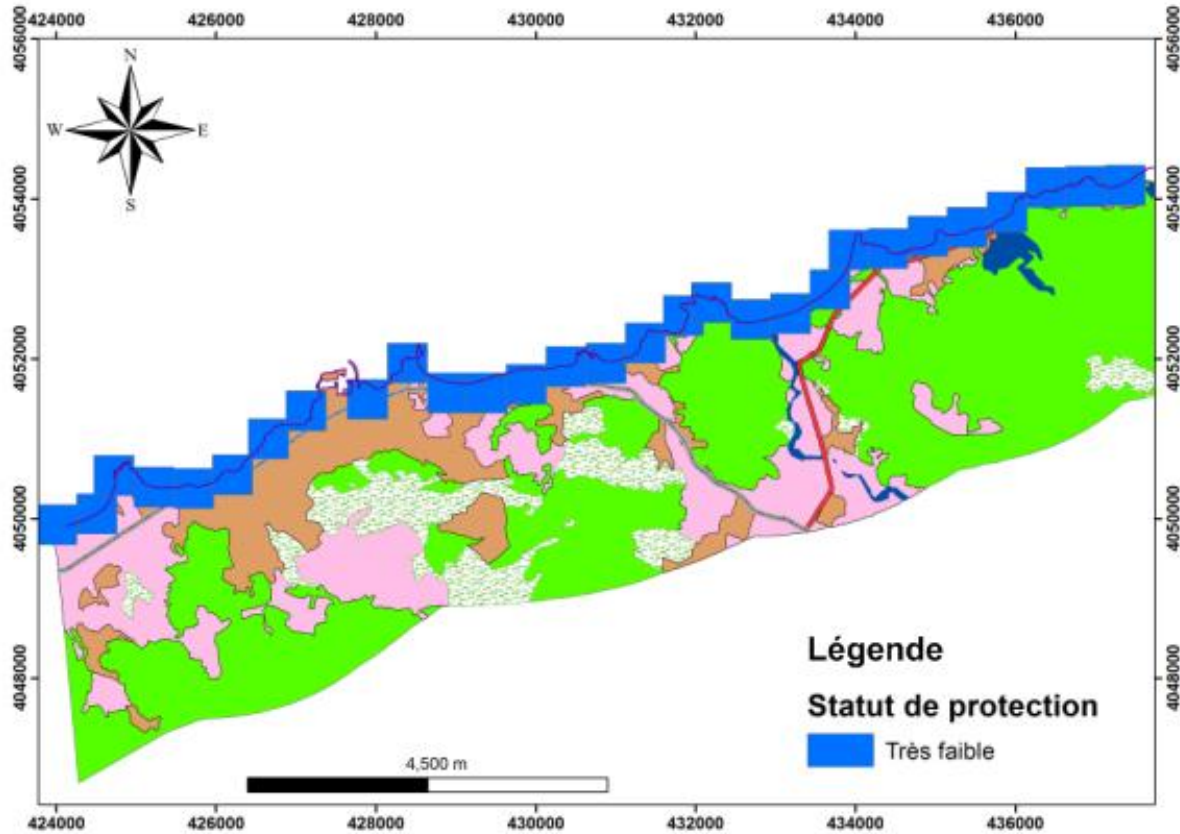


Figure 115 : Vulnérabilité de la variable héritage culturel sur le littoral de Cherchell.

### 2.2.1.6. Statut de protection

La région de Cherchell ne dispose pas de site de protection, la cotation de vulnérabilité attribuée à cette variable face à l'élévation de niveau de la mer est très faible (Fig.116).



**Figure 116 :** Vulnérabilité de la variable statue de protection sur le littoral de Cherchell.

### 2.2.2. Indice de vulnérabilité socio-économique IVCsocio-éco

Les valeurs obtenues par le calcul d'IVCsocio-eco de la côte de Cherchell vont de 0,41 et 10,21. On distingue quatre classes de vulnérabilité : faible, modérée, élevée et très élevée (Fig.117).

Ces résultats révèlent que 7,17 km de littoral de Cherchell présente une vulnérabilité socioéconomique faible aux risques d'érosion et de submersion, avec des valeurs d'IVCsocio-eco allant de 0,41 et 0,82 couvrant les plages Hamdania, Bellaa et Bordj El Ghoula.

6,27 km de littoral de Cherchell présente une vulnérabilité socioéconomique modérée aux risques d'érosion et de submersion, avec des valeurs d'IVCsocio-eco allant de 0,91 et 2,24, couvrant le cap des Trois îlots, Pointe El Riadh, Pointe Rouge et la plage Centre.

Un linéaire de 8,06 km du littoral de Cherchell présente une vulnérabilité socio-économique élevée aux risques d'érosion et de submersion, avec des valeurs d'IVCsocio-eco allant de 2,74 et 4,56 couvrant les quartiers d'Oumazar, Tizirine et Parc.

Un linéaire de 4,48 km du littoral de Cherchell présente une vulnérabilité socio-économique très élevée aux risques d'érosion et de submersion, avec des valeurs d'IVCsocio-eco allant de 5,77 à 10,21 couvrant la ville de Cherchell.

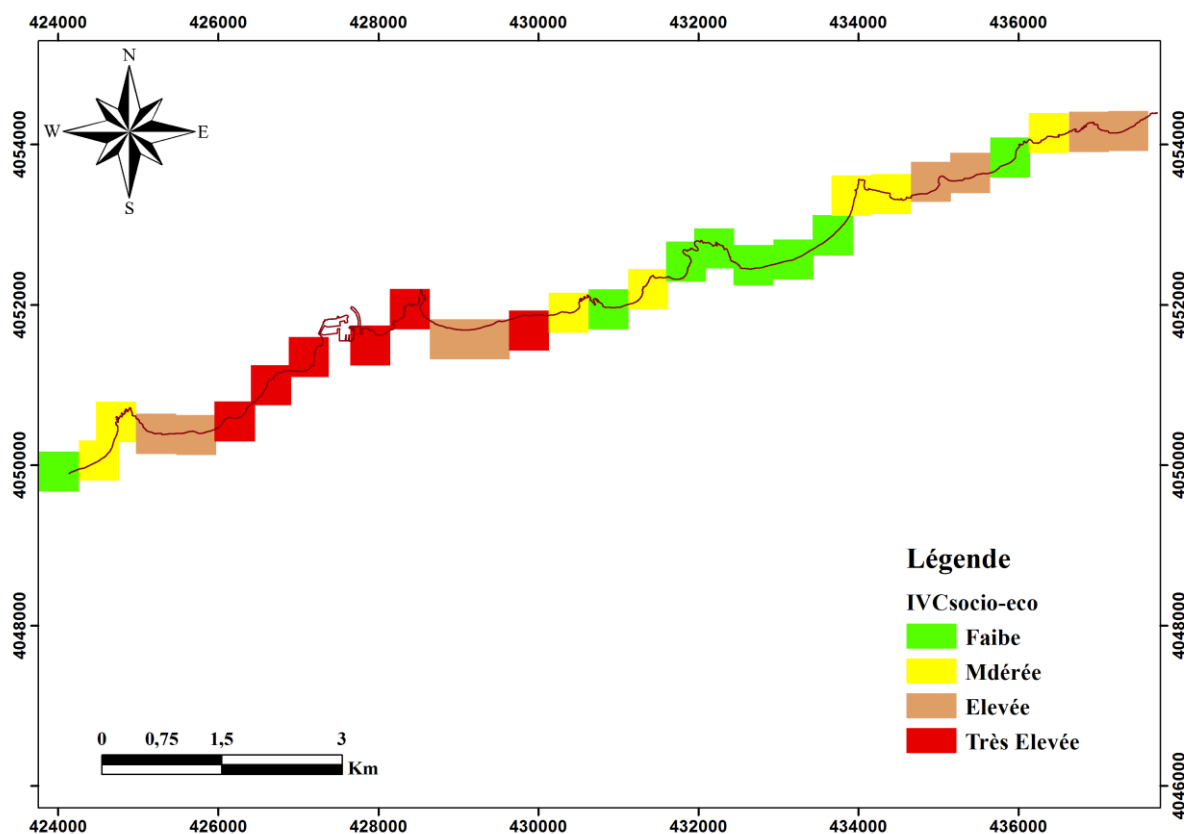


Figure 117 : Indice de vulnérabilité côtière (IVCsocio-éco) pour le littoral de Cherchell.

### 3. Discussion

L'évaluation de la vulnérabilité physique de la côte de Cherchell a permis de mettre en évidence à quelle mesure les différents segments de côte pourraient être affectée négativement par les risques d'érosion et de submersion. Elle a révélé une réalité plus ou moins inquiétante et confirmé le bon état de deux tiers de la côte qui résiste à ces risques, ses segments de côte ont été résumés par des falaises hautes et des côtes rocheuses dures. Le mauvais état concerne les côtes d'accumulation à faible pentes et géo-morphologiquement friables et qui sont déjà en érosion. Cette érosion revient aux installations humaines dans la région, ce qui a permis l'urbanisation de la région et le développement des activités économiques indispensables à la survie humaine. L'évaluation de la vulnérabilité de ses installations est indispensable, en particulier leurs sensibilités à l'érosion et à la submersion marine afin de cerner les zones les plus affecté pour une meilleure gestion de la côte (Fig.118).

L'évaluation de la vulnérabilité physique, révèle que 17% du littoral de Cherchell soit très vulnérable, 18% vulnérable, 20% modérément vulnérable, 45% peu vulnérable. La partie Est est plus vulnérable par rapport aux autres segments de la côte. La différence de vulnérabilité des segments côtiers du littoral de Cherchell est due aux variables géologiques, car elles confèrent une vulnérabilité spécifique à chaque segment de côte. Les secteurs de côte les plus vulnérables sont de faible pente, d'une géomorphologie presque plate et composée de matériaux friables (plages sableuses). Cette vulnérabilité élevée de la partie Est est conjuguée à l'érosion connue ces dernières années dans la région de Hamdania. Cette érosion s'explique par la diminution d'apports sédimentaires d'oued El Hachem due à la construction de barrages Boukerdene, sur son lit qui joue le rôle d'un piège à sédiments, ce qui a provoqué une crise sédimentaire pour la plage Hamdania en aval [*Tadrist et al., 2016*], ainsi que l'extraction de sable des plages et celui des lits d'oueds en réponse aux besoins de construction. Pour les côtes à falaises, la lithologie dure, la pente abrupte et l'altitude moyenne régionale élevée ont participé à l'atténuation des risques d'érosion et de submersion marine (Fig.118).

La submersion marines et l'érosion côtière ont des impacts directs sur les installations humaines et les activités économiques de la région, d'où la nécessité d'évaluer la vulnérabilité socio-économique. Six variables socio-économiques recommandées par la communauté scientifique ont été utilisées. Les résultats obtenus par l'évaluation de cet indice sur la côte de Cherchell révèlent que 52% du littoral présentent une vulnérabilité socioéconomique faible à modérée à l'érosion et à la submersion marines, 48% possèdent une vulnérabilité élevée à très élevée. Les segments côtiers à très grande vulnérabilité socio-économique à l'érosion et aux

submersions marines correspondent au centre urbain de Cherchell. Cette vulnérabilité très élevée s'explique par la présence d'un port de plaisance, ainsi qu'une infrastructure routière développée (RN°11 et chemin de wilaya), et de nombreuses structures de bâtiments, ainsi que la présence de nombreux vestiges patrimoniaux de l'ère romaine, antique et coloniale. La vulnérabilité élevée correspond aux zones de forte occupation humaine, telle la ville de Cherchell et les agglomérations secondaires d'Oumazar, Tizirine et Parc qui sont des zones fortement urbanisées à vocation économique développée, avec des réseaux routiers importants et qui abritent des monuments historiques. Les zones à vulnérabilité modérée correspondent aux quartiers à vocation agricole telle que le cap des trois îlots Bella et Bordj el Ghoula. Parmi ces zones, il y a les côtes à falaises hautes à accès difficile et à fort couvert végétal. Ces zones sont presque dépourvues de tous types de vie humaine telle que la forêt de cap Blanc, les plans d'eau et la plage Hamdania, ces zones sont de faible vulnérabilité socio-économique (Fig.118).

D'après les résultats obtenus lors de cette étude, une stratégie d'adaptation et de protection des biens et des personnes devient une nécessité. Cependant, pour les décideurs locaux et les planificateurs, il est difficile d'identifier où, quand et comment s'adapter aux impacts d'érosion et de submersion sur les zones côtières [Moser et al., 2012]. L'absence d'étude de ce genre sur la côte de Cherchell aggrave l'identification et la localisation des secteurs les plus vulnérables qui nécessitent une intervention urgente.

Pour lutter contre les risques d'érosion et de submersion future sur la côte de Cherchell, plusieurs techniques de protection existent, par exemple l'alimentation de plages, le reboisement des dunes, l'identification des pistes de piétinement sur les dunes, la gestion de l'urbanisation ainsi que la protection de la bande littorale (bande des 300 m) vers l'intérieur du pays, contre tous types d'intervention humaine.

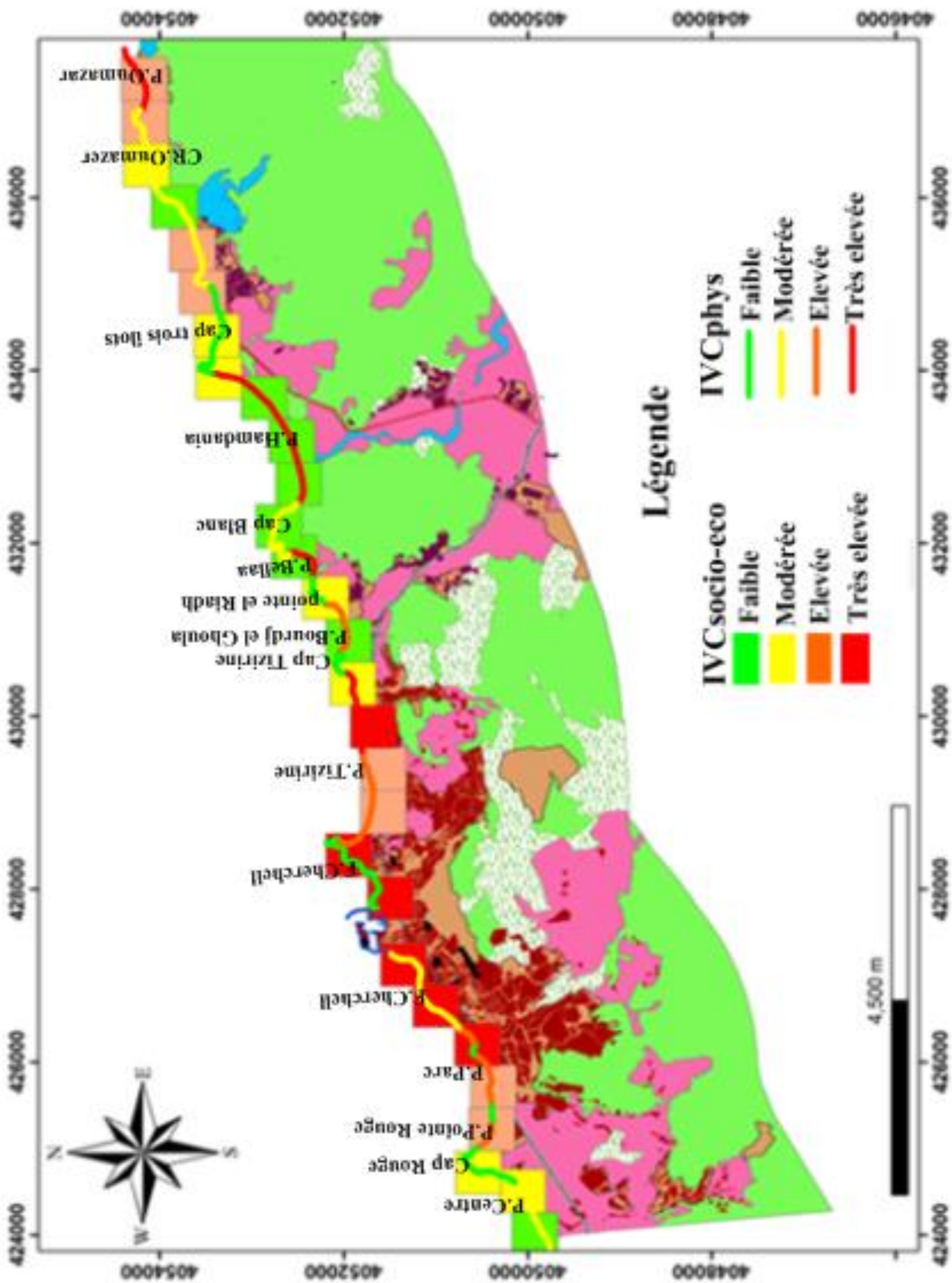


Figure 118: Superpositions des indices de vulnérabilité côtières (IVCphys et IVCsocio-éco) pour le littoral de Cherchell

**Conclusion**

La détermination des zones côtières les plus vulnérables par le calcul de l'IVCphys et l'IVCsocio-éco, met en évidence les zones les plus vulnérables à l'érosion et aux submersions marines, et peut-être utilisée comme un guide par les gestionnaires d'espace.

Grâce à la géomatique (télédétection et systèmes d'informations géographiques), nous avons pu établir la carte de la vulnérabilité physique côtière, qui a montré une vulnérabilité élevée à très élevée aux risques d'érosion et de submersion au niveau des accumulations sableuses, et une vulnérabilité faible à modérée au niveau des falaises et des côtes rocheuses.

L'utilisation de la carte d'occupation de sol et des SIG permet la réalisation de la carte de vulnérabilité socio-économique. Ces résultats permettent de caractériser les zones côtières les plus vulnérables et les types d'utilisations qui se situent dans ces zones. La forte vulnérabilité correspond aux zones urbanisées à vocation économique développée, à réseaux routiers importants et abritant des monuments historiques. Par contre la faible vulnérabilité s'explique par des zones dépourvues de toutes interventions humaines.

Au terme de cette étude, il apparaît que le littoral de Cherchell est physiquement et socioéconomique vulnérable aux risques d'érosion et de submersion. La submersion marine et l'érosion côtière ont des impacts directs sur les infrastructures et les activités côtières. Ces résultats nécessitent une gestion intégrée actuelle et future de la zone côtière algérienne et particulièrement de la côte de Cherchell.

## **Conclusion générale**

### **Conclusion générale**

Cette étude, dont l'objectif était de faire une étude diachronique sur l'état des lieux face aux risques côtiers pour le littoral de Cherchell à l'aide de la géomatique (traitement des photos aériennes, d'images satellitaires, de modèles numériques de terrains et des données alphanumériques à l'aide des systèmes d'information géographiques), a révélé une vulnérabilité plus ou moins importante du littoral de Cherchell face aux risques étudiés.

L'étude rétrospective de l'évolution morphologique du trait de côte du littoral de Cherchell, révèle que la partie Est (plage Hamdania) est fortement sollicitée par le risque d'érosion depuis plusieurs décennies. Ceci en contradiction avec la dynamique hydro-sédimentaire du système côtier ou la simulation numérique témoigne l'absence d'un courant de retour suffisant pour transférer les sédiments vers le large. Cette érosion est due à la construction de barrage Boukerdene qui joue le rôle d'un piège à sédiments.

L'analyse des impacts bio-géophysiques et socioéconomiques, sur la côte Est de ce littoral a fait ressortir, que la région de Hamdania était globalement plus vulnérable aux phénomènes d'inondation, en raison de l'altitude basse de la frange littorale et de l'étendue des plaines alluviales. Les infrastructures ne seront touchées que par des niveaux d'inondation décennale, cinquantennale et centennale et les dégâts sont généralement modérés, et ne concernent que la région de Bellaa. Alors que les infrastructures de la région de Hamdania ne seront pas touchées avec tous les niveaux d'inondation. Les niveaux d'inondations annuelles ne causent aucun risque aux infrastructures en raison de la topographie particulièrement élevée des points d'installations de ses infrastructures.

La situation géographique de l'aquifère de Cherchell en contact direct avec la mer ainsi son fond qui se trouve en dessous du niveau de la mer, affecte sa durabilité et le rend vulnérable à l'intrusion marine. Cette sensibilité est accentuée par le facteur anthropique direct ou indirect. L'application de l'indice de vulnérabilité physique sur la côte de Cherchell révèle qu'un tiers de ce dernier est exposé à une vulnérabilité élevée à très élevée et cette vulnérabilité correspond aux côtes basses à pentes faibles et deux tiers révèle une vulnérabilité faible à modérée. Par contre la vulnérabilité socio-économique révèle que près de la moitié de ce littoral est marquée par une vulnérabilité élevée à très élevée et plus que la moitié révèle une vulnérabilité faible à modérée.

Cette situation inquiétante de ce littoral face au risque côtier est à la fois due à des facteurs naturels et d'autres anthropiques. En ce qui concerne les facteurs naturels on ne peut pas lutter contre elles et se résume par la pente faible et à la géomorphologie basse et parfois meuble des zones affectées. Ainsi les périodes de sécheresses qui ont affecté fortement la région sud

méditerranéenne ses dernières années qui à diminuer les apports nécessaires à la réalimentation des plages en sédiments et des aquifères en eau douce. Sans oublier l'élévation de niveau de la mer et les houles de tempêtes extrêmes qui accentuent le phénomène de perte de terre à la fois par érosion et submersion. Alors que les facteurs anthropiques dans lesquelles on peut agir sont nombreuses dont ont cités les infrastructures telle que le barrage Boukerdene qui a fortement modifié les caractéristiques du milieu par avoir stoppé l'écoulement et le rechargement de l'aquifère par ses lâchers principalement boueux ont colmatant les pores du sol et empêchant l'infiltration des eaux de précipitation dans le sol et donc la non-réalimentation de l'aquifère ; Ainsi l'avancée de la mer dû à la non réalimentation de la plage Hamdania par les apports solides piégés dans barrage ; le pompage intensifié de l'aquifère a réponses aux besoins d'irrigations et l'utilisation domestiques provoque la baisse de son niveau et donc sensible à l'intrusion marine; les aménagements urbains (de nombreuses citées sont en cours de construction à Cherchell) engendre l'extraction licite où élicite de sable de plage et celui des lits d'oueds en accentuant le phénomène d'érosion des plages ; le déversement des rejets domestiques et industriels directement en mer sans aucun traitement nuisait à la flore marine qui joue un rôle primordiale par la fixation des fonds meuble et l'amortissement de l'hydrodynamisme.

Ces impacts affecteront les éléments fondamentaux de la vie des populations côtières, qui en paieraient cher le tribut, si aucune mesure proactive, n'est entreprise, pour anticiper sur ces risques.

Il est donc possible d'éviter, ou du moins de réduire ces impacts, en agissant dans un contexte global de gestion intégré des zones côtières (GIZC), et en mettant en œuvre des mesures d'adaptation et d'atténuation anticipatives, écologiquement acceptables et financièrement réalisables. Ces options devraient être réévaluées régulièrement en raison : des changements qui risquent d'affecter la dynamique côtière et par la suite sa vulnérabilité, de la compréhension scientifique des processus, de l'évolution de la technique, etc.

L'état environnemental actuel, plus ou moins dégradé de ce littoral, présage de difficultés majeures à s'adapter en cas d'élévation du niveau de la mer, si aucune mesure n'est entreprise pour le protéger de ce phénomène pourtant inéluctable.

Les cartes de risques obtenus pour le littoral de Cherchell, serve à identifier les régions les plus vulnérables, et forme un outil de base pour les gestionnaires et les décideurs locaux d'adapter des pratiques et des politiques de planification pour une meilleure préservation de ces espaces fragiles, et une meilleure adaptation en cas de risque.

Enfin, nous recommandons que les cartes de risques obtenus soient mises à jour régulièrement, en utilisant des données plus récentes, pour une meilleure évaluation des zones à risques.

### **Perspective d'avenir**

Cette étude sur le littoral de Cherchell a certes fourni des résultats importants et inédits sur la vulnérabilité de ce littoral aux différents risques côtiers qui peuvent l'affecter ainsi ses stratégies d'adaptation, elle n'en demeure pas moins perfectible et nécessite des études plus approfondies dans le but d'améliorer et généraliser les connaissances et de lever certaines incertitudes, notamment par :

Réalisation des levés topographiques mensuels et annuelle pour calculer le volume de sédiments perdus ou gagnés pour ce littoral, notamment pour la plage Hamdania ;

La réalisation d'un modèle physique (des mesures de courants et des taux de charriage doivent être effectuées dans la région d'étude) afin de vérifier les résultats prédits par le modèle numérique pour la simulation des courants ;

La prise en compte de la tectonique, dans les scénarios des submersions marines ;

Des modèles numériques de terrains, des photos aériennes et d'images satellitaires doivent être disponibles pour toute la région afin de généraliser l'étude ;

Evaluation de la qualité des eaux de l'aquifère de Cherchell pour détecter toutes source de contamination ;

Evaluation annuelle des risques étudiés on utilisant des données plus récentes pour aboutir à des résultats plus fiables.

## **Références bibliographiques**

**Références bibliographiques**

Achab, M., O. Ferreira, and J. A. Dias (2014), Evaluation of sedimentological and morphological changes induced by the rehabilitation of sandy beaches from the Ria Formosa Barrier Island system (South Portugal), *Thalassas*, 30(2), 21-31.

Agardy, T. (1997), Marine protected areas and ocean conservation, Austin, Academic Press, 1997, 244 p.

Alfieri, L., P. Salamon, A. Bianchi, J. Neal, P. Bates, and L. Feyen (2014), Advances in pan-European flood hazard mapping, *Hydrological processes*, 28(13), 4067-4077.

Amarni, N., Fernane, L., Naili, M., Lounas, R., Belkessa, R (2020), Mapping of the vulnerability to marine intrusion “in coastal Chercell aquifer, Central Algeria” using the GALDIT method, *Groundwater for Sustainable Development*.11. 100481.

Ambraseys, N., and J. Vogt (1988), Material for the investigation of the seismicity of the region of Algiers, *European Earthquake Engineering*, 3, 16-29.

Andersen, L., and E. Gosk (1987), Applicability of vulnerability maps. W: The vulnerability of soil and Groundwater pollutions (red. W. Van Duijvenbooden, HG van Waegeningh): 321–332, *paper presented at Proceedings of International Conference, TNO*.

Appening Appening Addo, K., L. Larbi, B. Amisigo, and P. K. Ofori-Danson (2011), Impacts of coastal inundation due to climate change in a cluster of urban coastal communities in Ghana, West Africa, *Remote Sensing*, 3(9), 2029-2050.

Araújo, I., J. Dias, and D. Pugh (2008), Model simulations of tidal changes in a coastal lagoon, the Ria de Aveiro (Portugal), *Continental Shelf Research*, 28(8), 1010-1025.

Arnone, R. A., D. A. Wiesenburg, and K. D. Saunders (1990), The origin and characteristics of the Algerian Current, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 95(C2), 1587-1598.

Ayadi, K., M. Boutiba, F. Sabatier, and M. S. Guettouche (2016), 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), *Arabian Journal of Geosciences*, 9(1), 26.

Bagdanavičiūtė, I., L. Kelpšaitė, and T. Soomere (2015), Multi-criteria evaluation approach to coastal vulnerability index development in micro-tidal low-lying areas, *Ocean & Coastal Management*, 104, 124-135.

Ballesteros, C., J. A. Jiménez, and C. Viavattene (2018), A multi-component flood risk assessment in the Maresme coast (NW Mediterranean), *Natural Hazards*, 90(1), 265-292.

Batchi, M., A. Karkouri, M. El Maaqili, and I. Fenjiro (2014), Cartographie de la vulnérabilité à l'intrusion marine de l'aquifère Côtier de Mnasra (littoral du Gharb, Maroc–Nord-Occidental), *Mar Sci Coast Res J*, 11.

Batchi, M., J. A. Karkouri, I. Fenjiro, and M. E. Maaqili (2017), Étude comparative de deux modèles (DRASTIC et SI) pour l'évaluation de la sensibilité de la nappe phréatique de Mnasra

(Maroc nord-occidental) à la pollution d'origine agricole, *Physio-Géo. Géographie physique et environnement* (Volume 11), 43-64.

Belhai, D. (1987), Massif du Chenoua (Algérie): mise en place des flyschs en relation avec un cisaillement «transcurrent» EW, responsable de la structure en éventail, *Mémoire de magister, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene (USTHB), Alger, Algérie.*

Belhai, D. (1996), Evolution tectonique de la zone ouest-Algéroise (Ténès-Chénoua)" approche stratigraphique et structurale". Thèse de doctorat, USTHB, Alger, Algérie.

Benavente, J., L. Del Río, F. J. Gracia, and J. A. Martínez-del-Pozo (2006), Coastal flooding hazard related to storms and coastal evolution in Valdelagrana spit (Cadiz Bay Natural Park, SW Spain), *Continental Shelf Research*, 26(9), 1061-1076.

Benhallou, H. (1985), Les Catastrophes sismiques de la région d'Echelif dans le contexte de la sismicité historique de l'Algérie. Thèse de doctorat, USTHB, Alger, Algérie.

Betrouni, M. (1983), Le Pléistocène supérieur du littoral ouest algérois. Thèse de doctorat, Université d'Aix-Marseille II, Fac. Sc. Luminy. France.

Bird, E. C. F. (1985), Coastline changes. A global review. Livre. United States: N. p., 1985. Web.

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. *Mémoire de magister, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene (USTHB), Alger, Algérie.*

Bouderbala, A., B. Remini, A. S. Hamoudi, and A. Pulido-Bosch (2016), Assessment of groundwater vulnerability and quality in coastal aquifers: a case study (Tipaza, North Algeria), *Arabian Journal of Geosciences*, 9(3), 181.

Boudiaf, A. (1996), Etude sismotectonique de la région d'Alger et de la Kabylie (Algérie): utilisation des modèles numériques de terrains (MNT) et de la télédétection pour la reconnaissance des structures tectoniques actives: contribution à l'évaluation de l'aléa sismique. Thèse de doctorat, Montpellier 2, France.

Boudjelil, E.-h., and A. K. Djafari (2018), Etude de la vulnérabilité à la pollution de la nappe superficielle de Souk El Tenine par la méthode GALDIT. *Mémoire de Master, Université Abderrahmane Mira-Bejaia.*

Bouillin, J.-P. (1986), Le bassin maghrébin : une ancienne limite entre l'Europe et l'Afrique à l'Ouest des Alpes, *Bull. Soc. Géol. Fr.*, 8(4), 547-558.

Bounif, A., M. Bezzeghoud, L. Dorbath, D. Legrand, A. Deschamps, L. Rivera, and H. Benhallou (2003), Seismic source study of the 1989, October 29, Chenoua (Algeria) earthquake from aftershocks, broad-band and strong ground motion records, *Annals of geophysics*, VOL. 46, N. 4.

## *Références bibliographiques*

- Braik, D. (1989). Etude de la dynamique sédimentaire devant Bou Ismail: sédimentologie, morphologie, problème d'érosion du littoral et aménagement [Sedimentary dynamics study in front of Bou-Ismaïl: sedimentology, morphology, coastline erosion problem and management][Magister thesis]. Algiers: Institut des sciences de la terre, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene [Faculty of Earth Sciences, University of Sciences and technology Houari Boumediene], 174.
- Burton I., Kates R.W., and White G.F. (1993), *The environment as Hazard*. Livre. New York and London, Guilford Press.
- Campos, M. L. (1991), Tsunami hazard on the Spanish coasts of the Iberian Peninsula, *Science of Tsunami Hazards*, 9(1), 83-90.
- Carter, R. (1991). Near-future sea level impacts on coastal dune landscapes. *Landscape Ecology*, 6(1), 29-39.
- Castany, G. (1982a), Bassin sédimentaire du Sahara septentrional (Algérie-Tunisie). Aquifères du continental intercalaire et du complexe terminal, *Bull. BRGM*, 2(2), 127-147.
- Castany, G. (1982b), *Principes et méthodes de l'hydrogéologie*, Bordas. Livre. Paris, France.
- Caude G. et Mazzolini P. (1987), Le risque pour le littoral de l'hexagone, actes du colloque Mer et Littoral, Couple à risque, La Documentation française, p. 311-325.
- Cazenave, A., and R. S. Nerem (2004), Present-day sea level change: Observations and causes, *Reviews of Geophysics*, 42(3).
- CGS. (2009), Etude de microzonage sismique des sites urbains de la wilaya de Tipaza. Etape A2 : Carte photogéologique.
- CGS. (2011), Etude de microzonage sismique des sites urbains de la wilaya de Tipaza. Etape A3 : Carte géotechnique et données hydrogéologiques.
- Chachadi, A., and J. Lobo Ferreira (2007), Assessing aquifer vulnerability to seawater intrusion using GALDIT method, edited, Part.
- Chachadi, A. (2005), Seawater intrusion mapping using modified GALDIT indicator model: A case study in Goa.
- Chachadi, A., J. Lobo Ferreira, L. Noronha, and B. Choudri (2003), Assessing the impact of sea-level rise on salt water intrusion in coastal Aquifers using GALDIT model. APRH/CEAS, *Processing Seminário Sobre Aguas Subterrâneas, Lisboa*, 13.
- Chachadi, A., and J. Lobo-Ferreira (2001a), Seawater intrusion vulnerability mapping of aquifers using GALDIT method. COASTIN: a coastal policy research newsletter, TERI, New Delhi, edited.
- Chachadi, A., and J. Lobo-Ferreira (2001b), Sea water intrusion vulnerability mapping of aquifers using GALDIT method, *Coastin*, 4, 7-9.

Church, J. A., N. J. White, and J. R. Hunter (2006), Sea-level rise at tropical Pacific and Indian Ocean islands, *Global and Planetary Change*, 53(3), 155-168.

Colmer, J. (2013), Climate variability, child labour and schooling: evidence on the intensive and extensive margin *Rep., Nota di Lavoro, Fondazione Eni Enrico Mattei*.

Crowell, M., S. P. Leatherman, and M. K. Buckley (1991), Historical shoreline change: error analysis and mapping accuracy, *Journal of coastal research*, 839-852.

Crowell M., Leikin H., Buckley M.K. (1999), «Evaluation of Coastal Erosion Hazards Study: An Overview», *Journal of Coastal Research*, 28, p. 2-9.

Cullis, B., R. D'Souza, P. McCullagh, S. Harries, A. Nicholls, R. Lee, and C. Bingham (2006), Sirolimus-induced remission of posttransplantation lymphoproliferative disorder, *American Journal of Kidney Diseases*, 47(5), e67-e72.

Dalloni, M. (1940), Notes sur la classification du Pliocène supérieur et du Quaternaire de l'Algérie, Verlag nicht ermittelbar.

De Pippo, T., C. Donadio, M. Pennetta, C. Petrosino, F. Terlizzi, and A. Valente (2008), Coastal hazard assessment and mapping in Northern Campania, Italy, *Geomorphology*, 97(3-4), 451-466.

Desmazes. (2005). Caractérisation des barres sableuses d'une plage de la côte aquitaine. Exemple de la plage du Truc vert. Thèse de doctorat en Sciences du Vivant, Géosciences, Sciences de l'Environnement, option géologie marine. *Université de Bordeaux I*, 292 p.

DHI-SW. (2007), MIKE21 Spectral Waves FM Module: User Guide. DanishHydraulic Institute.

DGPC. (2016), Rapport II : Bilan diagnostic et état des lieux ; étude d'aménagement du littoral de la wilaya de Tipasa.

DGPC. (2017), Etude d'élaboration du plan d'aménagement côtier (PAC) de la wilaya de Tipasa ; règlement d'aménagement du littoral.

Djabri, L., S. Bouhsina, A. Hani, H. Chaffai, N. Bougherira, I. Abdeslam, C. Fehdi, and F. Baali (2019), Essai de cartographie du risque d'intrusion marine par une approche multicritères: cas de la nappe de collo (ne, algerien), *Larhyss Journal* (38), 7-20.

Djouidar, D., S. Zahouani, and A. Khaldi (2017), Application of the GALDIT Method to the Study of Groundwater Vulnerability of the East Mitidja Alluvial Waters, *paper presented at Euro-Mediterranean Conference for Environmental Integration, Springer*.

Djouder, F. (2018), Evaluation des impacts des changements climatiques et de l'élévation du niveau de la mer méditerranée sur le littoral du golfe de Bejaia. Thèse de doctorat. USTHB, Alger, Algérie.

Dolan, R., M. S. Fenster, and S. J. Holme (1991), Temporal analysis of shoreline recession and accretion, *Journal of coastal research*, 723-744.

Dolan, R., B. P. Hayden, P. May, and S. May (1980), The reliability of shoreline change measurements from aerial photographs, *Shore and beach*, 48(4), 22-29.

Domzig, A. (2006), Déformation active et récente, et structuration tectono-sédimentaire de la marge sous-marine algérienne. Thèse de doctorat, université de Brest, France.

Douglas, B. C., and M. Crowell (2000), Long-term shoreline position prediction and error propagation, *Journal of coastal research*, 145-152.

Doukakis, E. (2005), Coastal vulnerability and risk parameters, *European Water*, 11(12), 3-7.

Duijvenbooden, W. V., and Waegeningh, H. V. (1987). Vulnerability of soil and groundwater to pollutants: international conference Noordwijk aan Zee, The Netherlands, March 30-April 3, 1987. The Hague: TNO Committee on Hydrological Research, 2-5.

Durand, P. (1998), Cinématique d'un littoral sableux à partir de photographies aériennes et de cartes topographiques. Exemple du littoral d'Argelès-Plage à Saint-Cyprien (Roussillon, France)/Kinematics of a sandy shoreline deduced from the analysis of aerial photographs and topographic maps. Example of the beach extending from Argelès-Plage to Saint-Cyprien (Roussillon, France), *Géomorphologie: relief, processus, environnement*, 4(2), 155-166.

Dwarakish, G., S. Vinay, S. Dinakar, J. B. Pai, K. Mahaganesh, and U. Natesan (2008), Integrated coastal zone management plan for Udupi coast using remote sensing, geographical information system and global position system, *Journal of Applied Remote Sensing*, 2(1), 023515.

Dwarakish, G., S. Vinay, U. Natesan, T. Asano, T. Kakinuma, K. Venkataramana, B. J. Pai, and M. Babita (2009), Coastal vulnerability assessment of the future sea level rise in Udupi coastal zone of Karnataka state, west coast of India, *Ocean & Coastal Management*, 52(9), 467-478.

El Moutchou, B. (1995), Dynamique côtière actuelle et évolution morphosédimentaire de la frange littorale méditerranéenne entre M'diq et Oued Laou (Région de Tétouan, Maroc Nord-occidental), Thèse de doctorat, Rabat, Maroc.

Etienne, L. (2014), Accentuation récente de la vulnérabilité liée à la mobilité du trait de côte et à la salinisation des sols dans l'archipel de Kerkennah (Tunisie). Thèse de doctorat Université Paris Diderot (Paris 7) Sorbonne Paris Cité; Université de Sfax (Faculté des Lettres et Sciences Humaines). Paris, France.

Felsenstein, D., and M. Lichter (2014), Social and economic vulnerability of coastal communities to sea-level rise and extreme flooding, *Natural Hazards*, 71(1), 463-491.

Finkl, C. W. (2000), Identification of unseen flood hazard impacts in southeast Florida through integration of remote sensing and geographic information system techniques, *Environmental geosciences*, 7(3), 119-136.

Flandrin, J. and P. Claracq (1952), Chaîne du Djurdjura, département d'Alger, Service de la carte géologique de l'Algérie.

Frizon de Lamotte, D., Saint Bezar, B., Bracène, R., and Mercier, E. (2000), The two main steps of the Atlas building and geodynamics of the western Mediterranean, *Tectonics*, 19, 740-761.

Gaki-Papanastassiou, K., E. Karymbalis, S. E. Poulos, A. Seni, and C. Zouva (2010), Coastal vulnerability assessment to sea-level rise based on geomorphological and oceanographical parameters: the case of Argolikos Gulf, Peloponnese, Greece, *Hellenic Journal of Geosciences*, 45(45), 109-122.

Gallien, T., J. Schubert, and B. Sanders (2011), Predicting tidal flooding of urbanized embayments: A modeling framework and data requirements, *Coastal Engineering*, 58(6), 567-577.

Genz, A. S., C. H. Fletcher, R. A. Dunn, L. N. Frazer, and J. J. Rooney (2007), The predictive accuracy of shoreline change rate methods and alongshore beach variation on Maui, Hawaii, *Journal of coastal research*, 87-105.

GIEC. (2014), Changements climatiques 2014: Rapport de synthèse. Contribution des Groupes de travail I, II et III au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [Sous la direction de l'équipe de rédaction principale, R.K. Pachauri et L.A. Meyer]. GIEC, Genève, Suisse, 161 p.

Glangeaud, L., A. F. Aymé, and A. J. Caire (1952), Histoire géologique de la province d'Alger.

Gornitz, V., S. Couch, and E. K. Hartig (2001), Impacts of sea level rise in the New York City metropolitan area, *Global and Planetary Change*, 32(1), 61-88.

Gornitz, V. M., R. C. Daniels, T. W. White, and K. R. Birdwell (1994), The development of a coastal risk assessment database: vulnerability to sea-level rise in the US Southeast, *Journal of coastal research*, 327-338.

Gornitz, V. (1993), Mean sea level changes in the recent past, *Climate and sea level change, observations, projections and implications*, 25-44.

Gornitz, V. (1991), Global coastal hazards from future sea level rise, *Global and Planetary Change*, 3(4), 379-398.

Gornitz, V. (1990), Vulnerability of the East Coast, USA to future sea level rise, *Journal of coastal research*, 201-237.

Gorokhovich, Y., A. Leiserowitz, and D. Dugan (2013), Integrating coastal vulnerability and community-based subsistence resource mapping in Northwest Alaska, *Journal of coastal research*, 30(1), 158-169.

Green C. and Penning-Rowsell E. (1999), «Inherent conflicts at the coast», *Journal of Coastal Conservation*, 5, p. 153-162.

- Group, W. (1998), Changing waves and storms in the Northeast Atlantic?, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79(5), 741-760.
- Guezgouz N, Djabri. L., and S. Bouhsina (2013), Etude comparative de la vulnérabilité à l'intrusion marine par la méthode paramétrique: cas de la région de Annaba–Guerbes (NE Algérie). *Séminaire International sur l'Hydrogéologie et l'Environnement 5-7 Novembre 2013*, Ouargla (Algérie).
- Hallal, D. D., M. E. A. Khelfi, S. Zahouani, A. Benamghar, O. Haddad, A. Ammari, and J. P. Lobo-Ferreira (2019), Application of the GALDIT method combined with geostatistics at the Bouteldja aquifer (Algeria), *Environmental earth sciences*, 78(1), 22.
- Hallegatte, S., C. Green, R. J. Nicholls, and J. Corfee-Morlot (2013), Future flood losses in major coastal cities, *Nature climate change*, 3(9), 802-806.
- Hammar-Klose, E. S., and E. R. Thieler (2001), *Coastal vulnerability to sea-level rise: a preliminary database for the US Atlantic, Pacific, and Gulf of Mexico coasts*, US Geological Survey.
- Hashimoto, T., J. R. Stedinger, and D. P. Loucks (1982), Reliability, resiliency, and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation, *Water resources research*, 18(1), 14-20.
- Hénaff, A., and M. Philippe (2014), Gestion des risques d'érosion et de submersion marines. Guide méthodologique. 153p, 2014, 978-2-9549569-0-9. <hal-01120822>.
- Holthuijsen, L.H., Booij, N. ET Herberes, T.H.C. (1989). A Prediction Model for Stationary, Short-crested Waves in Shallow Water with Ambient Currents, *Coastal Engineering, Vol. 13. pp. 23-54.*
- Hughes, P., G. Brundrit, and S. Searson (1992), The vulnerability of Walvis Bay to rising sea levels, *Journal of coastal research*, 868-881.
- Jimenez, J. A., and A. Sánchez-Arcilla (1997), Physical impacts of climatic change on deltaic coastal systems (II): driving terms, *Climatic Change*, 35(1), 95-118.
- Joevivek, V., S. Saravanan, and N. Chandrasekar (2013), Coastal vulnerability and shoreline changes for southern tip of India—remote sensing and GIS approach, *J Earth Sci Clim Change*, 4(144), 2.
- Joliveau, T. (2004), Géomatique et gestion environnementale du territoire: recherche sur un usage géographique des SIG. Parcours 1. Les SIG, de l'outil technique à la construction sociale. Thèse de doctorat. France.
- Kazakis, N., M. Spiliotis, K. Voudouris, F.-K. Pliakas, and B. Papadopoulos (2018), A fuzzy multicriteria categorization of the GALDIT method to assess seawater intrusion vulnerability of coastal aquifers, *Science of the Total Environment*, 621, 524-534.

Kermani, S., M. Boutiba, M. Guendouz, M. S. Guettouche, and D. Khelfani (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.

Kervern G.-Y. et Rubise P. (1991), L'archipel du danger, Paris, Economica, 444 p.

Khadidja, B. (2018), Etablissement de carte de ressources en eaux souterraines de la wilaya de Tipaza. *Mémoire de master, Université Djilali Bounaama Khemis Miliana. Algérie.*

Khalfani, D. (2014), Etude hydro-sédimentaire à l'avant cote de Cap Djinet wilaya de Boumerdes. mémoire de magistère, *ENSSMAL. Alger, Algérie.*

Kron, W. (2013), Coasts: the high-risk areas of the world, *Natural Hazards*, 66(3), 1363-1382.

Kumar, A. A., and P. D. Kunte (2012), Coastal vulnerability assessment for Chennai, east coast of India using geospatial techniques, *Natural Hazards*, 64(1), 853-872.

Leclaire, L. (1972), La sédimentation holocène sur le versant méridional du bassin algero-baleares.(precontinent algérien). Source MEM. MUS. NATION. HIST. NAT., C; FR.; 1972, VOL. 24, P. 1 A 391.

LEM. (2016), Etude de l'avant-projet détaillé du nouveau port Centre de Cherchell. Mission.1 Chapitre 4.13- Réexamen de Données de base.

LEM. (2016), Etude de l'avant-projet détaillé du nouveau port Centre de Cherchell. Mission.1 Chapitre 4.10-Investigations Environnementales.

Leone, F., and F. Vinet (2006), La vulnérabilité des sociétés et des territoires face aux menaces naturelles, *Analyses géographiques. Coll.«Géorisques (1).*

Lévy, J., and M. Lussault (2013), *Dictionnaire de géographie et de l'espace des sociétés.*

Lobo-Ferreira, J., M. C. Cunha, A. Chachadi, K. Nagel, C. Diamantino, and M. M. Oliveira (2003), Application of optimization models for satisfaction of water resource demand of tourist infrastructure, *Coastal Tourism, Environment, and Sustainable Local Development (Ed. Noronha et al.),* 305-320.

Lovelock J. (1995), *The ages of Gaia, a biographie of our Living earth,* Oxford University press, 255p.

Maamar, H. (2004), Annuaire hydrogéologique de la nappe alluviale de l'oued El Hachem, *Blida, Algérie: Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH).*

Mahrez, B., S. Klebingat, B. Houha, and B. Houria (2018), GIS-based GALDIT method for vulnerability assessment to seawater intrusion of the Quaternary coastal Collo aquifer (NE-Algeria), *Arabian Journal of Geosciences*, 11(4), 71.

Maiti, S., and A. K. Bhattacharya (2009), Shoreline change analysis and its application to prediction: A remote sensing and statistics based approach, *Marine Geology*, 257(1-4), 11-23.

- Malek, F. (1995), Evolution morpho-sédimentaire de la frange littorale méditerranéenne au nord de Tétouan entre M'diq et Fnideq (Maroc nord-occidental): interface des causes naturelles et anthropiques, impacts des aménagements portuaires. Thèse de *doctorat*. Rabat, Maroc.
- Mancet, J. (1972), Etude hydrogéologique de la nappe alluviale de l'oued El Hachem, edited, ANRH.
- Mauouche, S. (2002), Etude sismotectonique dans l'Algérois et les zones limitrophes de Cherchell-Gouraya, *Alger, FSTGAT/USTHB: Magister Thesis*. Algérie.
- McBride, R. A., and M. R. Byrnes (1997), Regional variations in shore response along barrier island systems of the Mississippi River delta plain: historical change and future prediction, *Journal of coastal research*, 628-655.
- McGranahan, G., D. Balk, and B. Anderson (2007), The rising tide: assessing the risks of climate change and human settlements in low elevation coastal zones, *Environment and urbanization*, 19(1), 17-37.
- McLaughlin, S., and J. A. G. Cooper (2010), A multi-scale coastal vulnerability index: A tool for coastal managers?, *Environmental Hazards*, 9(3), 233-248.
- McLaughlin, S., J. McKenna, and J. Cooper (2002), Socio-economic data in coastal vulnerability indices: constraints and opportunities, *Journal of coastal research*, 36(sp1), 487-497.
- Medejerab, A., and L. Henia (2011), Variations spatiotemporelles de la sécheresse climatique en Algérie nordoccidentale, *Courrier du savoir*, 11, 71-79.
- Meghraoui, M. (1991), Blind reverse faulting system associated with the Mont Chenoua-Tipaza earthquake of 29 October 1989 (north-central Algeria), *Terra Nova*, 3(1), 84-92.
- Meghraoui, M. (1988), Géologie des zones sismiques du Nord de l'Algérie: Paléosismologie, tectonique active et synthèse sismotectonique. Thèse de doctorat, Paris 11. France.
- Mihoubi, M., R. Belkessa, and M. Latreche (2014), Study of the vulnerability of coastal areas of the Algerian Basin with the GIS, *International Journal of Environmental Science and Development*, 5(6), 522.
- Moghaddam, H. K., H. K. Moghaddam, Z. R. Kivi, M. Bahreinimotlagh, and M. J. Alizadeh (2019), Developing comparative mathematic models, BN and ANN for forecasting of groundwater levels, *Groundwater for Sustainable Development*, 9, 100237.
- Mohamed, M., k, Bensmaili (2016). Caractérisation physico-chimique des eaux souterraines de la nappe alluviale de l'oued el Hachem (Tipaza). Mémoire de master. Université Djilali Bounaama de Khemis Miliana. Algérie.
- Moore, L. J. (2000), Shoreline mapping techniques, *Journal of coastal research*, 111-124.

Morel V. (2006). « Regard rétrospectif sur l'étude des risques en géographie à partir des publications universitaires (1980-2004). » *L'Information Géographique*. Vol. 70, n°1, p. 6-24.

Moser, S. C., S. Jeffress Williams, and D. F. Boesch (2012), Wicked challenges at land's end: Managing coastal vulnerability under climate change, *Annual Review of Environment and Resources*, 37, 51-78.

Moussaid, J., A. A. Fora, B. Zourarah, M. Maanan, and M. Maanan (2015), Using automatic computation to analyze the rate of shoreline change on the Kenitra coast, Morocco, *Ocean Engineering*, 102, 71-77.

Mujabar, P. S., and N. Chandrasekar (2013), Shoreline change analysis along the coast between Kanyakumari and Tuticorin of India using remote sensing and GIS, *Arabian Journal of Geosciences*, 6(3), 647-664.

Murdukhayeva, A., P. August, M. Bradley, C. LaBash, and N. Shaw (2013), Assessment of inundation risk from sea level rise and storm surge in northeastern coastal national parks, *Journal of coastal research*, 29(6a), 1-16.

Najib, S., A. Grozavu, K. Mehdi, I. G. Breaban, H. Guessir, and K. Boutayeb (2012), Application of the method GALDIT for the cartography of groundwaters vulnerability: aquifer of Chaouia coast (Morocco), *Analele stiintifice ale Universitatii" Alexandru Ioan Cuza" din Iasi-seria Geografie*, 58(2), 77-88.

Niazi, S. (2007), Evaluation des impacts des changements climatiques et de l'élévation du niveau de la mer sur le littoral de Tétouan (Méditerranée occidentale du Maroc): Vulnérabilité et Adaptation. Thèse de doctorat, Université Mohammed V - Agdal, Faculté des sciences Rabat, 296 p.

Nicholls, R. J., F. M. Hoozemans, and M. Marchand (1999), Increasing flood risk and wetland losses due to global sea-level rise: regional and global analyses, *Global Environmental Change*, 9, S69-S87.

Nicholls, R. J., and N. Mimura (1998), Regional issues raised by sea-level rise and their policy implications, *Climate research*, 11(1), 5-18.

Obaton, D., C. Millot, G. C. d'Hières, and I. Taupier-Letage (2000), The Algerian current: comparisons between in situ and laboratory data sets, *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 47(11), 2159-2190.

OJEC (2002), Official Journal of the European Communities, C 58 E/2, Chapter II, Principles, §a.

Otmani, H., Belkessa, R., Bengoufa, S., Boukhediche, W., Djerrai, N., & Abbad, K. (2020), Assessment of shoreline dynamics on the Eastern Coast of Algiers (Algeria): a spatiotemporal analysis using in situ measurements and geospatial tools. *Arabian Journal of Geosciences*, 13(3), 1-15.

- Otmani. H (2020), Etude et évaluation de la vulnérabilité des systèmes côtiers dans la région algéroise. Thèse de doctorats, ENSSMAL, Alger, Algérie.
- Otmani. H (2014), Impact des infrastructures maritimes sur le littoral : Cas du port de Cap Djinet. Mémoire de magister , ENSSMAL , Alger.
- Overpeck, J. T., and J. L. Weiss (2009), Projections of future sea level becoming more dire, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(51), 21461-21462.
- Özyurt G., and A. Ergin (2010), Improving coastal vulnerability assessments to sea-level rise: a new indicator-based methodology for decision makers, *Journal of coastal research*, 265-273.
- Paskoff, R. P. (2004), Potential implications of sea-level rise for France, *Journal of coastal research*, 424-434.
- Paskoff, R. (1998), La crise des plages: pénurie de sédiments, *Mappemonde*, 52(4), 11-15.
- Pfeffer, W. T., J. T. Harper, and S. O'Neel (2008), Kinematic constraints on glacier contributions to 21st-century sea-level rise, *Science*, 321(5894), 1340-1343.
- Pilkey, O. H., and T. Hume (2001), The shoreline erosion problem: lessons from the past, *Water and Atmosphere*, 9(2), 22-23.
- Rabehi, W., M. Guerfi, and H. Mahi (2018), Cartographie de la vulnérabilité des communes de la baie d'Alger. Approche socio-économique et physique de la côte, *Méditerranée. Revue géographique des pays méditerranéens/Journal of Mediterranean geography*, Electronic version URL: <http://journals.openedition.org/mediterranee/8625>, ISSN: 1760-8538.
- Rahmstorf, S. (2007), A semi-empirical approach to projecting future sea-level rise, *Science*, 315(5810), 368-370.
- Rao, K. N., P. Subraelu, T. V. Rao, B. H. Malini, R. Ratheesh, S. Bhattacharya, and A. Rajawat (2008), Sea-level rise and coastal vulnerability: an assessment of Andhra Pradesh coast, India through remote sensing and GIS, *Journal of Coastal Conservation*, 12(4), 195-207.
- Regrain., C, (2016), Évaluer la vulnérabilité face à la submersion marine : approche multicritère sur la commune de Leucate. Mémoire de master, France.
- Revelle, R. (1941), Criteria for recognition of the sea water in ground-waters, *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 22(3), 593-597.
- Robin, M. (2002), Télédétection et modélisation du trait de côte et de sa cinématique, *Baron-Yelles N. et al., Le littoral, regards, pratiques et savoirs, Edit. Rue d'Ulm*, 95-115.
- Robin, M. (2002), *La télédétection: des satellites aux SIG*. (2 ème édition). Paris, France.

- Robin, M., and F. Gourmelon (2005), La télédétection et les SIG dans les espaces côtiers. Eléments de synthèse à travers le parcours de François Cuq, *Noréis. Environnement, aménagement, société* (196), 11-21.
- Robin 2002. Étude des risques côtiers sous l'angle de la géomatique. In: *Annales de Géographie*, t. 111, n°627-628. pp. 471-502 .
- Robin M. (2000), Le risque côtier à Morondava», *Cahiers Nantais*, 52, p. 179-191.
- Romieu, E., T. Welle, S. Schneiderbauer, M. Pelling, and C. Vinchon (2010), Vulnerability assessment within climate change and natural hazard contexts: revealing gaps and synergies through coastal applications, *Sustainability Science*, 5(2), 159-170.
- Rothé, J.-P., N. Dechevoy, and P. Seltzer (1950), *Les séismes de Kerrata et la séismicité de l'Algérie*, Pauc.
- Roussel, J. (1973), L'activité sismique en algérie de 1951 a 1970 inclus. *bull. soc. hist. nat. afr. nord; algérie; da.* 1973; vol. 64; no 3-4; pp. 185-210; h.t. 1; abs. angl.; bibl. 13 ref.
- Rygel, L., D. O'sullivan, and B. Yarnal (2006), A method for constructing a social vulnerability index: an application to hurricane storm surges in a developed country, *Mitigation and adaptation strategies for global change*, 11(3), 741-764.
- Saidi, S., S. Bouri, H. B. Dhia, and B. Anselme (2011), Assessment of groundwater risk using intrinsic vulnerability and hazard mapping: application to Souassi aquifer, Tunisian Sahel, *Agricultural Water Management*, 98(10), 1671-1682.
- Salomon, J.-N. (2008), Les records climatiques, *Travaux du Laboratoire de Géographie Physique Appliquée*, 26(1), 61-71.
- Saoudi, N. (1989), Pliocène et Pléistocène inférieur et moyen du Sahel d'Alger, *ENAL, Alger*.
- Saxena, S., R. Purvaja, G. M. D. Suganya, and R. Ramesh (2013), Coastal hazard mapping in the Cuddalore region, South India, *Natural Hazards*, 66(3), 1519-1536.
- Simard, I., A. Robichaud, and F. Savoie-Ferron. (2015), Infrastructures à risque face aux inondations et à l'érosion côtières pour la municipalité de Bathurst, Nouveau-Brunswick, edited, Rapport préparé pour la municipalité de Bathurst et le Fonds de fiducie.
- Small, C., and R. J. Nicholls. (2003), A global analysis of human settlement in coastal zones, *Journal of coastal research*, 584-599.
- Smith-Olivier-Anthony. (1996). Anthropological research on hazards and disasters. *Annual review of anthropology*, 25(1), 303-328.
- Sims P. (1998), *Coastline Erosion, Protection and Management in Devon and Cornwall, Environmental Management and Change in Plymouth and the southwest*, Plymouth university, chap. 4, p. 73-92.

## *Références bibliographiques*

- Snoussi, M., and E. Tabet-aoul (2000), Integrated coastal zone management programme. *Elsevier Science Ltd-Amsterdam*.
- Snoussi, M., J. Kitheka, Y. Shaghude, A. Kane, R. Arthurton, M. Le Tissier, and H. Virji (2007), Downstream and coastal impacts of damming and water abstraction in Africa, *Environmental Management*, 39(5), 587-600.
- Suanez, S. (1997), Dynamiques sédimentaires actuelles et récentes de la frange littorale orientale du delta du Rhône. Thèse de doctorat, Aix-Marseille 1. France.
- Suanez, S., and B. Simon (1997), Utilisation de l'analyse diachronique dans l'étude de l'évolution du littoral du delta du Rhône (France, Sud-Est), *Photo-Interprétation. European Journal of Applied Remote Sensing*, 35(3-4), 147-158.
- Suanez, S., and M. Provansal (1998), Large scale evolution of the littoral of the Rhone delta (southeast France), *Journal of coastal research*, 493-501.
- Szczypta, C. (2012), Hydrologie spatiale pour le suivi des sécheresses du bassin méditerranéen. Thèse de doctorat, univ-toulouse. France.
- Tadrist, N., O. Debauche, B. Remini, D. Xanthoulis, and A. Degré (2016), Impact de l'érosion sur l'envasement des barrages, la recharge des nappes phréatiques côtières et les intrusions marines dans la zone semi-aride méditerranéenne: cas du barrage de Boukourdane (Algérie), *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, 20(4), 453-467.
- Tasnim, Z., and S. Tahsin (2016), Application of the method of GALDIT for groundwater vulnerability assessment: a case of South Florida, *Asian Journal of Applied Science and Engineering*, 5(1), 27-40.
- Taupier-Letage, I., and C. Millot (1988), Surface circulation in the Algerian basin during 1984, *Oceanol. Acta*, 9, 119-131.
- Thieler, E. R., E. A. Himmelstoss, J. L. Zichichi, and A. Ergul (2009), The Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 4.0-an ArcGIS extension for calculating shoreline change. *US Geological Survey, Open-File Report 2008-1278. 2331-1258*.
- Thieler, E. R., and Hammar-Klose, E. S. (2000). National assessment of coastal vulnerability to sea-level rise; preliminary results for the US Pacific Coast (No. 2000-178).
- Thieler, E.R., Hammar-Klose, E.S., 2000a. National Assessment of Coastal Vulnerability to Sea-Level Rise: U.S. Gulf of Mexico Coast. U.S. Geological Survey, Open-File Report, 00-179, 1 sheet.
- Thieler, E.R., Hammar-Klose, E.S., 2000b. National Assessment of Coastal Vulnerability to Sea-Level Rise: U.S. Pacific Coast. U.S. Geological Survey, Open-File Report, 00-178, 1 sheet.
- Thieler, E. R., Hammar-Klose, E. S. (1999), National Assessment of Coastal Vulnerability to Sea-Level Rise: Preliminary Results for the U.S. Atlantic Coast. U.S. Geological Survey, Open-File Report, 99-593, 1 sheet.

Thieler, E. R., and W. W. Danforth (1994), Historical shoreline mapping (I): improving techniques and reducing positioning errors, *Journal of coastal research*, 549-563.

Trabelsi, N., I. Triki, I. Hentati, and M. Zairi (2016), Aquifer vulnerability and seawater intrusion risk using GALDIT, GQI SWI and GIS: case of a coastal aquifer in Tunisia, *Environmental earth sciences*, 75(8), 669.

Vittal Hegde, A., and V. Radhakrishnan Reju (2007), Development of coastal vulnerability index for Mangalore coast, India, *Journal of coastal research*, 1106-1111.

Vogt, J., and N. Ambraseys (1991), Matériaux relatifs à la sismicité de l'Algérie occidentale au cours de la deuxième moitié du XIXe et au début du XXe siècle, *Méditerranée*, 74(4), 39-45.

Vousdoukas, M. I., L. Mentaschi, E. Voukouvalas, M. Verlaan, S. Jevrejeva, L. P. Jackson, and L. Feyen (2018), Global probabilistic projections of extreme sea levels show intensification of coastal flood hazard, *Nature communications*, 9(1), 1-12.

Yelles-Chaouche, A., A. Boudiaf, H. Djellit, and R. Bracene (2006), La tectonique active de la région nord-algérienne, *Comptes Rendus Geoscience*, 338(1-2), 126-139.

Zuzek, P. J., R. B. Nairn, and S. J. Thieme (2003), Spatial and temporal considerations for calculating shoreline change rates in the Great Lakes Basin, *Journal of coastal research*, 125-146.

# **Annexes**



Research paper

## Mapping of the vulnerability to marine intrusion “in coastal Cherchell aquifer, Central Algeria” using the GALDIT method

Nadia Amarni<sup>a,\*</sup>, Lounes Fernane<sup>a</sup>, Mohammed Naili<sup>b</sup>, Ryhane Lounas<sup>a</sup>, Rabah Belkessa<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Laboratoire des Écosystèmes Marins et Littoraux (ECOSYSMARL), Ecole Nationale Supérieure des Sciences de la Mer et de l'Aménagement du Littoral (E.N.S.S.M.A.L.), Campus Universitaire de Dely Ibrahim Bois des Cars, Dely Ibrahim, 16320, Alger, Algeria

<sup>b</sup> SNC-LAVALIN, 275 rue Benjamin Hudon, Saint-Larent, Québec, Canada



## ARTICLE INFO

## Keywords:

Cherchell coastal aquifer  
Vulnerability mapping  
Marine intrusion  
GALDIT method  
GIS  
Algeria

## ABSTRACT

Located in the south of the western Mediterranean, in the central Algerian region, the Cherchell coastal aquifer has participated over time in the economic development of the region (agriculture and seaside tourism). The construction of the Boukerdene dam in the watershed of the region, thus the exploitation of the aquifer in response to the excessive demand of agriculture and the potable water supply, has caused the piezometric level of the aquifer to decline and threatens its sustainability and makes it more vulnerable to marine intrusion, noting that no work has been realized in this study area despite the inestimable value of this aquifer in the region, it's the only aquifer in Cherchell town. The aim of this paper is to map the vulnerability of this aquifer to marine intrusion, based on the proven methodology of the GALDIT model for coastal aquifers combined with Geographic Information Systems (GIS). The GALDIT methodology requires six input parameters: groundwater occurrence (G), aquifer hydraulic conductivity (A), groundwater head above sea level (L), distance from the shore (D), impact of the existing status of seawater intrusion l'impact (I), and thickness of the aquifer (T).

The results indicate low to moderate vulnerability upstream and high vulnerability downstream. This high vulnerability can be as much as 700 m from shoreline inland. This vulnerability is mainly due to the hydrological disruption linked to the construction of the Boukerdene dam, which reduces surface water inflows. These results provide a basic tool for local managers and decision-makers, for future management and protection strategies for the Cherchell area aquifer in the face of marine intrusion.

### 1. Introduction

Coastal zones are socio-economic components of significant importance for the present and the future. Human interactions affect these fragile environments and threaten their sustainability, such as freshwater aquifers. Coastal aquifers are major sources of freshwater provision, especially in low precipitation areas. Groundwater reserves are mostly very stable because the groundwater flow time is very slow (Niazi, 2007). However, this precious resource is threatened by excessive exploitation and decreasing piezometric levels, hence the possibility of being contaminated by the intrusion of marine water intrusion (Niazi, 2007). In addition to climate change impacts, like low precipitation and expected sea level rise, the salinity of coastal aquifers could increase (Medejerab and Henia, 2011; Szczypta, 2012). This hazard has been the subject of several studies around the world; India (Chachadi et al.,

2003), Portugal (Lobo-Ferreira et al., 2003), USA (Tasnim and Tahsin, 2016; Moghaddam et al., 2019), Morocco (Niazi, 2007; Batchi, Karkouri et al. 2014, 2017), Tunisia (Saidi et al., 2011). Algeria is not exempt from this risk and many studies have been carried out in recent years to assess the vulnerability of coastal aquifers to marine intrusion, citing Guerbes-Annaba (Guezgouz n and Bouhsina), El Nador-Tipaza (Bouderbala et al., 2016), Mitidja (Djouder et al., 2017), Bouteldja-El Taref (Hallal et al., 2019), Souk el Thenine-Bejaya (Boudjelil and Djafari, 2018), Collo-Skikda (Mahrez et al., 2018; Djabri et al., 2019). Algeria has considerable groundwater freshwater reserves. Its reserves are estimated at about 8.5 billion m<sup>3</sup>, of which 2.5 billion in the northern regions and 6 billion in the Sahara, these resources are considered non-renewable (Mahrez et al., 2018). The increasing use of these waters exposes them to greater vulnerability to overexploitation and contamination (Baghvand et al., 2010), particularly in the coastal zone, which is

\* Corresponding author.

E-mail addresses: [amarninadia@hotmail.com](mailto:amarninadia@hotmail.com) (N. Amarni), [lounes15@live.fr](mailto:lounes15@live.fr) (L. Fernane), [naili40mohammed@hotmail.com](mailto:naili40mohammed@hotmail.com) (M. Naili), [louna.ryhane@gmail.com](mailto:louna.ryhane@gmail.com) (R. Lounas), [belkessarabah@yahoo.fr](mailto:belkessarabah@yahoo.fr) (R. Belkessa).

<https://doi.org/10.1016/j.gsd.2020.100481>

Received 26 September 2019; Received in revised form 21 July 2020; Accepted 4 September 2020

Available online 12 September 2020

2352-801X/© 2020 Elsevier B.V. All rights reserved.

home to 85% of the country's population (Djabri et al., 2019).

The alluvial plain of Cherchell, in the north-central region of Algeria, on the coast of the western Mediterranean, is one of the coastal areas characterized by agricultural and tourist activities. The choice of this area comes in response to the hydrological disturbances that the region is seeing after the construction of the Boukourdene dam in 1992 in the sub-watershed of the region, about 11 km from the coast and 3 km from the aquifer. This dam blocks the water that has flowed into this watershed, inhibiting the flow of water and the feeding of the aquifer, thus its discharges containing fine fractions plug up the soil pores by stopping the infiltration of water into the soil and thus the replenishment of the aquifer. This is confirmed by the decline in piezometric levels (Tadrist et al., 2016) and seawater intrusion. Mapping the vulnerability of the Cherchell coastal aquifer to marine intrusion is a major concern in terms of land-use planning and groundwater protection, no similar studies have been carried out on the Cherchell area aquifer. The methodology adopted in this work is based on the proven methodology of the GALDIT model for coastal aquifers (Chachadi and Lobo-Ferreira, 2001a,b) and modified by the same authors in 2005. This method permits the assessment of the sensitivity and quality of coastal groundwater by determining the intrinsic characteristics of the aquifer (Lobo-Ferreira and Chachadi, 2005). This model requires six parameters: Groundwater occurrence (G), Aquifer hydraulic conductivity (A), depth to groundwater Level above sea (L), Distance from the shore (D), Impact on existing status of sea water intrusion (I), Thickness of the aquifer (T). These parameters are then incorporated into a Geographic Information System (GIS), which is a very good tool to help the decision. The marine intrusion vulnerability map obtained for the Cherchell aquifer, serves to identify the parts of the aquifer most vulnerable to marine intrusion, and forms a basic tool for local managers and decision-makers, for future management decision, and for the protection of the Cherchell aquifer from marine intrusion.

## 2. Overview of Saline Intrusion vulnerability in coastal aquifers

In general, the term vulnerability refers to the potential degree of harm that can be expected based on the characteristics of an element at risk in relation to a certain hazard (Varnes, 1984). In the field of water resources, the term vulnerability is used in the context of evaluating the performance of systems as defined by (Hashimoto et al., 1982). These authors define three concepts of system performance: *the probability of system failure in relation to its reliability; the speed of return of the system satisfactory state after its failure is expressed by its resilience, and the severity of the consequences of a failure measured by its vulnerability*. This concept of vulnerability may be used in the context of groundwater intrusion into groundwater "system failure" through over-exploitation of groundwater "severity of consequences" affecting water quality as a resource. In our context, the vulnerability of coastal aquifers to marine intrusion is that which incorporates the intrinsic characteristics of the aquifer, and for the most part escapes human factors. It is therefore proposed to redefine the vulnerability of groundwater to the intrusion of seawater, in accordance with the conclusions and recommendations of the International Conference on the Vulnerability of Groundwater to Saline Intrusion, held in 1987 in the Netherlands (Andersen and Gosk, 1987; Duijvenbouden and Van Waegeningh, 1987): *as follows the sensitivity of groundwater quality to imposed groundwater pumping or sea-level rise, or both, in the coastal belt, which is determined by the intrinsic characteristics of the aquifer*.

## 3. Description of the study area

### 3.1. Geographical overview

The Cherchell aquifer is located about 20 km west of the chief town of the wilaya of Tipasa and 76 km from the capital Algiers. It is bordered to the north by the Mediterranean Sea, to the south by Djebel Boumaad,

to the east by the Chenoua massif and to the west by the town of Cherchell (Fig. 1a, Fig. 1b).

Latitude: 36° 36'56.757 "N and 36° 33'23.601" N.

Longitude: 2° 15'3.069 "E and 2° 19'4.167" E.

### 3.2. Hydrogeological overviews

The Cherchell aquifer is 8 km long and covers an average area of 13 km<sup>2</sup> (1300 ha), its water reservoir is 44 hm<sup>3</sup>, but its capacity is 200 hm<sup>3</sup>, the aquifer's renewal time is 9.48 years (Mancet, 1972), the hydraulic gradient varies from 10‰ to 22‰ and its permeability varies from  $6 \times 10^{-4}$  to  $1.2 \times 10^{-2}$  m/s (Mancet, 1972), transmissivity varies from  $10^{-3}$  and  $5 \times 10^{-3}$  m<sup>2</sup>/s (Mancet, 1972). The exploitable reservoir of the aquifer (Q) is from 50 m<sup>3</sup>/h to 100 m<sup>3</sup>/h in the south and centre and from 10 m<sup>3</sup>/h to 50 m<sup>3</sup>/h in the north (Mancet, 1972). Piezometric levels above sea level increase from North to South, ranging from 0.8 m in the North and 16 m in the South (Mancet, 1972). Two directions of flow exist, the most important follows the direction of flow of the wadi in the SE-NW direction, the other in the S-N direction by feeding the aquifer of the western sector from the Gouraya carbonate massif (Mancet, 1972). The piezometric curves converge lightly to the center of the aquifer (Fig. 2), indicating the replenishment of the aquifer by the borders (Mancet, 1972). The aquifer's reservoir thickness varies from 5 m in the north to 20 m in the south, but it exhibits a relatively rapid response to the different impulses since it is only replenished by rain-water infiltration and runoff water from the piedmonts during rainy periods (Maamar 2004) and by releases from the Boukerdene dam during the summer period and by overflow of irrigation water (Tadrist et al., 2016). After the construction of the Boukerdene dam in the region's watershed, runoff water is stored in the dam, inhibiting the replenishment of the aquifer. The aquifer is sometimes free, at other times confined, under a clay or marl cover of variable thickness not exceeding 20 m (unconfined in the South between Bou Aroua and Zurich and confined in the North) (Mancet, 1972).

### 3.3. Geological overview

All the studies carried out on the Cherchell Plain show that the only formation of particular interest from a hydrogeological viewpoint is illustrated by the Plio-Quaternary alluvial deposits of the El Hachem Wadi Plain. The aquifer consists of pebbles and gravel with red clay with pebbles at the top and sandy clay with some intercalation of gravel beds at the base. The whole rests on an impermeable substratum consisting essentially of Cretaceous marls and Eocene limestones (Maamar 2004). The formations of the aquifer are covered by highly erodible sedimentary rocks, which are at the origin of the high sensitivity of the soils in the region. These are mostly limestone, shale, soft marls and shale (Fig. 3a). Its deposits coming from the slopes of Chenoua and the reliefs of Djebel Boumaad (Maamar 2004).

Electrical prospecting conducted by the Compagnie Générale de Géophysique in 1996 in the Cherchell Plain showed the existence of several electrically distinct terrains (Fig. 3b):

- Pliocene substratum with a resistivity of 3 Ohm.m;
- A approximate resistivity level of 50–60 Ohm.m and a thickness of 3–14 m represented by the aquifer reservoir;
- A fine upper level of resistivity that varies from 5 to 10 Ohm.m indicating a finer material with a thickness of 17 m, with rude passages to the centre of the plain.

### 3.4. Climatological overview

Cherchell is characterized by a sub-humid Mediterranean climate that is relatively cold and humid in winter, hot and dry in summer. The average temperature fluctuates between 11 and 26 °C, but the minimum and maximum temperatures are 6 °C in winter (January and February),

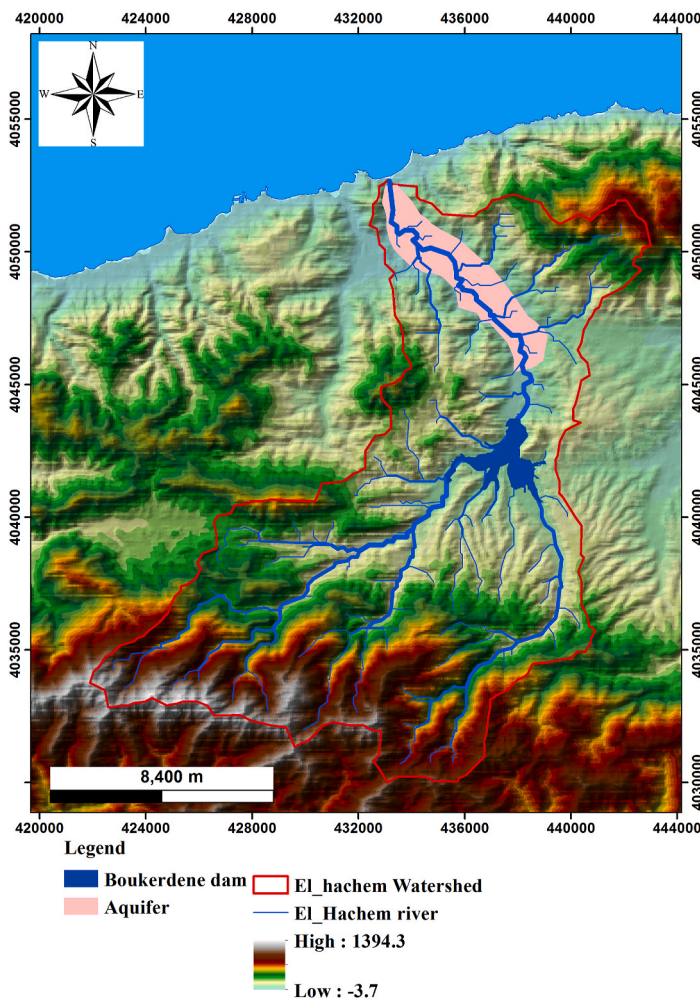
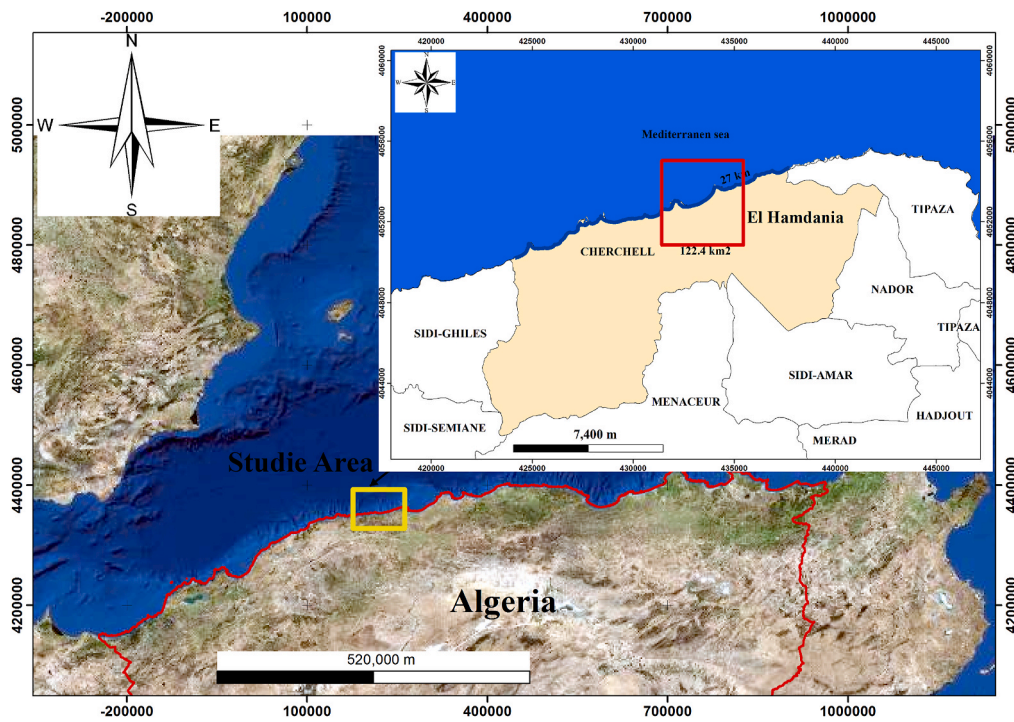


Fig. 1. a: Location of the Study Area in the Cherchell region b: Topographic situation of the Cherchell aquifer in the watershed.

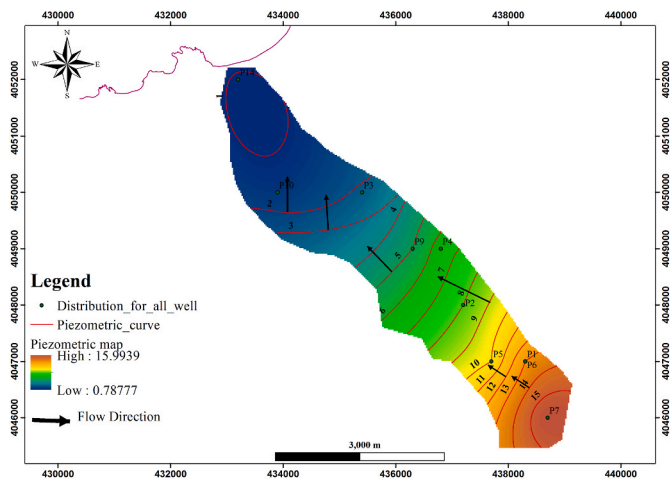


Fig. 2. Groundwater flow direction, piezometric distribution and distribution of measuring points (wells) in the Cherchell Coastal Aquifer.

33 °C in summer (July and August) for the period from 1998 to 2015 according to the National Water Resources Agency (Khadidja, 2018). The coastal area is more humid compared to the rest of the territory, due to its exposure to maritime flows. This precipitation is abundant, irregular and unequally distributed, sometimes very severe depending on the month or the years, varying from 370.12 mm/year to 714.79 mm/year with an average of 573.68 mm/year for the period 2000 to 2015 (ANRH in Khadidja, 2018). The seasonal distribution of rainfall is about 43% in winter, 28% in autumn, 27.5% in spring and only 1.5% in summer (ANRH in Khadidja, 2018).

The Cherchell region is part of the large Algiers coastal watershed, more precisely the West Algiers Coast, in the Cherchell coastal sub-watershed (02–03), according to the Algiers ANRH code (ANRH in Khadidja, 2018). Oued El Hachem originates in the mounts of djebel Boumaad at about 1400 m of altitude, takes a submeridian direction (S–N), it has a watershed with a surface area of 224 Km<sup>2</sup> and a perimeter of 80 Km and a length of about 39 Km. This wadi crosses the Cherchell Plain and flows into the sea, including the downstream part of the aquifer at Hamdania Beach.

The Boukourdene dam is situated at an altitude of 74 m, implanted in 1992, on the bed of El Hachem wadi, 11 km south of the Cherchell coastline and 3 km from the upstream limit of the Cherchell aquifer. It receives rainwater from the watershed, 20 hm<sup>3</sup>/year of water and 0.21 hm<sup>3</sup>/year of sediment (Tadrist et al., 2016), but its water capacity is 80 hm<sup>3</sup>. The water depth is 102 m, but the total dam height is 123 m (Tadrist et al., 2016).

#### 4. Data and methods

The method that addresses the need for the study is based on the GALDIT model destined for coastal aquifers. It was first developed during the “EU- India INCO-DEV COASTIN” project (Mahrez et al., 2018), whose objective was to determine the vulnerability of coastal aquifers to marine intrusion by (Chachadi and Lobo-Ferreira, 2001a,b) and improved by the same authors in 2005. The main condition for application of the GALDIT method is that the bottom of the aquifer(s) is below the mean sea level (Chachadi, 2005). This method is based on hydrogeological, hydrological and geomorphological characteristics of the aquifer studied (Chachadi and Lobo-Ferreira, 2001a,b; Chachadi et al., 2003; Chachadi and Lobo Ferreira, 2007). This method is a mapping approach, simple to use, represent measurable parameters for which data are generally available from various sources without detailed knowledge, serve to map the parts of an aquifer most vulnerable to marine intrusion, and represent a basic tool for local managers and decision-makers for future decisions to manage and protect an aquifer

from marine intrusion, which has motivated many researchers around the world to follow this method for the development of their work (Guezgouz n and Bouhsina; Niazi, 2007; Najib et al., 2012; Batchi et al., 2014; Bouderbala et al., 2016; Trabelsi et al. 2016; Djoudar et al., 2017; Boudjelil and Djafari, 2018; Kazakis et al., 2018; Mahrez et al., 2018; Djabri et al., 2019). The different parameters required in the GALDIT model and the data used to map each GALDIT parameter for the Cherchell aquifer are as follows:

- **Parameter G (Groundwater occurrence);** groundwater is found in geological strata, either confined, unconfined or semi confined. The Cherchell aquifer is unconfined in the south between Zouriche and Bouaroua, and confined in the north (Mancet, 1972).
- **Parameter A (Aquifer hydraulic conductivity);** is the permeability of a soil or rock to water under the effect of a hydraulic gradient (Castany 1982a, 1982b). The higher the hydraulic conductivity facing the sea, the higher the risk of marine intrusion.

The hydraulic conductivity of an aquifer is the ratio between transmissivity and thickness of aquifer (Mahrez et al., 2018).

$$K = \frac{T}{b}$$

- K: Hydraulic conductivity (m/day);
- T: Aquifer transmissivity (m<sup>2</sup>/day);
- b: Aquifer thickness (m).

The hydraulic conductivity calculated for the Cherchell aquifer varies between 10 and 22 m/day.

- **Parameter L (Depth to groundwater level above sea);** is a very important factor in assessing the marine intrusion of a coastal aquifer because it determines the hydraulic pressure available to move the seafont. As the piezometric level decreases and reaches its minimum levels above sea level, vulnerability to marine intrusion increases. Piezometric levels above sea level increase from north to south, ranging from 0.8 m in the north to 16 m in the south.
- **Parameter D (Distance from the shore);** the impact of marine intrusion decreases as one distance inland from the nearshore. This parameter is measured by the topographic map of the region.
- **Parameter I (Impact on existing status of sea water intrusion);** it is calculated by the ratio  $Cl / (HCO_3 + CO_3)$  (Chachadi, 2005). As this ratio increases, vulnerability to marine intrusion increases (Revelle, 1941). (i) areas intruded by seawater in all seasons where the  $Cl / (HCO_3 + CO_3)$  ratio in groundwater is greater than 2, (ii) areas with predominantly seasonal marine intrusion where the  $Cl / (HCO_3 + CO_3)$  ratio in groundwater is between 1.5 and 2, and (iii) areas where no marine intrusion has been observed in the past the ratio  $(Cl / (HCO_3 + CO_3))$  in groundwater is less than 1.5 (Chachadi, 2005).

Data on the parameters of this ratio can be found in (Table 1).

- **Paramètre T (Thickness of the aquifer);** the great thickness of a coastal aquifer makes it sensitive to marine intrusion. The thickness of the Cherchell aquifer is 5 m in the north and 20 m in the south (Mancet, 1972).

Each indicator is characterized by its own gradient, scale and weighting (Chachadi and Lobo Ferreira, 2007) (Table .2).

- **Indicator strength:** The weight of an indicator represents the relative importance of the indicator in the marine intrusion process. The most significant indicators have weights of 4 and the least important of 1 indicating a parameter of lesser importance in the marine intrusion process (Chachadi and Lobo Ferreira, 2007).

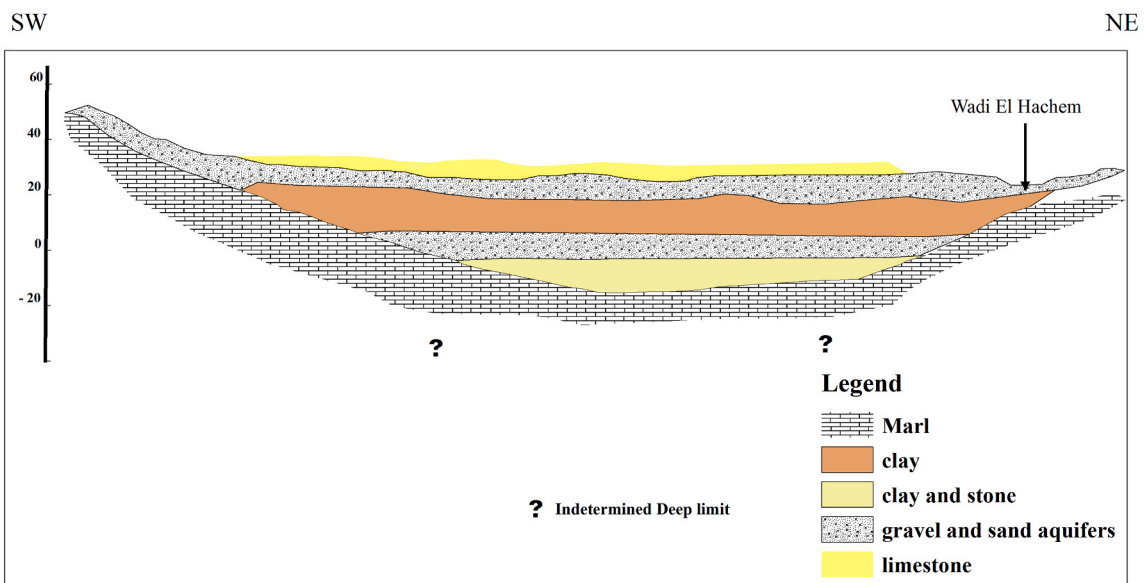
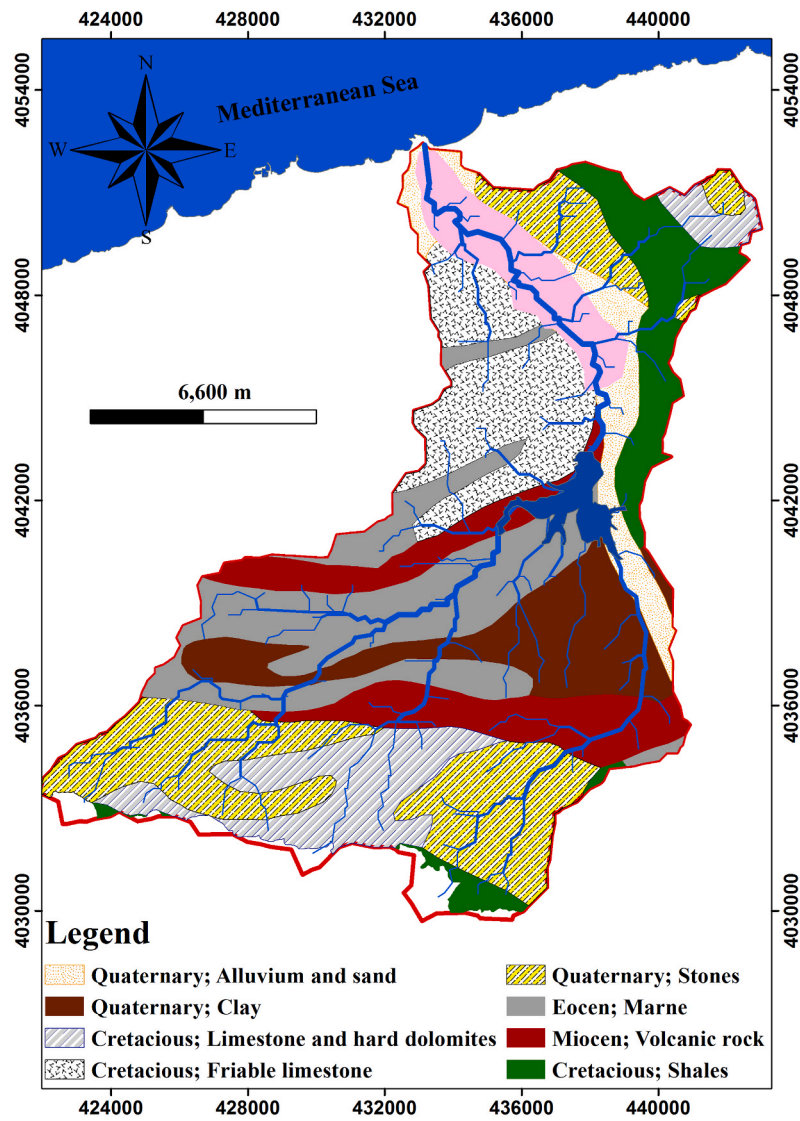


Fig. 3. a: Geological background of Cherchell watershed. b: Geophysical section in the downstream captive part of the Cherchell aquifer from (Maamar 2004).

**Table 1**  
Physico-chemical parameters of groundwater in the Cherchell aquifer.

Wells	Cl <sup>-</sup> (mg/l)	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	CO <sub>3</sub> <sup>-2</sup> (mg/l)
P1	195	549	30.76
P2	186	519	7.28
P4	227	549	7.75
P5	178	397	22.09
P6	221	534	30.07
P7	127	442	9.79
P9	103	503	17.63
P10	175	564	19.95
P14	330	283	16.01
P16	229	549	9.77

**Table 2**  
GALDIT parameters according to (Chachadi and Lobo Ferreira, 2007).

Facteur	Weight/rating	Very low 2.5	Low 5	Moderate 7.5	Hight 10
Groundwater occurrence	1	Bounded Aquifer	Semi-captif	libre	captif
Aquifer hydraulic conductivity (m/day)	3	<5	5–10	10–40	>40
Depth to groundwater level above sea (m)	4	>2	1.5–2	1–1.5	<1
Distance from the shore (m)	4	>1000	750–1000	500–750	<500
Impact on existing status of sea water intrusion	1	<1	1–1.5	1.5–2	>2
Thickness of the aquifer (m)	2	<5	5–7.5	7.5–10	>10

- **Importance Level:** Each of the indicators is subdivided into variables according to the specified attributes to determine the relative importance of the variable in question on the marine intrusion process. Importance scores range from 2.5 to 10. A high importance score indicates a high vulnerability to marine intrusion (Chachadi and Lobo Ferreira, 2007).
- **Decision Criteria:** The total sum of individual indicator scores resulting from multiplying the importance rating values by the corresponding indicator weights, then dividing the sum obtained by the sum of the weights used, which is 15. Higher importance values of the variable correspond to aquifers that are more vulnerable to marine intrusion (Chachadi and Lobo Ferreira, 2007).

This GI vulnerability index of coastal aquifers to marine intrusion according to the formula of (Chachadi and Lobo Ferreira, 2007) is as follows

$$IG = \frac{1G + 3A + 4L + 4D + 1I + 2T}{15}$$

Once the GALDIT index is calculated, it is possible to identify the area's most probably sensitive to marine intrusion in relation to each other. The GALDIT index values range from 2.5 to 10. The higher values indicate that the potential for marine intrusion is high (Chachadi and Lobo Ferreira, 2007).

- GI < 5: Low vulnerability;
- 5 < GI < 7.5: Moderate vulnerability;
- GI > 7.5: High vulnerability.

The GIS software Arcgis 10.2 was used for the realization of the various vulnerability maps for each parameter and the final vulnerability map due to the combination of the six parameters.

## 5. Results

The six parameters of the GALDIT index were calculated to determine the vulnerability of the Cherchell aquifer to marine intrusion. Various maps were developed.

### 5.1. Groundwater occurrence (G)

The occurrence of groundwater in geological formations reflects the type of aquifer, which can be either confined (captive), semi-confined (semi-captive) or unconfined. Therefore, the unconfined aquifer, which is frequently subject to intensive pumping, is much more subject to marine intrusion than the semiconfined aquifer (Chachadi and Lobo Ferreira, 2007). According to the geophysical survey carried out in the region in 1996, the Cherchell aquifer is unconfined in the south and confined in the north, the confinement layer is composed of clay and limestone. Thus the model assigns a value of 10 for the confined downstream section of the aquifer and 7.5 for the unconfined upstream section (Fig. 4).

### 5.2. Aquifer hydraulic conductivity (A)

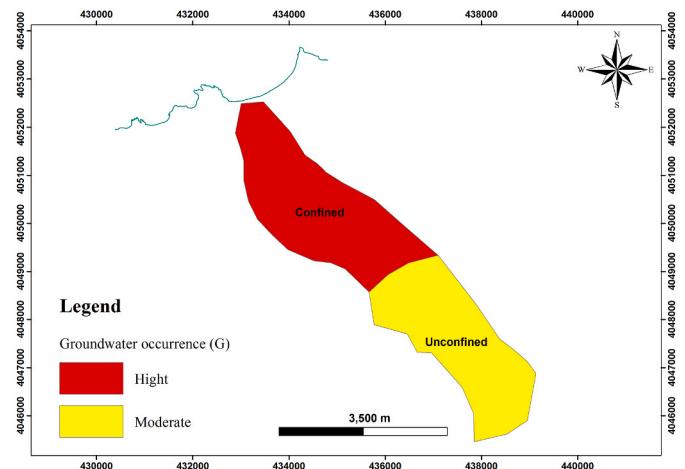
Aquifer hydraulic conductivity, is considered a measure of the speed of water movement through the saturated zone. The magnitude of seawater front movement is influenced by Aquifer hydraulic conductivity (Chachadi and Lobo-Ferreira, 2001a,b; Lobo-Ferreira and Chachadi, 2005), the higher the hydraulic conductivity, the greater the risk of marine intrusion. The values obtained by the calculation of Aquifer hydraulic conductivity of Cherchell range from 10 to 22 m/d. Therefore a value of 7.5 is assigned to this parameter (Fig. 5).

### 5.3. Depth to groundwater level above sea (L)

Depth to groundwater level above sea, is directly dependent on the piezometric conditions of the aquifer under study. The Cherchell aquifer is located at depths above sea level ranging from 0.8 m in the North and 16 m in the South (Fig. 6), therefore values of 2.5, 5, 7.5 and 10 have been assigned for Depth to groundwater level above sea, for piezometric levels >2 m, 2–1.5 m, 1.5–1 m and <1 m respectively (Figs. 2 and 6).

### 5.4. Distance from the shore (D)

The impact of marine intrusion tends to decrease as one moves inland at right angles to the shoreline (Chachadi, 2005). The Cherchell aquifer is in direct contact with the sea (Hamдания beach) and extends 8



**Fig. 4.** Application of the GALDIT method to the Cherchell aquifer, representation of Aquifer type (G).

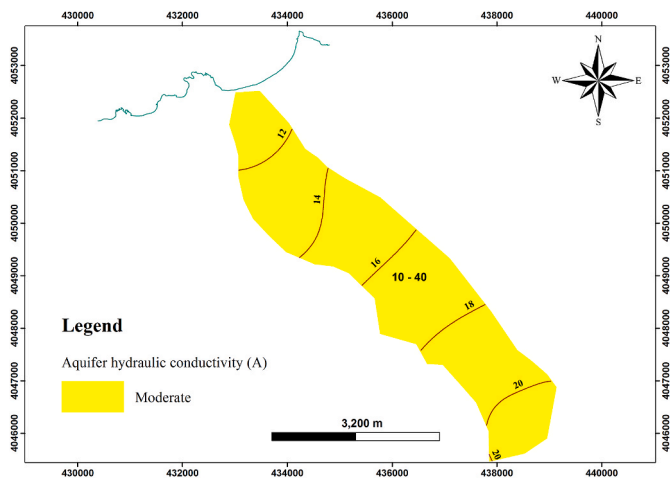


Fig. 5. Application of the GALDIT method to the Cherchell aquifer, representation of Aquifer hydraulic conductivity (A).

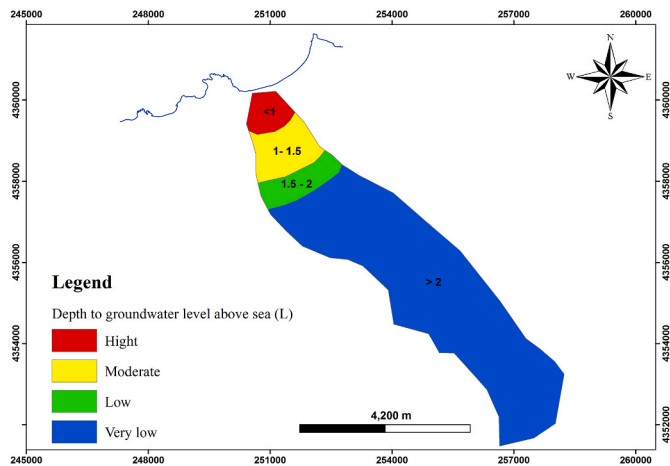


Fig. 6. Application of the GALDIT method to the Cherchell aquifer, representation of Depth to groundwater level above sea (L).

km inland. As a result, values of 2.5, 5, 7.5 and 10 have been assigned to distances >1000 m, 750 m–1000 m, 500 m–750 m and <500 m of shoreline respectively (Fig. 7).

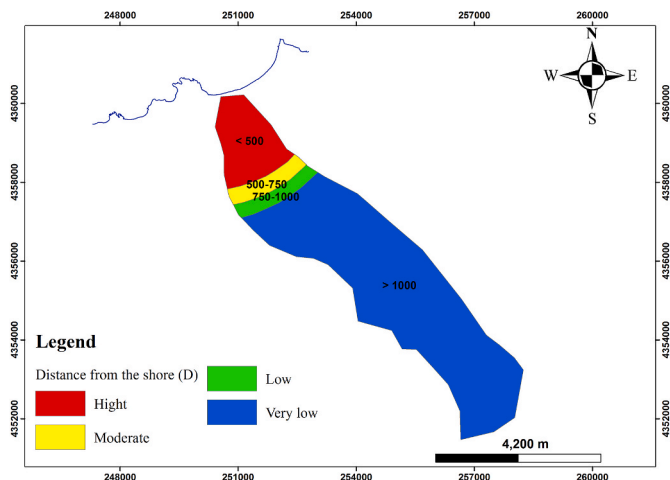


Fig. 7. Application of the GALDIT method to the Cherchell aquifer, representation of Distance from the shore (D).

### 5.5. Impact on existing status of sea water intrusion (I)

The existing imbalance in the seawater/freshwater interface should be taken into consideration when mapping the vulnerability of the aquifer to marine intrusion (Chachadi, 2005). Chloride is the dominant ion in seawater and available in small concentrations in freshwater, whereas bicarbonates are characteristic of freshwater and are found in very small concentrations in seawater (Chachadi, 2005). The ratio  $Cl^- / (HCO_3^- + CO_3^{2-})$  permits the identification of the extent of marine intrusion into coastal aquifers (Chachadi, 2005). As the value of this ratio increases, the risk of marine intrusion into the aquifer increases. The results of this ratio vary from 0.19 to 1.10 for the Cherchell aquifer. Thus a value of 2.5 is assigned to ratio values < 1 and a value of 5 is assigned to ratio values > 1 (Fig. 8a, Fig. 8b and 8c).

### 5.6. Thickness of the aquifer (T)

This factor is referred to as an amplifier of the magnitude of marine intrusion in coastal areas. Indeed, the greater the thickness of the aquifer, the greater the extent of marine intrusion (Chachadi and Lobo Ferreira, 2007). (Mancet, 1972) reports that the thickness of the Cherchell aquifer is 5 m at the downstream limit and increases to 20 m upstream. The values attributed to this parameter are: 2.5, 5, 7.5 and 10 for a Thickness of the aquifer <5 m, 5 m–7.5 m, 7.5 m–10 m and >10 m respectively (Fig. 9).

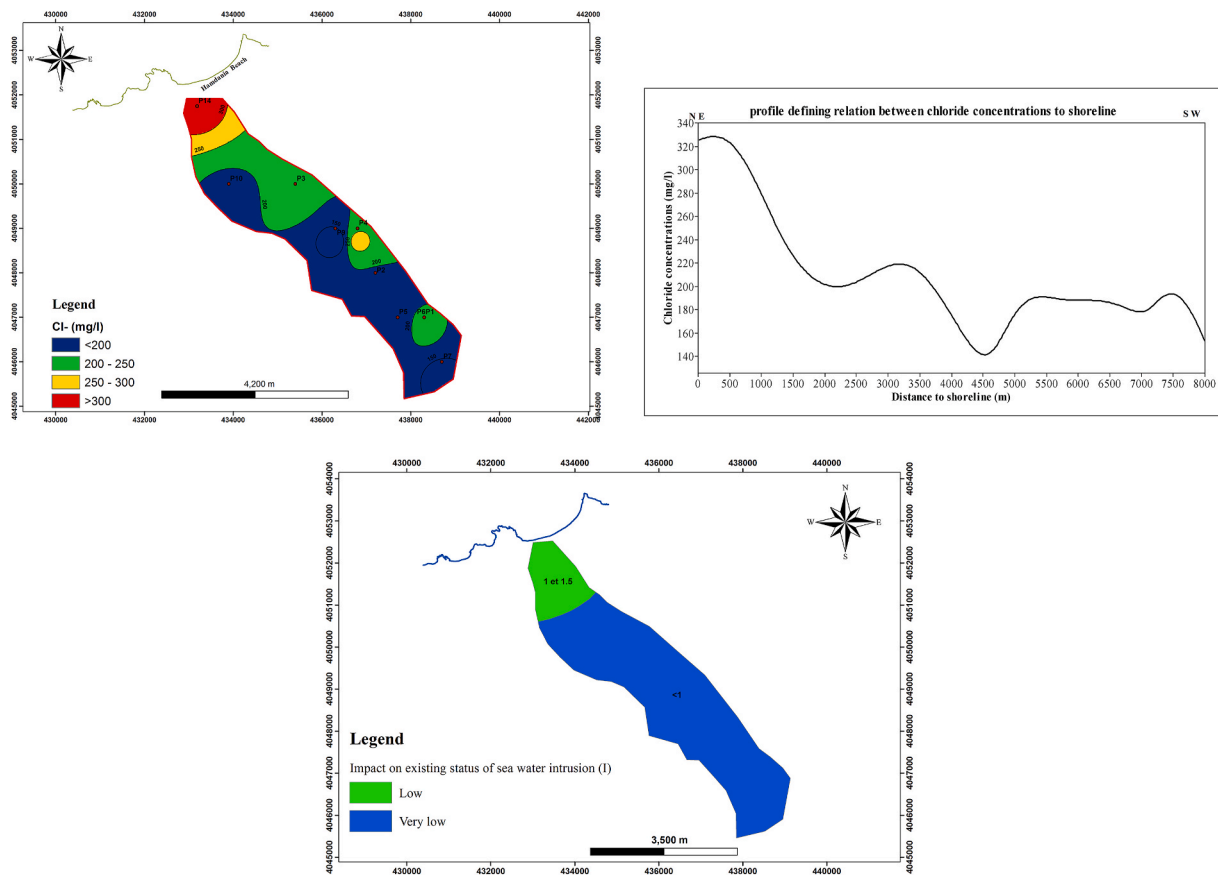
### 5.7. Calculation of the GALDIT index for the Cherchell Aquifer

The six indices calculated were used to develop several layers and the overlaying of these layers in a Geographic Information System (GIS) allowed the production of the final vulnerability map of the Cherchell aquifer to marine intrusion. This GALDIT map permits the identification of significant and sensitive areas that could be impacted by marine intrusion (Fig.). The values of this GALDIT index vary between 4.83 and 8.5 with three distinct classes (<5, 5–7.5, >7.5) representing respectively low, moderate and high vulnerability to marine intrusion (Fig. 10).

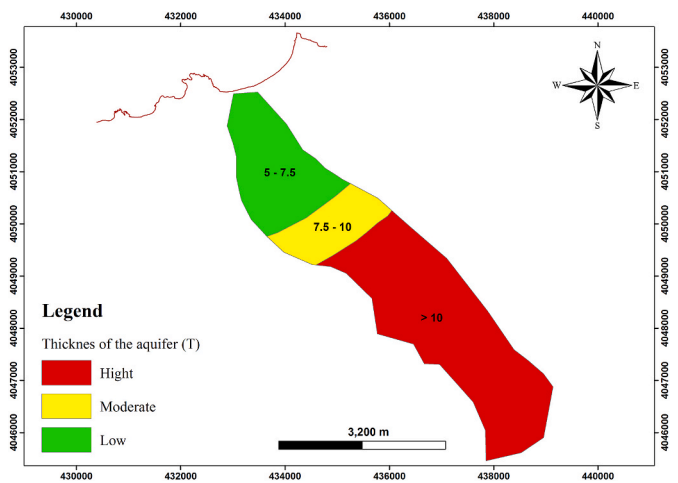
- **Highly Vulnerable Area:** Typical of the littoral fringe where the aquifer is of a confined nature, thus the low piezometric level above sea level (<1m), added to its low distance from the sea (500 m) and the thickness of the aquifer which is 5 m proximate to the sea, which makes it highly exposed to upwelling salt water. This zone extends over an area of 54 ha (4.2%), and is 800 m long inland. This area is highly threatened by the rapid rise of salt water, given the sandy nature of the region, which remains vulnerable throughout the northern part.
- **Moderately Vulnerable Area:** Describes the centre of the aquifer, coinciding with a modest piezometry between 1 and 2 m above sea level. This zone is used for modern agriculture, which is very demanding in terms of water consumption. The plain is relatively large at these points (about 60 m), which makes it very much solicited by modern agriculture, and thus the depletion of the aquifer, by the overexploitation of its water reservoir, which makes it vulnerable to saltwater upwelling. The area covered by this zone is 305 ha, corresponding to (23.4%) of the aquifer.
- **Low Vulnerability Area:** Distinctly characterized by its significant distance from the shoreline (about 2.5 km), and its piezometric level which is > 2 m above sea level, allowing it to function as an aquifer feed zone. As such, it contributes to maintaining the hydrodynamic balance of the aquifer. This zone has an aquifer area of 942 ha (72.4%).

## 6. Discussion

The GALDIT methodology has been applied in the Cherchell region



**Fig. 8.** a: Distribution of  $Cl^-$  concentrations over the Cherchell aquifer b: Pattern of variation of  $Cl^-$  concentrations relative to the shoreline. c: Application of the GALDIT method to the Cherchell aquifer, representation of Impact on existing status of sea water intrusion (I).



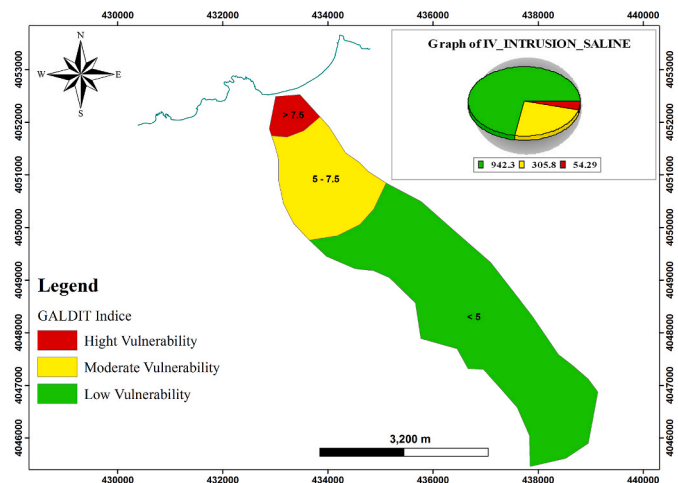
**Fig. 9.** Application of the GALDIT method to the Cherchell aquifer, representation of Thickness of the aquifer (T).

to assess the vulnerability of the region’s coastal aquifer to marine intrusion. The area of high vulnerability covers 4.5% of the total area of the aquifer. This high vulnerability area extends 800 m landward.

23.4% of the aquifer surface area has moderate vulnerability, while the largest component of the aquifer (72.1%) has low vulnerability to marine intrusion.

The final vulnerability map is in accordance with the hydro-geological system of the Cherchell Coastal Aquifer.

Present groundwater usage practices, which are marked by over



**Fig. 10.** GALDIT marine intrusion vulnerability map of the Cherchell coastal aquifer.

pumping of groundwater and the decline of surface water supplies; induce a significant drawdown of the aquifer, which in turn reverses the flow of groundwater from the coast to the inland, resulting in an increase in chloride ( $Cl^-$ ) concentration downstream.

Soil fertilization and the sub-humid Mediterranean climate lead to a high interest in agricultural activities, which are the main economic sector in the region.

The variation of shapes (mountain, plain, forest, sandy beaches and cliffs) allows the region to offer a panoramic view. The very rich and

original cultural patrimony (Roman, Byzantine and colonial ruins), qualifies it as a tourist pole of great importance, hosting annually about 24 million summer visitors, from which 6 million choose the site El Hamdania downstream of the Cherchell aquifer, which is the reason for the increase in water demand.

The setback of the El Hamdania beach coastline downstream of the aquifer, due to the deficit of solid inputs sequestered in the dam (Tadrist et al., 2016), seems to be another harm to the aquifer, as it decreases its distance from the sea. This conditions increase the vulnerability of the aquifer to marine intrusion.

The major problem of the site is the volume of water supplied to the aquifer, the deficit of water flow is linked to the installation of the Boukerdene Dam in the sub-watershed of the region, which stops the flow of runoff water from the piedmont, reducing the amount of water infiltrated into the soil and inhibiting the feeding of the aquifer. In addition, the impact of climate change, such as low precipitation and predicted rise in sea level, could increase the salinity of coastal aquifers (Mahrez et al., 2018). However, feeding of the aquifer by superficial water should be necessary to achieve balance. Artificial channels should be established to supply the aquifer by over-damming during periods of flooding, so that the release of pores by lacrimation of the upper soil in order to enhance water infiltration and replenishment of the aquifer, strengthening the groundwater reserves and pushing the saltwater towards the sea. Supervision of well depths, which should not exceed the surface layer of the aquifer, so as not to exhaust the aquifer and avoid salt wedging. The transition of modern agriculture to water-saving cultures. The supply of El Hamdania beach with solid that comply with standards appears necessary to stop the sea rise, which threatens the sustainability of the aquifer. Implementation of detailed monitoring plans in the most vulnerable areas, thus the aquifer pumping rate should be reduced.

For a successful protection of the aquifer quality, monthly assessments are needed to understand the behaviour of the aquifer with surface changes and to decide on the right type of protection to be considered.

## 7. Conclusion

The GALDIT method was applied to assess marine intrusion into the Cherchell aquifer. The final map highlights that the littoral zone of the aquifer exhibits high vulnerability to marine intrusion, while the rest of the area is characterized by low to moderate vulnerability.

Some parameters, such as aquifer type, groundwater level, distance from the shoreline, and thickness of the aquifer, have the highest amplitude, while the current state of the aquifer was found to be a lower index. Overexploitation of groundwater resources and poor supply is the major problem, though a management plan will be adopted. An assessment of all possible anthropogenic activities impacts seems necessary in order to identify all sources of salinisation. Marine intrusion may have adverse effects on the overall environmental system of the coastal zone as it will affect soils and fresh groundwater, which are valuable for the population.

Overall, the map obtained by mapping the vulnerability of the Cherchell aquifer to marine intrusion provides an important database for future aquifer management decisions. In this light, the longterm sustainable exploitation of the Cherchell Aquifer is the main objective, as it is the only aquifer in the region.

Lastly, we recommend that the GALDIT vulnerability maps be updated regularly, using GIS technology to allow continuous assessment and monitoring to understand the behaviour of the aquifer over time.

The GALDIT methodology allows a clear view of the state of the aquifer, but it is not able to identify all sources of salinisation.

## Declaration of competing interest

The authors declare that they have no known competing financial

interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

## Appendix A. Supplementary data

Supplementary data to this article can be found online at <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2020.100481>.

## References

- Andersen, L., Gosk, E., 1987. Applicability of vulnerability maps. W: The vulnerability of soil and Groundwater pollution (red. W. Van Duijvenbooden, HG van Waegeningh): 321–332. In: Proceedings of International Conference. TNO.
- Baghvand, A., Nasrabadi, T., et al., 2010. Groundwater quality degradation of an aquifer in Iran central desert. *Desalination* 260 (1–3), 264–275.
- Batchi, M., Karkouri, A., et al., 2014. Cartographie de la vulnérabilité à l'intrusion marine de l'aquifère Côtier de Mnasra (littoral du Gharb, Maroc-Nord-Occidental). *Mar Sci Coast Res J* 11.
- Batchi, M., Karkouri, J.A., et al., 2017. Étude comparative de deux modèles (DRASTIC et SI) pour l'évaluation de la sensibilité de la nappe phréatique de Mnasra (Maroc nord-Occidental) à la pollution d'origine agricole. *Physio-Géo. Géographie physique et environnement* 11, 43–64.
- Bouderbala, A., Remini, B., et al., 2016. Assessment of groundwater vulnerability and quality in coastal aquifers: a case study (Tipaza, North Algeria). *Arabian Journal of Geosciences* 9 (3), 181.
- Boudjelil, E.-h., Djafari, A.K., 2018. Etude de la vulnérabilité à la pollution de la nappe superficielle de Souk El Tenine par la méthode GALDIT.
- Castany, G., 1982a. Bassin sédimentaire du Sahara septentrional (Algérie-Tunisie). Aquifères du continental intercalaire et du complexe terminal. *Bull. BRGM* 2 (2), 127–147.
- Castany, G., 1982b. Principes et méthodes de l'hydrogéologie (Bordas).
- Chachadi, A., 2005. Seawater intrusion mapping using modified GALDIT indicator model: a case study in Goa.
- Chachadi, A., Lobo Ferreira, J., 2007. Assessing Aquifer Vulnerability to Seawater Intrusion Using GALDIT Method (Part).
- Chachadi, A., Lobo-Ferreira, J., 2001a. Sea water intrusion vulnerability mapping of aquifers using GALDIT method. *Coastin* 4, 7–9.
- Chachadi, A., Lobo-Ferreira, J., 2001b. Seawater Intrusion Vulnerability Mapping of Aquifers Using GALDIT Method. *COASTIN: a Coastal Policy Research Newsletter*. TERI, New Delhi.
- Chachadi, A., Lobo Ferreira, J., et al., 2003. Assessing the Impact of Sea-Level Rise on Salt Water Intrusion in Coastal Aquifers Using GALDIT Model. *APRH/CEAS. Processing Seminário Sobre Aguas Subterrâneas, Lisboa*, p. 13.
- Djabri, L., Bouhsina, S., et al., 2019. Essai de cartographie du risque d'intrusion marine par une approche multicriteres: cas de la nappe de collo (N-E, Algerien). *Larhyss J.* 38, 7–20.
- Djouadar, D., Zahouani, S., et al., 2017. Application of the GALDIT method to the study of groundwater vulnerability of the east Mitidja alluvial waters. In: *Euro-Mediterranean Conference for Environmental Integration*. Springer.
- Duijvenbooden, W.v., Van Waegeningh, H., 1987. Vulnerability of soil and groundwater to pollutants." *Verslagen en Mededelingen. Commissie voor Hydrologisch Onderzoek TNO, Netherlands*.
- Guezgouz N, D. L. and S. Bouhsina "Etude comparative de la vulnérabilité à l'intrusion marine par la méthode paramétrique: cas de la région de Annaba-Guerbes (NE Algérie)".
- Hallal, D.D., Khelifi, M.E.A., et al., 2019. Application of the GALDIT method combined with geostatistics at the Bouteldja aquifer (Algeria). *Environmental earth sciences* 78 (1), 22.
- Hashimoto, T., Stedinger, J.R., et al., 1982. Reliability, resiliency, and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation. *Water Resour. Res.* 18 (1), 14–20.
- Kazakis, N., Spiliotis, M., et al., 2018. A fuzzy multicriteria categorization of the GALDIT method to assess seawater intrusion vulnerability of coastal aquifers. *Sci. Total Environ.* 621, 524–534.
- Khadidja, B., 2018. Etablissement de carte de ressources en eaux souterraines de la willaya de Tipaza.
- Lobo-Ferreira, J., Chachadi, A., 2005. Assessing Aquifer Vulnerability to Sea-Water Intrusion Using GALDIT Method: Part 2–GALDIT Indicators Description. The fourth inter-celtic Colloquium on Hydrology and management of water resources, Portugal.
- Lobo-Ferreira, J., Cunha, M.C., et al., 2003. Application of optimization models for satisfaction of water resource demand of tourist infrastructure. In: *Noronha, et al. (Eds.), Coastal Tourism, Environment, and Sustainable Local Development*, pp. 305–320.
- Maamar, H., 2004. *Annuaire hydrogéologique de la nappe alluviale de l'oued El Hachem*. Blida, Algérie: Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH).
- Mahrez, B., Klebingat, S., et al., 2018. GIS-based GALDIT method for vulnerability assessment to seawater intrusion of the Quaternary coastal Collo aquifer (NE-Algeria). *Arabian Journal of Geosciences* 11 (4), 71.
- Mancet, J., 1972. *Etude hydrogéologique de la nappe alluviale de l'oued El Hachem*. ANRH.
- Medejerab, A., Henia, L., 2011. Variations spatiotemporelles de la sécheresse climatique en Algérie nordoccidentale. *Courrier du savoir* 11, 71–79.

- Moghaddam, H.K., Moghaddam, H.K., et al., 2019. Developing comparative mathematic models, BN and ANN for forecasting of groundwater levels. *Groundwater for Sustainable Development* 9, 100237.
- Najib, S., Grozavu, A., et al., 2012. Application of the method GALDIT for the cartography of groundwaters vulnerability: aquifer of Chaouia coast (Morocco). *Analele stiintifice ale Universitatii "Alexandru Ioan Cuza" din Iasi-seria Geografie* 58 (2), 77–88.
- Niazi, S., 2007. Evaluation des impacts des changements climatiques et de l'élévation du niveau de la mer sur le littoral de Tétouan (Méditerranée occidentale du Maroc): Vulnérabilité et Adaptation (Thèse de doctorat).
- Revelle, R., 1941. Criteria for recognition of the sea water in ground-waters. *Eos, Transactions American Geophysical Union* 22 (3), 593–597.
- Saidi, S., Bouri, S., et al., 2011. Assessment of groundwater risk using intrinsic vulnerability and hazard mapping: application to Souassi aquifer, Tunisian Sahel. *Agric. Water Manag.* 98 (10), 1671–1682.
- Szczypta, C., 2012. Hydrologie spatiale pour le suivi des sécheresses du bassin méditerranéen.
- Tadrist, N., Debauche, O., et al., 2016. Impact de l'érosion sur l'envasement des barrages, la recharge des nappes phréatiques côtières et les intrusions marines dans la zone semi-aride méditerranéenne: cas du barrage de Boukourdane (Algérie). *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement* 20 (4), 453–467.
- Tasnim, Z., Tahsin, S., 2016. Application of the method of GALDIT for groundwater vulnerability assessment: a case of South Florida. *Asian Journal of Applied Science and Engineering* 5 (1), 27–40.
- Trabelsi, N., Triki, I., et al., 2016. Aquifer vulnerability and seawater intrusion risk using GALDIT, GQI SWI and GIS: case of a coastal aquifer in Tunisia. *Environmental earth sciences* 75 (8), 669.
- Varnes, D.J., 1984. *Landslide Hazard Zonation: a Review of Principles and Practice*.