

ÉVALUATION DE LA VULNÉRABILITÉ CÔTIÈRE DU LITTORAL CENTRE OUEST ALGÉRIEN (CHERCHELL), SOUS L'ANGLE DE LA GÉOMATIQUE

NADIA AMARNI^{1*}, LOUNES FERNANE¹, RABAH BELKESSA¹

*¹Laboratoire des Écosystèmes Marins et Littoraux (ECOSYSMarL), École 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, Algérie
e-mail : amarninadia@hotmail.com: lounes15@live.fr: belkessarabah@yahoo.fr*

DOI: 10.xxxx

Résumé. Situé au Sud de Méditerranée occidentale, dans la région centre Algérienne, le littoral de Cherchell a participé au fil du temps au développement économique de la région (tourisme balnéaire). Durant ces dernières décennies, ce littoral a subi plusieurs contraintes, telles que l'érosion côtière. Cependant, aucun travail n'a été réalisé dans cette zone pour estimer le degré de vulnérabilité côtière face à l'érosion et à la submersion marine. L'objectif de cet article est de cartographier la vulnérabilité physique, selon la méthode de *Hammar-Klose et Thieler* (2001) et la vulnérabilité socio-économique, selon la méthode de *McLaughlin et Cooper* (2010), sur le littoral de Cherchell, à l'aide des systèmes d'informations géographiques (SIG).

Les résultats obtenus nous ont permis de faire un constat sur l'état de la vulnérabilité de la côte. En ce qui concerne la vulnérabilité physique, plus d'un tiers (35%) du littoral de Cherchell est vulnérable aux risques d'érosion et de submersion, étant constitué essentiellement de zones d'accumulations sableuses, et près de deux tiers (65%) du littoral possèdent une vulnérabilité faible à modérée, étant constitués de falaises et des côtes rocheuses. Par contre, la vulnérabilité socio-économique a révélé que près de la moitié (48%) du littoral est vulnérable aux risques d'érosion et de submersion, ce qui s'explique par la présence des zones urbaines densément peuplées, avec des réseaux routiers développés et un héritage patrimonial et culturel important. Plus de la moitié (52%) du littoral présente une vulnérabilité faible à modérée, ce qui explique pourquoi ces zones à accès difficile sont inhospitalières. Les résultats de cette étude peuvent servir d'outil d'aide à la décision pour les aménagements futurs dans la région, sachant qu'un futur méga port sera implanté dans la région de Hamdania.

Mots clés: Méditerranée occidentale ; littoral de Cherchell ; systèmes d'informations géographiques (SIG) ; vulnérabilité physique et socio-économique ; érosion ; submersion marine.

Abstract. Located in the south of the western Mediterranean, in the central Algerian region, Cherchell coastline has participated over time in the economic development of the region (seaside tourism). During the last decades, this coastline has been subject to several constraints such as coastal erosion. However, no work has been carried out in this area to estimate the degree of coastal vulnerability to erosion and marine submersion. The objective of this paper is to map physical vulnerability according to the method of *Hammar-Klose and Thieler* (2001), and socio-economic vulnerability according to the method of *McLaughlin and Cooper* (2010) of the Cherchell coast, using geographic information systems (GIS).

The results obtained allowed us to make a statement on the state of vulnerability of the coast. Regarding physical vulnerability, more than a third (35%) of Cherchell coastline is vulnerable to the risks of erosion and submersion, consisting mainly of areas of sandy accumulation, and nearly two thirds (65%) of the coastline have a low to moderate vulnerability, being made up of cliffs and rocky shores. On the other hand, socio-economic vulnerability revealed that nearly half (48%) of the coastline is vulnerable to the risks of erosion and submersion. This is explained by the presence of densely populated urban areas with developed road networks and an important patrimonial and cultural heritage. More than half (52%) of the coastline has low to moderate vulnerability, which explains why these hard-to-reach areas are inhospitable. The results of this study can serve as a decision support tool for future developments in the region, knowing that a future mega-port will be established in the Hamdania region.

Key words: Western Mediterranean; Cherchell coastline; geographic information systems (GIS); physical and socio-economic vulnerability; erosion; marine submersion

1. INTRODUCTION

La zone côtière méditerranéenne est parmi les côtes les plus urbanisées au monde avec un taux d'urbanisation d'environ 66% (Lafitte *et al.*, 2012). Depuis le 19^{ème} siècle, la température atmosphérique moyenne a augmenté de 0,74°C à l'échelle du bassin Méditerranéen, ce qui rend la région vulnérable à l'élévation du niveau de la mer (GIEC, 2014; Klein et Nicholls, 1999; Nicholls et Hoozemans, 1996). Dans le sud du bassin Méditerranéen occidental (Afrique du Nord), de nombreux vestiges archéologiques témoignent d'une occupation des zones côtières actuellement submergées (Paskoff, 2001).

La côte algérienne s'étend sur un linéaire côtier de 1622 km et abrite 85% de la population du pays, qui sont concentrés sur 12% de la surface totale du pays (Djabri *et al.*, 2019; Rabehi *et al.*, 2018). Toutefois, l'exploitation et le développement de cette côte présentent certains risques côtiers liés aux problèmes d'érosion et aux submersions marines. Ces risques peuvent s'amplifier avec le taux d'élévation prévu de niveau de la mer Méditerranée (GIEC, 2014; Jimenez et Sánchez-Arcilla, 1997), ces risques constituent un défi majeur pour la côte algérienne dans les années à venir.

Ces dernières années, l'élévation de niveau de la mer est devenu une préoccupation majeure pour la communauté scientifique et les décideurs (Boruff *et al.*, 2005). De nombreuses études qui portent sur la vulnérabilité côtière ont été effectuées dans la plupart des pays pour anticiper les effets de l'élévation de niveau de la mer sur leurs côtes. Cependant, les études menées pour l'évaluation de la vulnérabilité côtière en Algérie sont rares, principalement en raison du manque des données, et aucune étude n'est encore menée sur le littoral de Cherchell. 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 prennent pas en compte les paramètres socio-économiques. Des études réalisées sur la baie de Bejaia (Djouder et Boutiba, 2017) et la baie d'Alger (Rabehi *et al.*, 2018), qui inclut les paramètres socio-économiques, ont démontré un état de vulnérabilité élevée. Notre travail sur le littoral de Cherchell va enrichir davantage les études qui ont été déjà cités en dessus. À cet effet, la vulnérabilité physique et socio-économique sur le littoral 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 et Thieler (2001), pour l'indice de vulnérabilité physique, ainsi la méthode de McLaughlin et Cooper (2010), pour l'indice de vulnérabilité socio-économique.

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 forme et en biodiversité, ce qui lui confère une attractivité touristique importante. Plus de 24 millions d'estivants sont enregistrés chaque année, dont 6 millions choisissent la plage Hamdania, d'après la Direction Générale

de la Protection Civile (DGPC, 2016), d'où la nécessité d'évaluer la vulnérabilité côtière de la côte de Cherchell et d'identifier des options d'adaptation.

L'utilisation d'une base de données, intégrées dans un Système d'Informations Géographiques (SIG), a permis de mieux caractériser les indices de vulnérabilité physique et socio-économique (IVCphys et IVCsocio-éco) et de les cartographier. L'évaluation de vulnérabilité côtière permet non seulement de distinguer les secteurs les plus vulnérables, nécessitant une intervention urgente, mais aussi d'adapter des pratiques et des politiques de planification pour une meilleure occupation et préservation de ces espaces fragiles.

2. CARACTÉRISTIQUES DE LA ZONE D'ÉTUDE

Cherchell est une commune littorale qui se situe dans la partie centre-ouest de la côte algérienne, à 76 km à l'Ouest de la capitale Alger. Elle s'étend sur un linéaire côtier de 27 km d'orientation Est-Ouest, limité au Nord par la mer Méditerranée, à l'Est par les communes Tipaza et Nador, au Sud par Sidi-Amar et Menacer et à l'Ouest par Sidi-Semiane et Sidi-Ghiles (Fig.1). Ces coordonnées géographiques sont :

X entre 422459 et 447245 m.

Y entre 4055051 et 4040322 m.

Le littoral de Cherchell est dominé par des côtes rocheuses et falaises, environ 70% de la côte, ainsi que de petites criques et plages, environ 30% de la côte. La conjugaison des formes géomorphologiques – plages, criques, baies, côtes rocheuses et falaises – offrent à ce rivage d'indéniables possibilités touristiques. 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, Cap des trois îlots, et la côte rocheuse de Bellaa.

De point de vue lithologique, deux types de falaises ont été développés :

- Falaises développées dans des roches dures du type calcaire gréseux, 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 affectées par les variations de température, les pluies et les vagues de tempête, laissent devant elles de petites plages.
- Falaises développées dans des roches tendres entaillées dans des marnes et grès d'âge miocène sont rencontrées près de Cherchell et de pointe Rouge, leur hauteur étant respectivement de 10 m et 20 m ; elles sont influencées par la gravité et l'infiltration d'eau. On assiste souvent aux glissements de terrain, effondrements et éboulements favorisant l'alimentation des plages.

Sur le littoral de Cherchell on dénombre 8 plages, d'une longueur qui varie entre 350 m et 2200 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 à 5 m. Ces plages

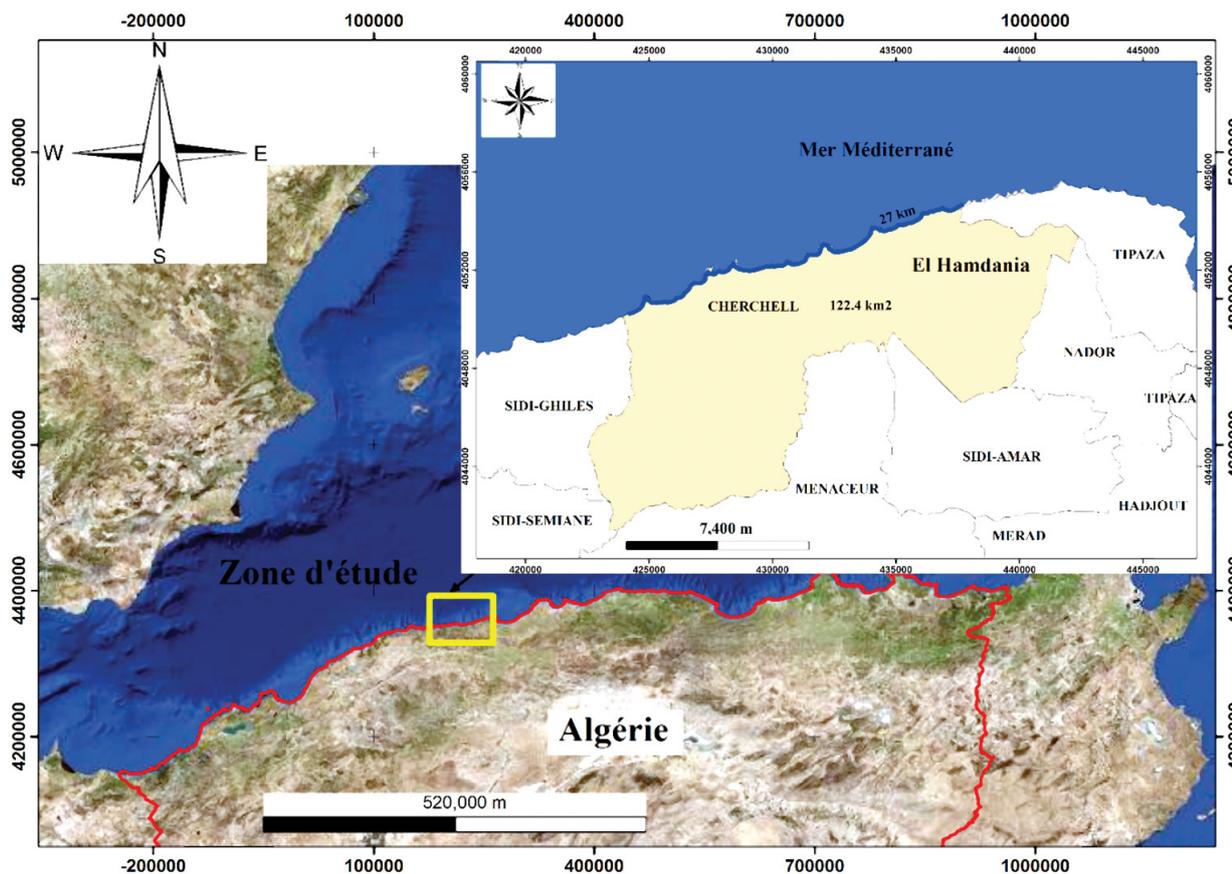


Fig. 1. Localisation administrative et géographique de Cherchell.

sont d'Est en Ouest : Oumazar, Hamdania, Bellaa, Bourdj El Gooula, Tizirine, Parc, Pointe rouge et la plage Centre ; elles sont caractérisées par des sables moyens ($125 \mu\text{m} < D_{50} < 250 \mu\text{m}$) (LEM, 2016), parfois accompagnées de matériaux grossiers. Ces sédiments parviennent généralement des apports des Oueds El Hachem et El Bellaa et de l'érosion des falaises et sont distribués le long de la côte par les courants de dérive. En général elles se présentent en forme de baie, limitées par des caps, à l'exception des plages Tizirine et Parc qui sont rectilignes.

Dans la zone d'étude, on retrouve également des plaines alluviales, représentées par les basses vallées d'oued El Hachem et d'oued El Bellaa ; ces basses vallées sont formées essentiellement de terrasses alluviales, composées essentiellement de gravier, de sable grossier et de marnes. Les vallées contiennent deux oueds qui prennent naissance dans l'atlas tellien avec une direction subméridienne (S-N) et des profils plus au moins longs ; ces oueds se déversent dans le littoral de Cherchell au niveau de la plage Hamdania (plages des trois îlots) pour oued El Hachem, et plage Bellaa pour oued El Bellaa (Fig. 2).

Au niveau du bassin versant d'oued El Hachem, dans les années 1992, un barrage (barrage de Boukerdene) a été implanté à 11 km au sud de la côte de Cherchell (Fig.3). Ce

barrage constitue un obstacle (piège à sédiment) pour le transit sédimentaire qui vient alimenter la plage, ce qui provoque un déficit sédimentaire pour la plage Hamdania qui est en érosion actuellement.

L'État algérien a projeté la construction de futur méga port Centre au niveau de la région de Hamdania et Bellaa. Ce dernier risque la dénaturation de la zone, en déviant les deux oueds El Hachem et El Bellaa en dehors des deux plages, ce qui provoque l'érosion et le recul de la côte.

Cherchell est caractérisé par un climat méditerranéen subhumide relativement froid en hiver, chaud et sec en été. 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 Aout) (Mohamed et Bensmaili, 2016). La zone côtière est plus arrosée par rapport au reste du territoire, à cause de son exposition aux flux maritimes. Les précipitations sont abondantes, irrégulières et inégalement réparties, parfois très violentes selon les mois et les années, allant de 370,12 mm/an et 714,79 mm/an, avec une moyenne de 573,68 mm/an pour la période 2000 - 2015 (Mohamed et Bensmaili, 2016). La répartition saisonnière des pluies est d'environ 43 % en hiver, 28 % en automne, 27,5 % au printemps et seulement 1,5 % des pluies en été (Mohamed et Bensmaili, 2016).



Fig. 2. Emboucheurs des oueds qui se déverse dans le littoral de Cherchell (à gauche oued El Hachem, à droite oued El Bellaa).

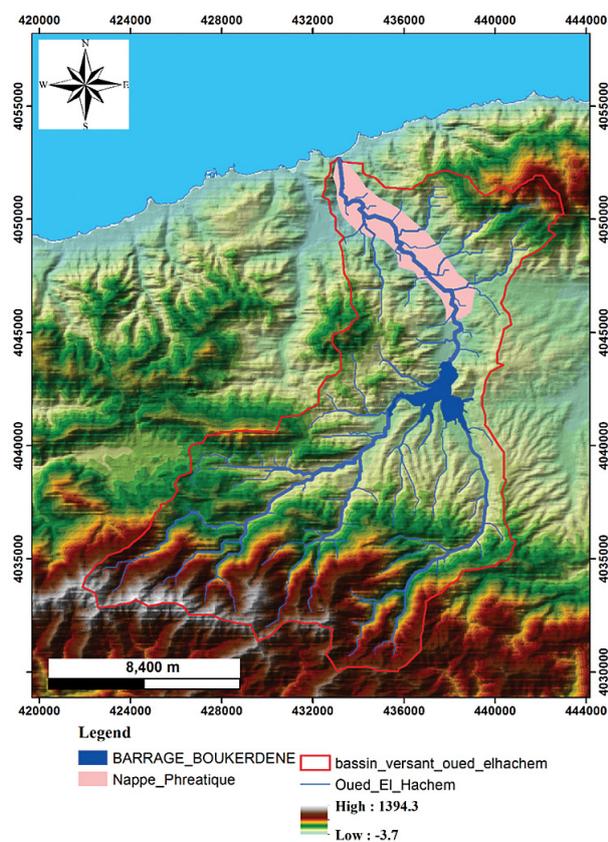


Fig. 3. Localisation de barrage Boukerdene et l'aquifère de Cherchell dans le sous bassin versant d'oued El Hachem.

Le littoral de Cherchell est fortement exposé aux houles et vents des secteurs W 270°, NE 45°, NW 315° et N 360° (Tableau 1). Les houles prédominantes apparaissent en hiver avec des périodes de 8s. L'amplitude moyenne de ces houles varie entre 1 m et 2,5 m (Fig. 4a, 4b).

Pendant l'hiver (Octobre à Mars) les vents des secteurs Ouest (270°W), Sud-Ouest (225°SW), Nord-Ouest (315°NW) et Nord (360°N) sont dominants et une grande partie de ces vents présentent une vitesse supérieure à 16 nœuds.

Ces vents sont appréciables par leur force mais non 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. 5).

3. MÉTHODOLOGIE

3.1. INDICE DE VULNÉRABILITÉ PHYSIQUE

L'étude de vulnérabilité physique de la zone d'étude s'appuie sur une démarche participative, 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, proposée 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, pour identifier les secteurs à risque et ceux les plus exposés à une élévation du niveau de la mer. 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, 1999; Thieler et Hammar-Klose, 2000a, b).

La méthode de Hammar-Klose et Thieler (2001) est basée sur le fait que la thématique traitée s'articule autour deux volets – «forçage de la mer» et « facteurs géologiques », qui rendent (ou non) la zone côtière comme vulnérable. Chaque variable est dotée d'une valeur relative de risque basée sur l'importance potentielle de sa contribution aux changements physiques de la côte. Ces variables sont classées selon une échelle linéaire de 1 à 5 et suivant un ordre de vulnérabilité croissant, dû à l'érosion et à la submersion. La valeur 1 correspondrait à un risque très faible et 5 à un risque plus élevé Hammar-Klose et Thieler, (2001). Selon Gornitz et al. (1994) 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 de

Tableau 1. Données de houles récoltées par le S.S.M.O entre 1963 à 1970 par directions et pour une période de temps de 8s (in LEM, 2016)

Direction	Hs aux large (m)	Hs locale (m)
45°NE	2,5	2
360°N	3	2
315°NW	3	2,5
270°W	3,5	1

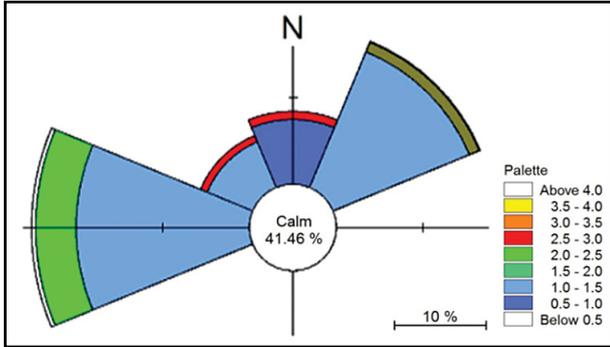


Fig. 4a. Rose des houles au large de la région de Cherchell (SSMO in LEM, 2016).

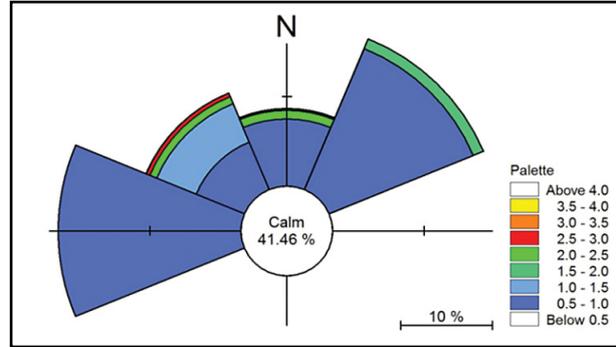


Fig. 4b. Rose des houles a la côte de la région de Cherchell (SSMO in LEM, 2016).

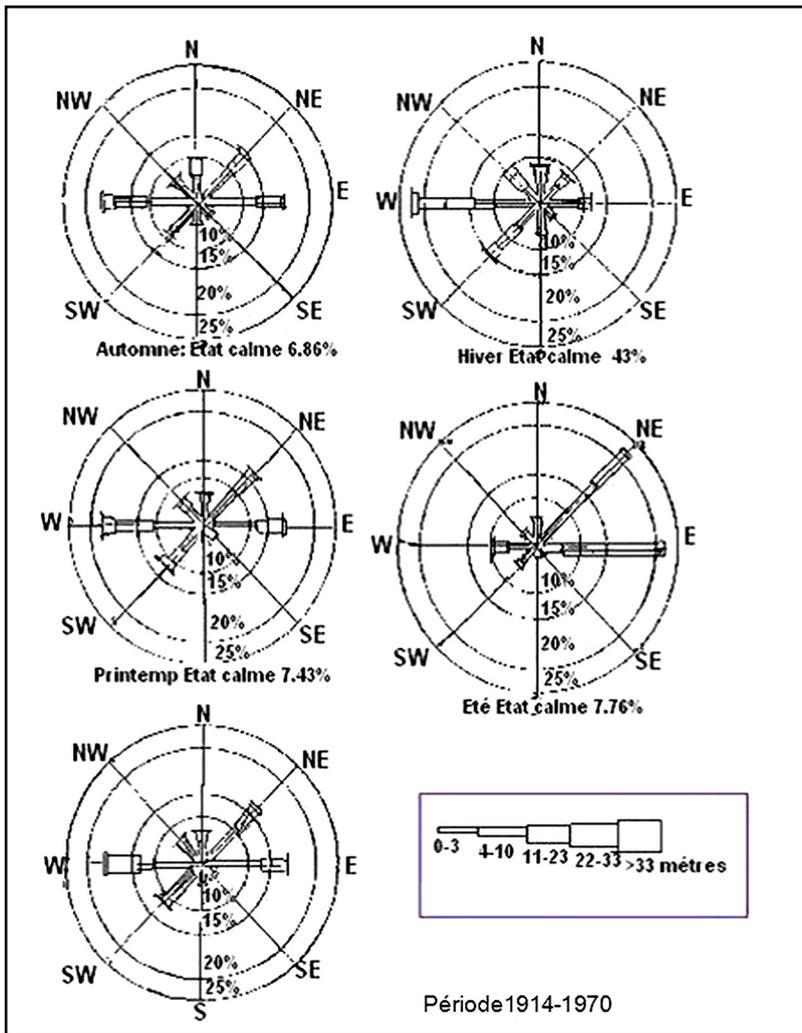


Fig. 5. Rose trimestrielle et annuelle des vents de la région de Cherchell (SSMO in LEM, 2016).

vagues élevées. Une fois que chaque section du littoral est assignée d'une valeur de risque basée sur chaque variable spécifique, un indice de vulnérabilité côtière est calculé en utilisant l'équation développée par Hammar-Klose et Thieler (2001). C'est la racine carrée du produit des différentes variables divisées par le nombre de variables utilisé :

$$IVC = \sqrt{a * b * c * d * e * \frac{f}{6}} \quad (1)$$

Avec :

- a – géomorphologie côtière,
- b – pente côtière,
- c – remontée relative de niveau de la mer,
- d – érosion/accrétion de la ligne du rivage,
- e – amplitude moyenne de la marée,
- f – hauteur significative des vagues à la côte

représentant l'indice des six facteurs ou variables de vulnérabilité pris en compte (Tableau 2).

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 à l'élévation de niveau de la mer : 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. 6), 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.

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.

3.1.1. Variables géologiques

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

La géomorphologie côtière : 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 et aux processus érosifs qui augmentent avec l'élévation de niveau de la mer (Thieler et Hammar-Klose, 1999). La forme d'une côte influence considérablement sa réaction aux agressivités du milieu marin. Les côtes rocheuses et les falaises expriment un risque très faible, par contre les plages montrent un risque très élevé lors de l'évaluation de vulnérabilité à l'érosion (Tableau 2). La détermination de cette variable est effectuée en se basant sur la carte géomorphologique côtière (Figs. 7a, 7b, 7c, 7d) ainsi que sur la base des données recueillies au cours des sorties sur terrain.

La pente côtière : la pente de la côte est une variable quantitative, les bandes côtières à faible pente étant plus sensible à l'érosion, aux tempêtes et tsunamis que les bandes côtières à pente raides (Gaki-Papanastassiou et al., 2010). Du point de vue vulnérabilité physique, les zones côtières à faible pente (< 3%) présentent un degré de vulnérabilité très élevé, et les zones côtières à fortes pentes (> 12%) présente un degré de vulnérabilité très faible (Tableau 2). Dans cette étude, la pente de la côte de Cherchell a été calculée à partir d'une carte topobathymétrique (Fig. 8).

Tableau 2. Les cinq 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, 1999; Thieler et Hammar-Klose, 2000a; b)

IVC Variable	Très faible 1	Faible 2	Modérée 3	Élevée 4	Très élevée 5
a) Géomorphologie côtière	Côte rocheuse à falaise haute	Côte à falaise moyenne	Côte à falaise basse	Lagune	Plage, côtes deltaïques, marais, cordon dunaire
b) Pente côtière (%)	> 12	12 – 9	9 – 6	6 – 3	< 3
c) Remontée relative de niveau de la mer (mm/an)	< 1,8	1,8 – 2,5	2,5 – 3,0	3,0 – 3,4	> 3,4
d) Érosion/accrétion de la ligne du rivage (m/an)	> 2,0	2,0 – 1,0	-1,0 – +1,0	-1,1 – -2,0	< -2,0
e) Amplitude moyenne de la marée (m)	> 6,0	4,1 – 6,0	2,0 – 4,0	1,0 – 1,9	< 1,0
f) Hauteurs significative des vagues à la côte (m)	< 0,55	0,55 – 0,85	0,85 – 1,05	1,05 – 1,25	> 1,25

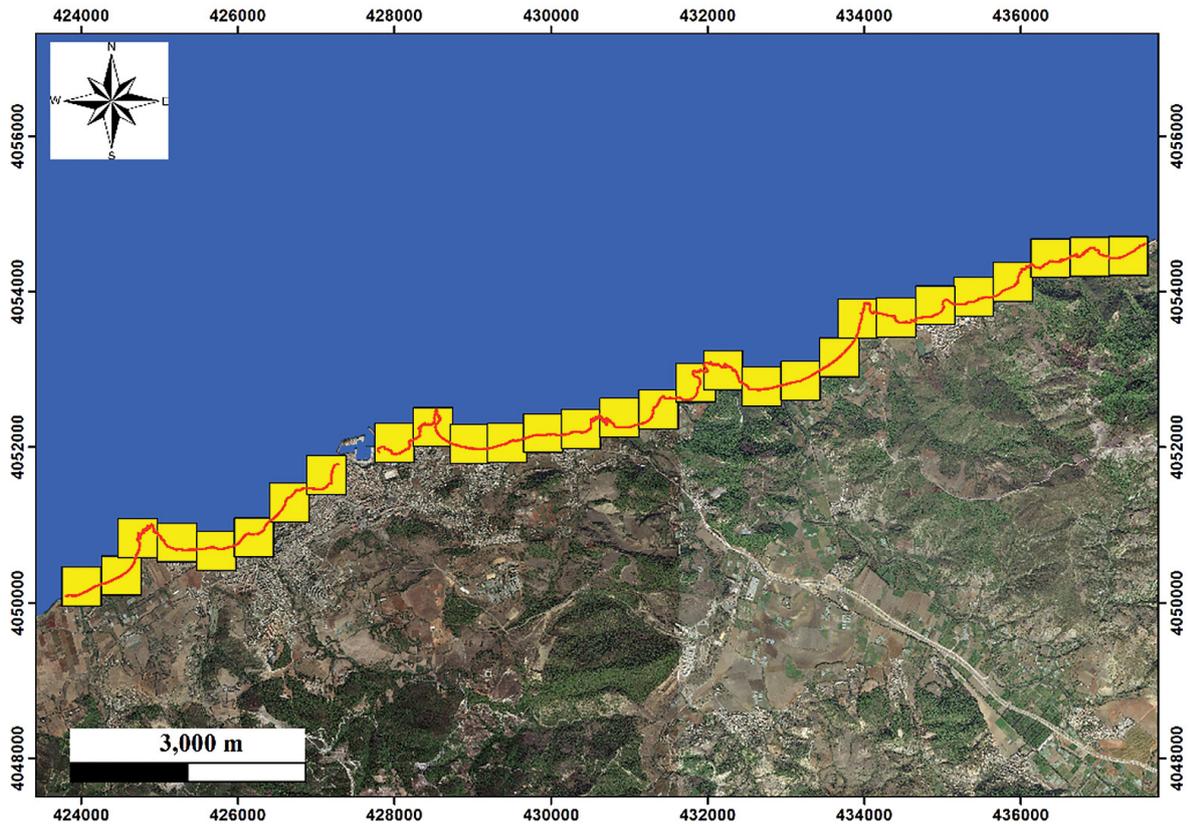


Fig. 6. Découpage du littoral de Cherchell en profile de longueurs identiques 500×500 m selon la méthode de Hammar-Klose et Thielier (2001).

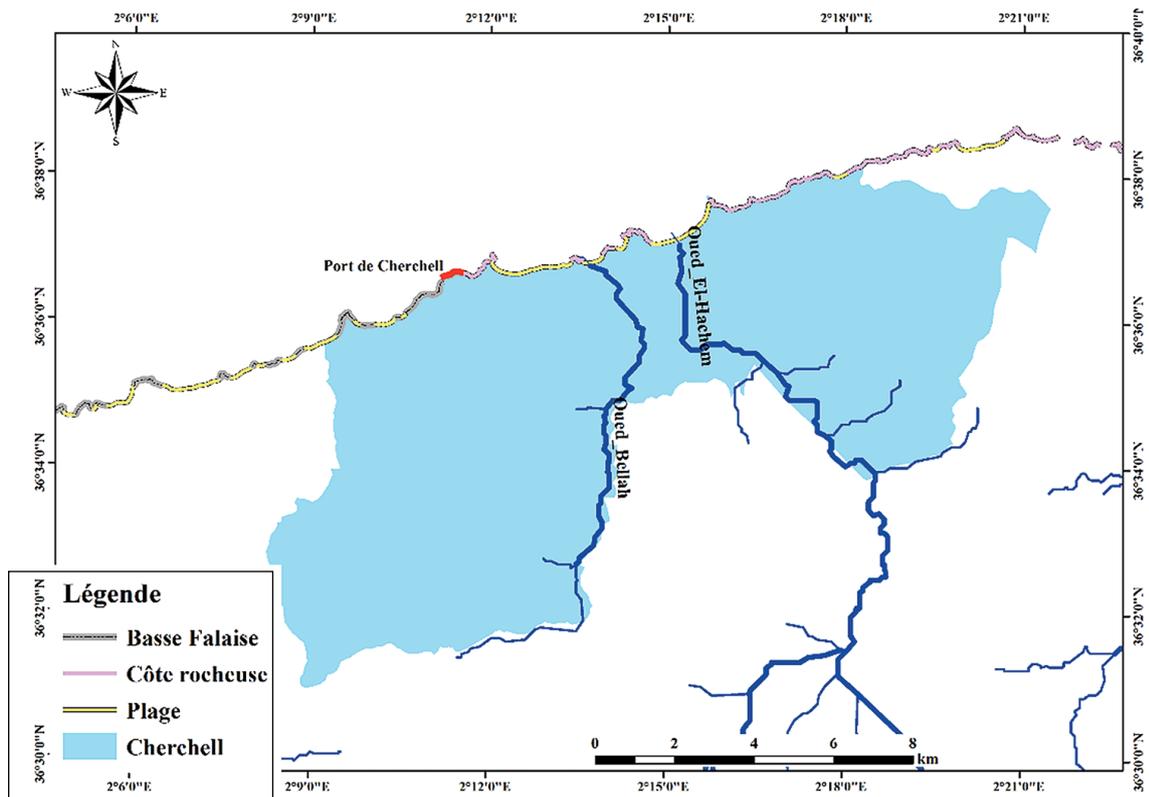


Fig. 7a. Géomorphologie côtière de la région de Cherchell et de ses environs.



Fig. 7b. Falaise de la région de Cherchell (à gauche, falaise dure du Cap Blanc ; à droite, falaise tendre du Cap Rouge).

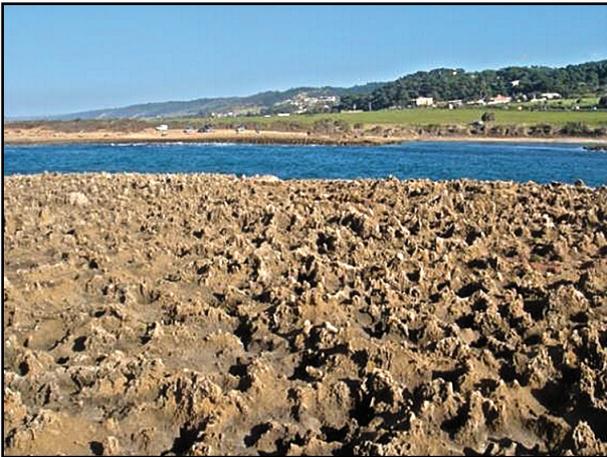


Fig. 7c. Côte rocheuse de Cherchell.



Fig. 7d. Plages de la région de Cherchell (à gauche, plage Hamdania ; à droite, plage Bellaa).

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, sur une période de 50 ans. Les côtes rocheuses et les falaises sont considérées comme stables. Le traitement des données a été réalisé à l'aide de logicielle Arcgis 10.2, et des paramètres statistiques ont été calculées à l'aide de l'extension 'Digital Shoreline Analysis System (DSAS 4.3)' intégré dans le logicielle Arcgis.

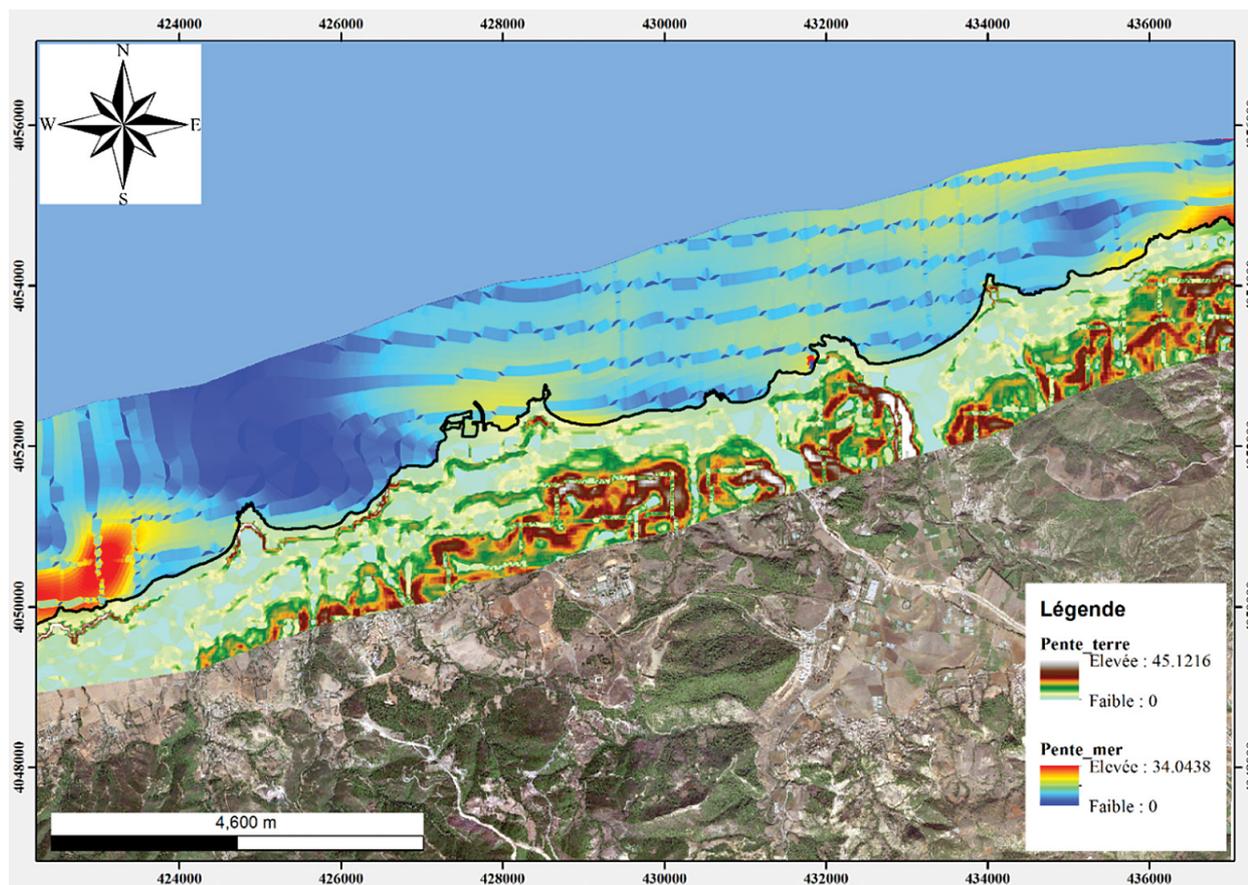


Fig. 8. Topo-bathymétrie de la région de Cherchell (pente locale).

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

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 décrites ci-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 étudiés;
 T (an) – temps écoulé entre les deux traits de côte étudiés.

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, ainsi que l'estimation annuelle des surfaces perdues et gagnées pour chaque secteur côtier, afin de définir le bilan global du budget sédimentaire pendant la période d'étude pour chaque rivage.

Malgré les erreurs inhérentes à toute méthode de ce type (Crowell *et al.*, 1991 ; Durand, 1998), la marge d'erreur est d'ordre de ± 11 m entre les différentes photographies et images satellitaires. Compte tenu de la durée du suivi du trait de côte (mi-séculaire), la marge d'erreur (0,3 m/an) est tolérable et n'affectera pas énormément nos résultats (Figs. 9a, 9b, 9c).

3.1.2. Variables de forçages de la mer

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

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. 10) en Méditerranée occidentale

pour la période allant de 1993 à 2006. Ces mesures sont très utiles, puisqu'il n'existe aucune mesure historique des marégraphes dans la côte de Cherchell.

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 et Thieler, 2001). Plus les vagues sont hautes ($>3,4$ m), plus leurs énergies augmentent et le risque engendré est élevé. Au cours de la présente étude, on a opté pour la simulation numérique des données de la houle à la côte à l'aide de logiciels Mike 21-SW).

Le modèle Mike 21-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. L'équation choisie pour étudier la propagation de la houle au large est la formule directionnelle dans le domaine spectral (Holthuijsen, *et al.*, 1989) et la formule quasi stationnaire dans le domaine temporel (DHI, 2007 ; Holthuijsen *et al.*, 1989). L'algorithme d'itération Newton-Raphson avec les valeurs par défaut a été utilisé (Boutiba et Guendouz, 2006 ; Khalfani, 2014) (Figs.11a, 11b, 11c, 11d).

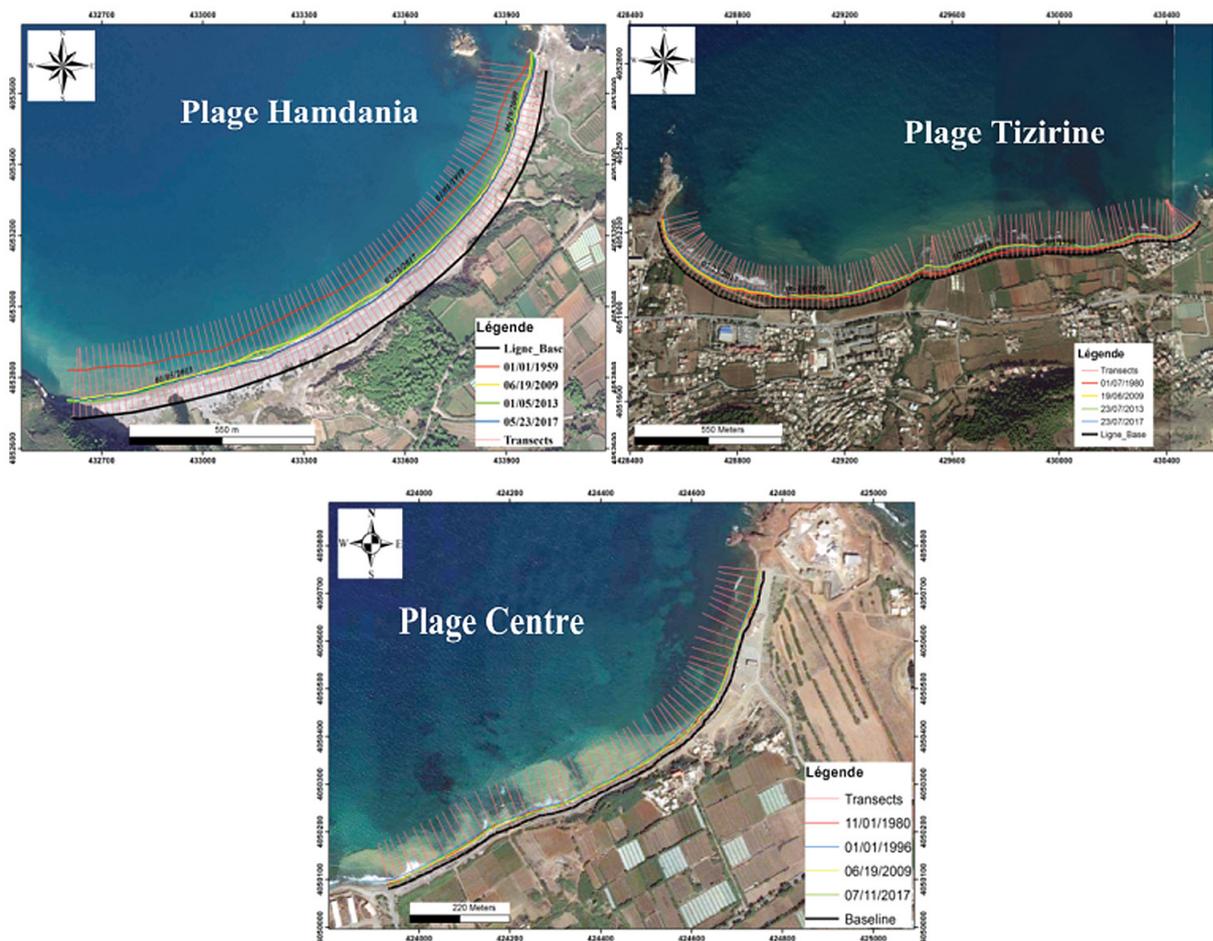


Fig. 9a. Évolution de la ligne de rivage des plages du littoral de Cherchell selon la direction des transects.

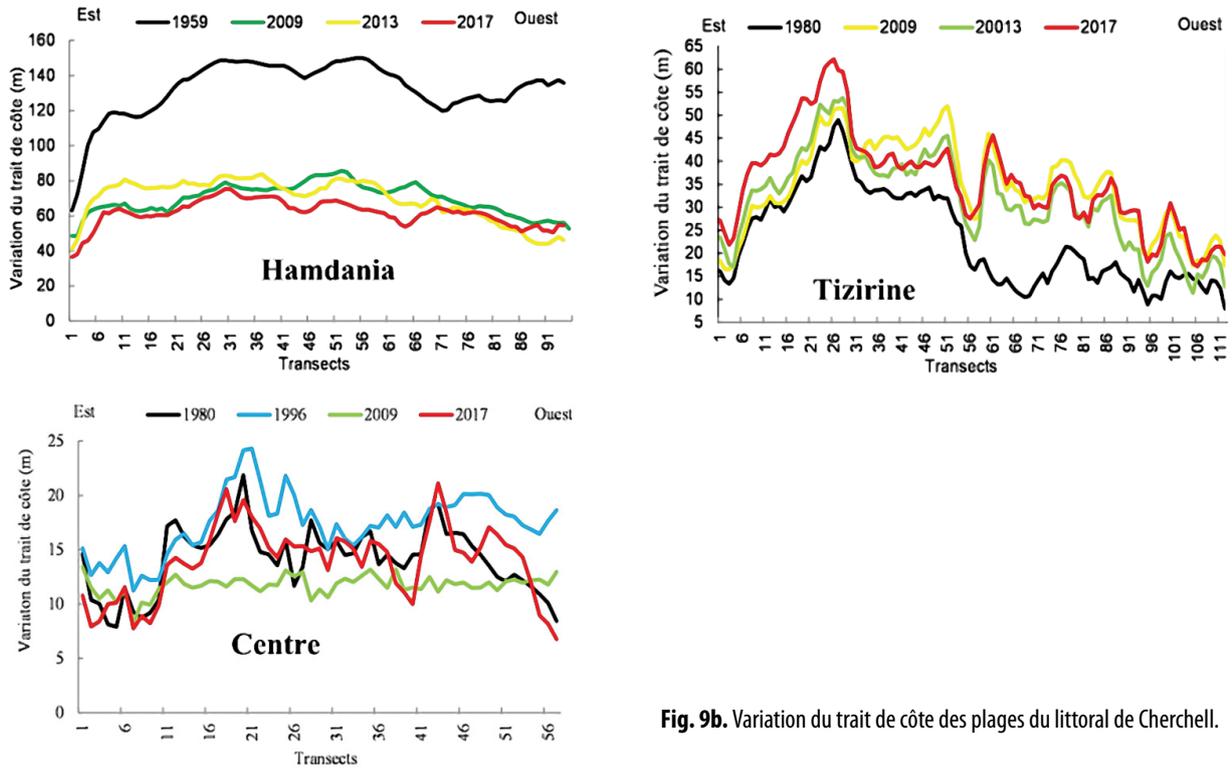


Fig. 9b. Variation du trait de côte des plages du littoral de Cherchell.

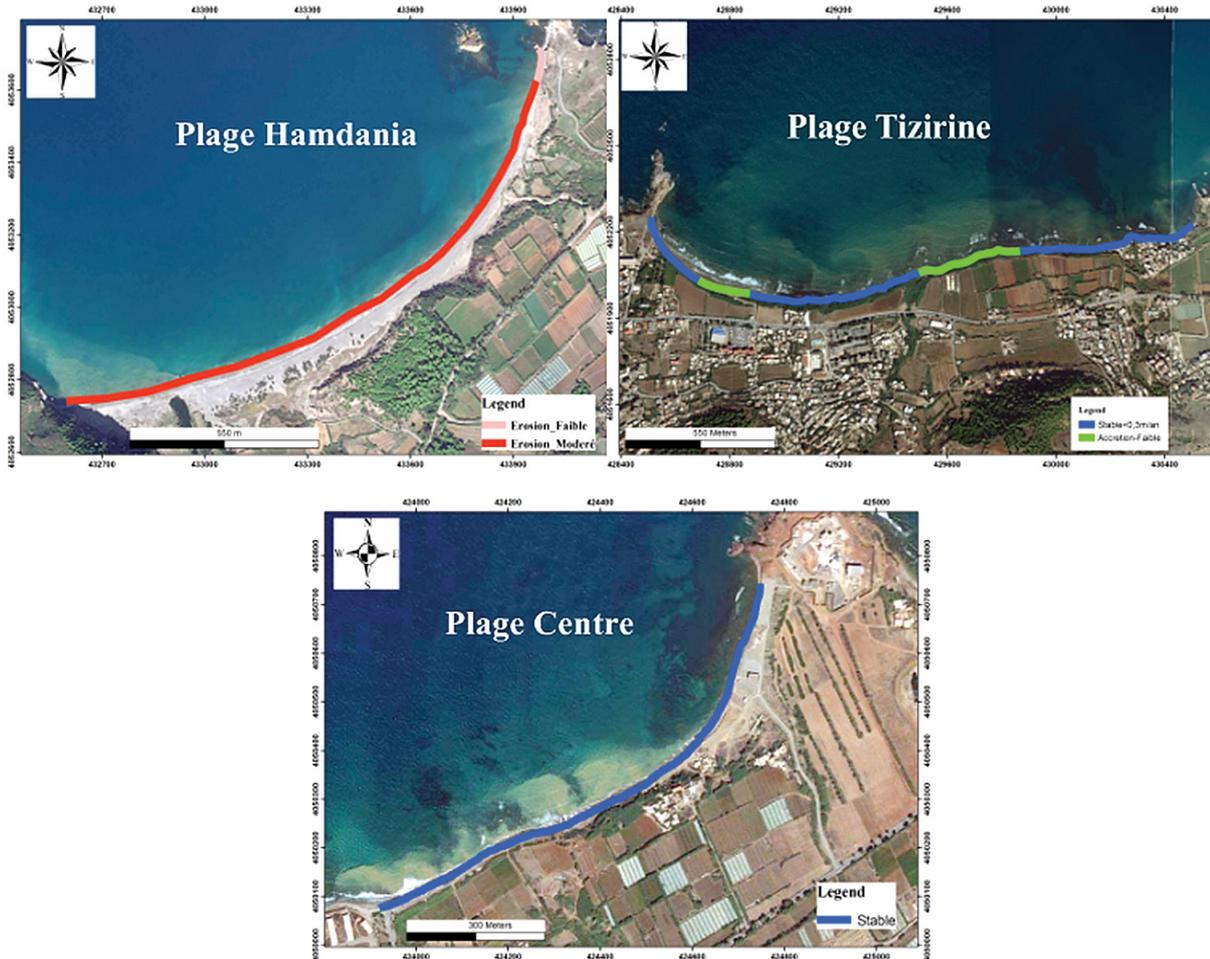


Fig. 9c. Différentes classes d'évolution de trait de côte des plages du littoral de Cherchell (Hamdania, entre 1959 et 2017 ; Tizirine et Centre, entre 1980 et 2017).

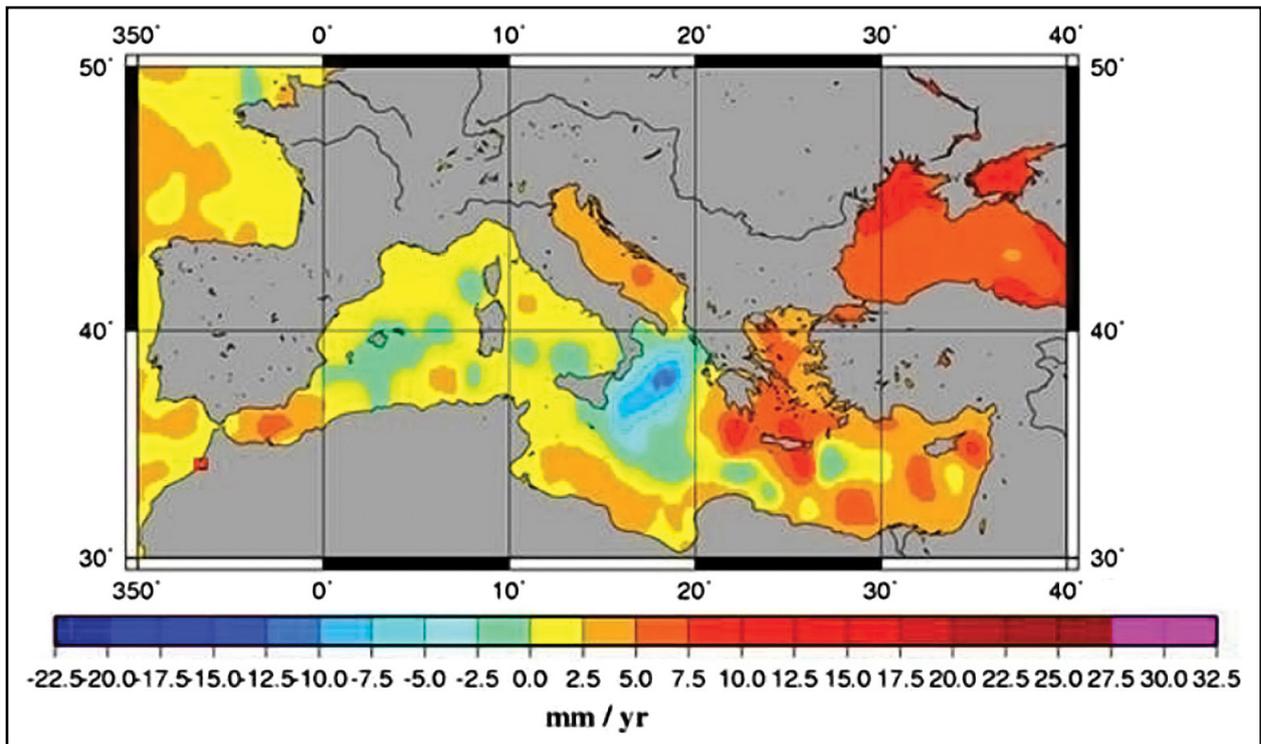


Fig. 10. Distribution géographique des vitesses de variation du niveau de la mer entre 1993 et 2006 mesurées par les satellites d'altimétrie spatiale Topex/Poséidon et Jason 1 (<http://www.legos.obs-mip.fr>).

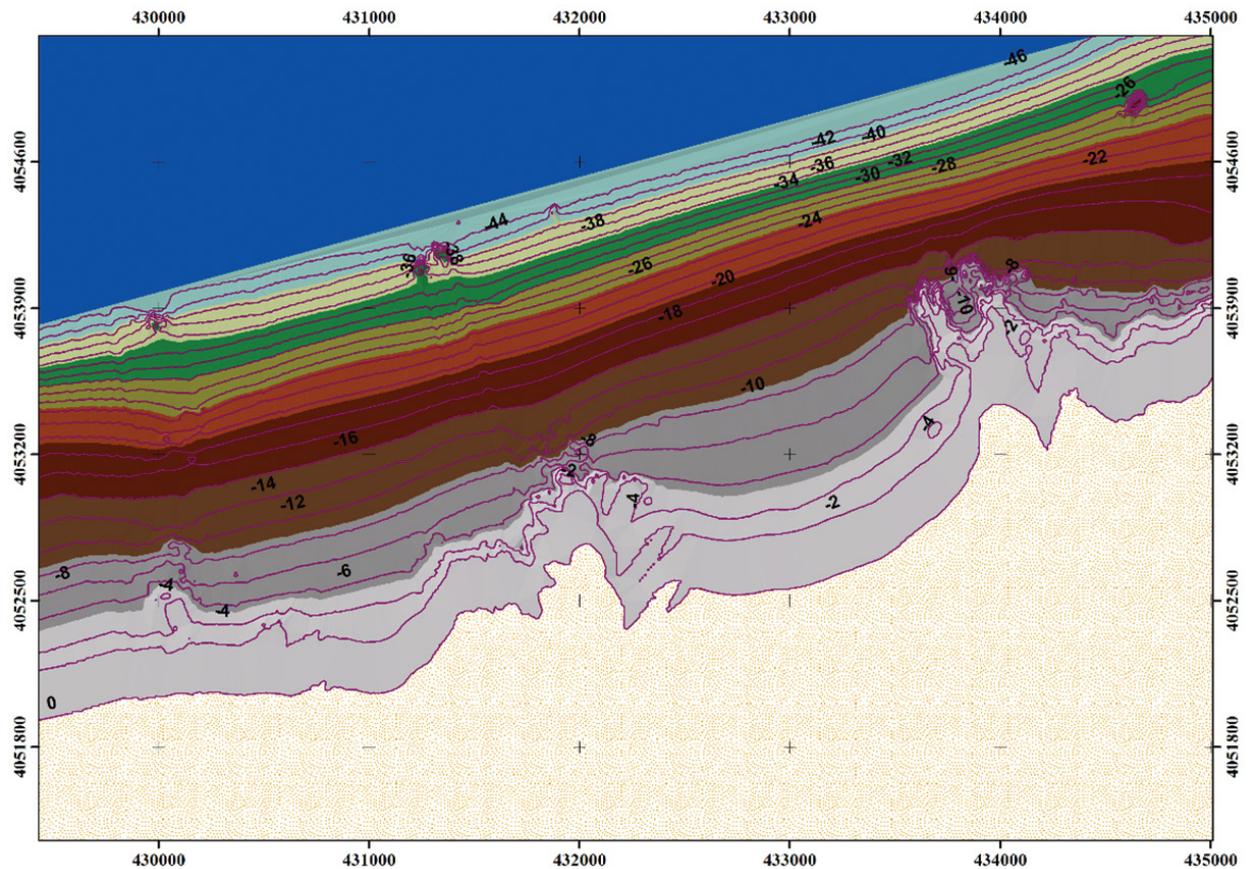


Fig. 11a. Bathymétrie des petits fonds de la région Est de Cherchell (LEM, 2016).

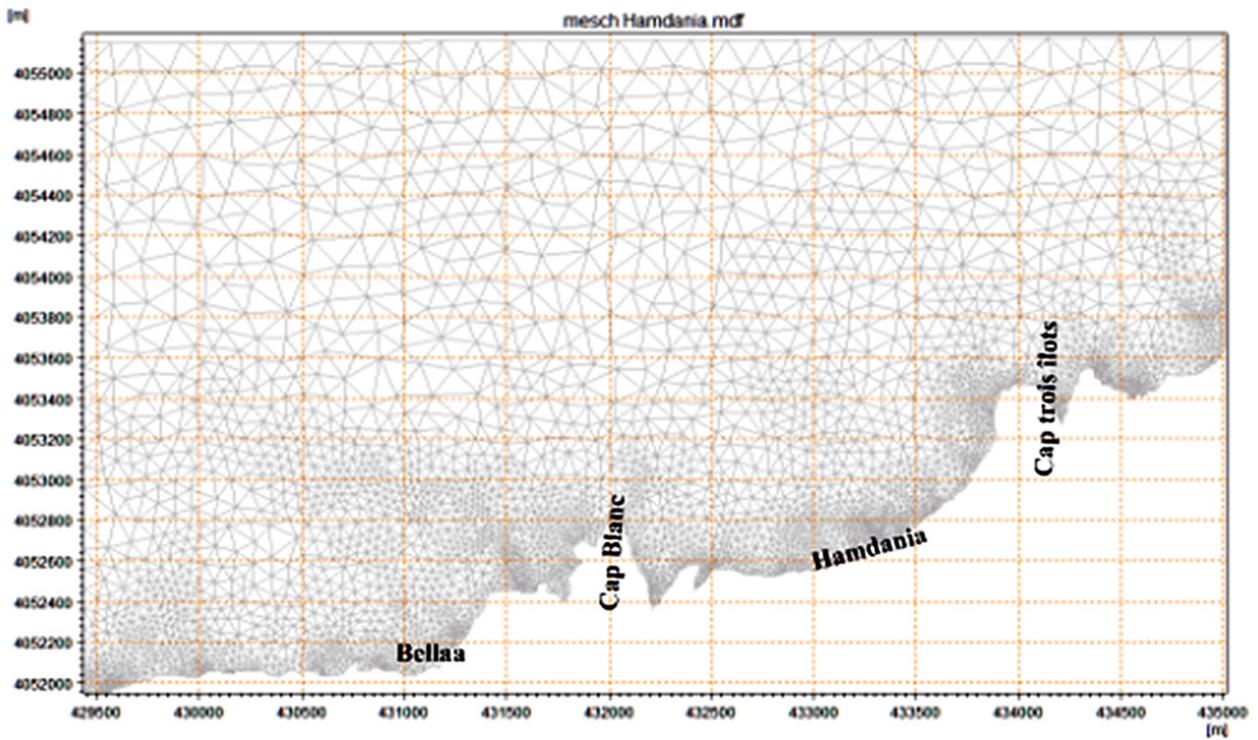


Fig. 11b. Maillage serrée de la région Est de Cherchell généré par le Mike 21.

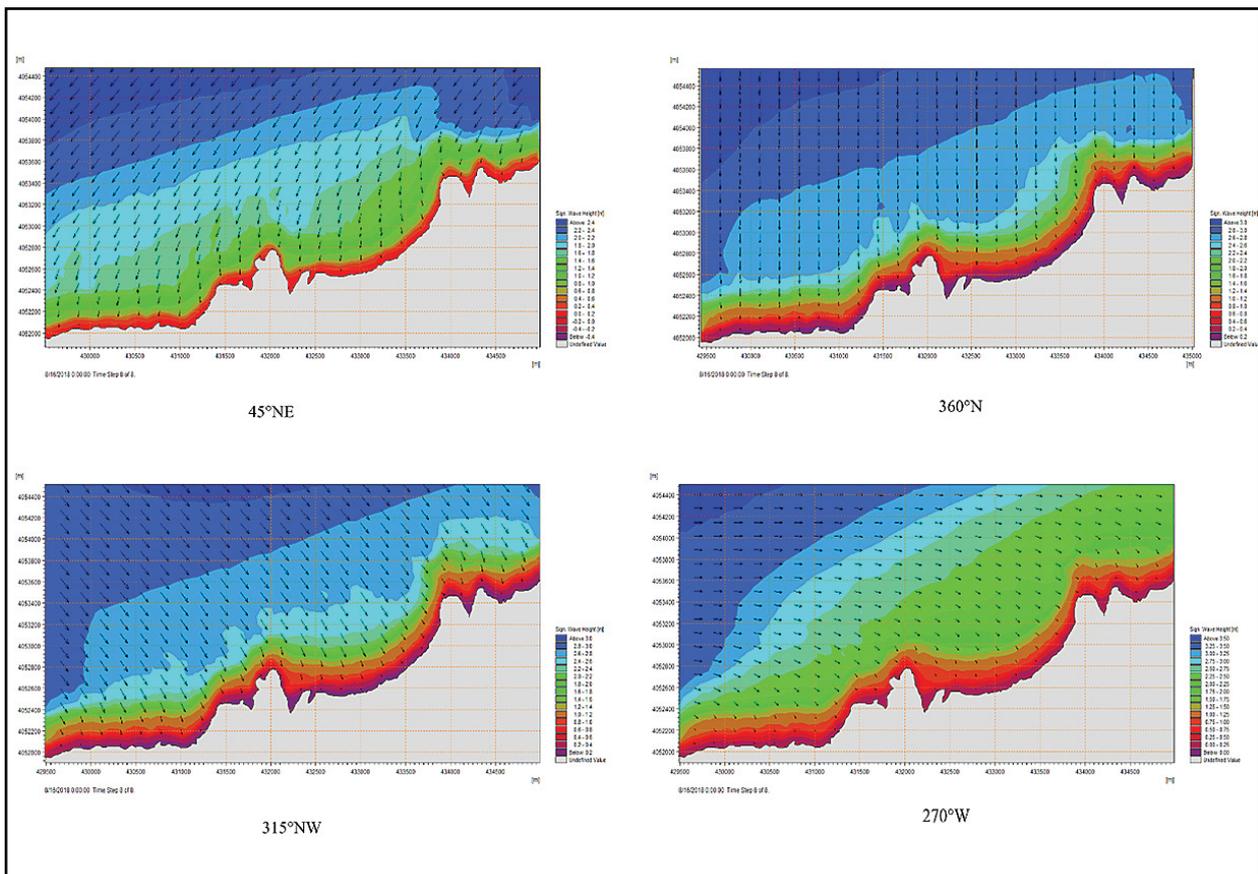


Fig. 11c. Hauteurs significatives des houles à la côte dans la partie Est de Cherchell.

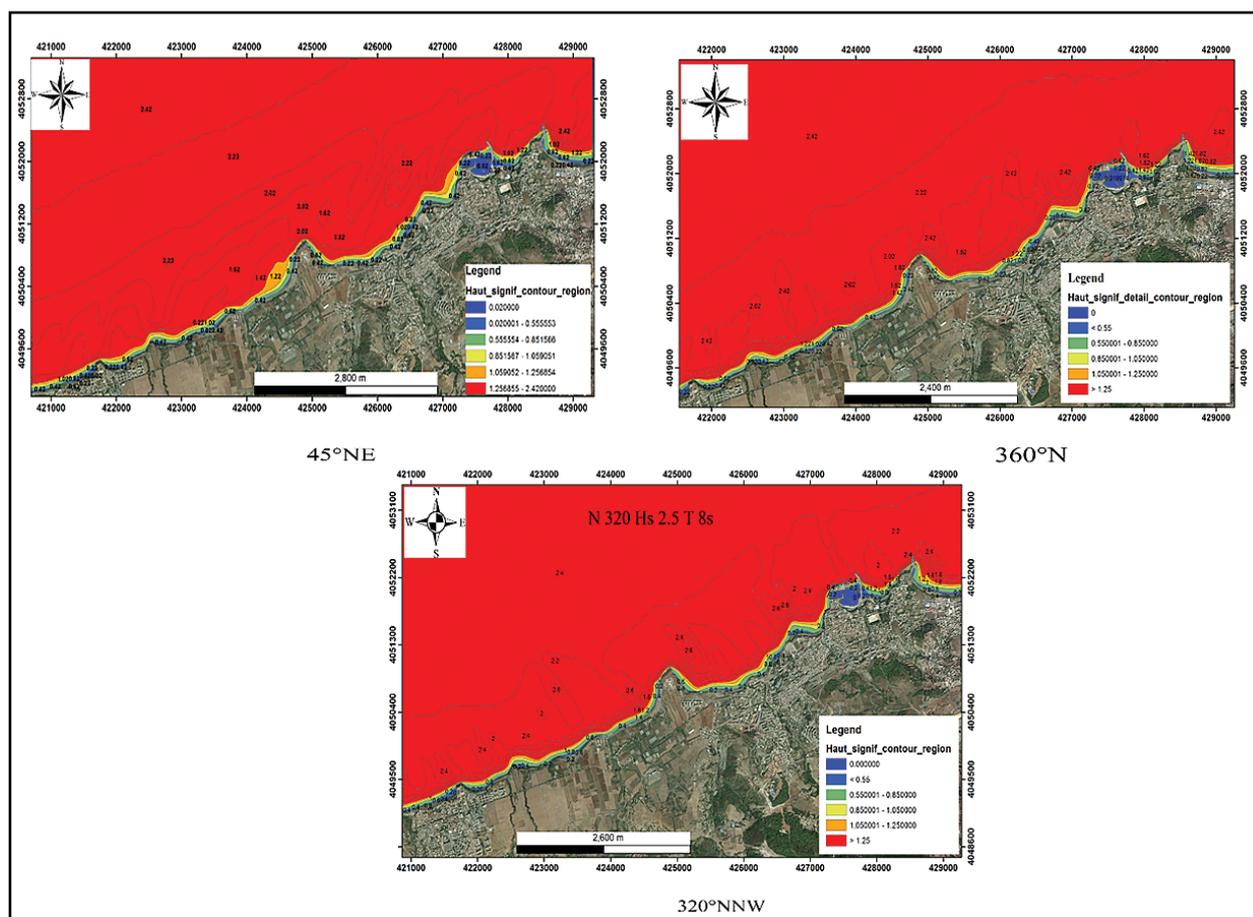


Fig. 11d. Hauteurs significatives des houles à la côte dans la partie Ouest de Cherchell (LEM, 2016).

Amplitude moyenne de la marée : les zones macro-tidales sont moins vulnérables que ceux qui ont un régime micro-tidal (Dwarakish et al., 2008 ; Gaki-Papanastassiou et al., 2010). En effet, la probabilité que de fortes vagues coïncident avec la marée haute peuvent engendrer une érosion forte et une submersion marine qui est dû 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). 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 2). La marée moyenne sur la côte algérienne est de 34 cm.

3.2. INDICE DE VULNÉRABILITÉ SOCIO-ÉCONOMIQUE

L'évaluation de la vulnérabilité socio-économique est une nécessité pour estimer leur degré de sensibilité qui peut affecter les enjeux socio-économiques ainsi de les protégées (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

et Boutiba, 2017 ; Felsenstein et Lichter, 2014 ; Gornitz, 1991 ; Gornitz et al., 1994 ; McLaughlin et Cooper, 2010 ; McLaughlin et al., 2002).

La méthode de l'évaluation de la vulnérabilité socio-économique d'une côte est développée pour la première fois par McLaughlin et al., (2002) et amélioré par McLaughlin et Cooper, (2010). Généralement, l'étude de la vulnérabilité socio-économique d'une côte nécessite six variables : les agglomérations, le réseau routier, les chemins de fer, l'occupation des sols, le patrimoine culturel et les statuts de protection (McLaughlin et Cooper, 2010 ; McLaughlin et al., 2002). D'après la communauté scientifique, ces variables sont des composantes essentielles des régions côtières mondiales.

Chaque variable socio-économique est classée sur une échelle de 1 à 5 en fonction de leur degré de vulnérabilité à l'érosion côtière et à la submersion marines. La valeur 1 correspond à un risque très faible, alors que la valeur 5 correspond à un risque très élevé (Tableau 3). De ce fait les segments côtiers les plus vulnérables sont ceux qui contiennent des tissus urbains importants, un réseau routier développé et des sites historiques et culturels. Les moins vulnérables correspondent à des zones libres de toute intervention humaine.

Tableau 3. Représentation des variables retenues pour le calcul du IVC socio-économique (McLaughlin et Cooper, 2010 ; McLaughlin et al., 2002)

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.

L'agglomération : une côte 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 dans notre étude proviennent des plans d'aménagement côtier de la wilaya de Tipaza (PAC in DGPC, 2017) (Fig. 12 et Tableau 3).

Réseau routier et chemin de fer : sont les facteurs clés de développement social et économique des zones côtières. Il permet 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.12 et Tableau 3).

Occupation de sol : l'occupation de la côte détermine son importance économique et influence sa vulnérabilité. Les zones urbanisées et industrialisées sont considérées très vulnérable, alors que les zones naturelles (roches nues, plages et cours d'eau) sont moins vulnérables (McLaughlin et Cooper, 2010) (Fig.12 et Tableau 3).

Pour bien mener cette étude, les variables (agglomération, route, chemin de fer, occupation des sols) sont extraites par la digitalisation de la carte d'occupation des sols (PAC in DGPC, 2017) (Fig. 12).

Patrimoine culturel : cette variable concerne les monuments historiques et les sites archéologiques localisés dans la région. Ces vestiges sont de grandes valeurs touristiques, sociales et culturelles. Leur 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 Plans d'Aménagement côtiers et des observations sur le terrain (Figs. 13a, 13b et Tableau 3).

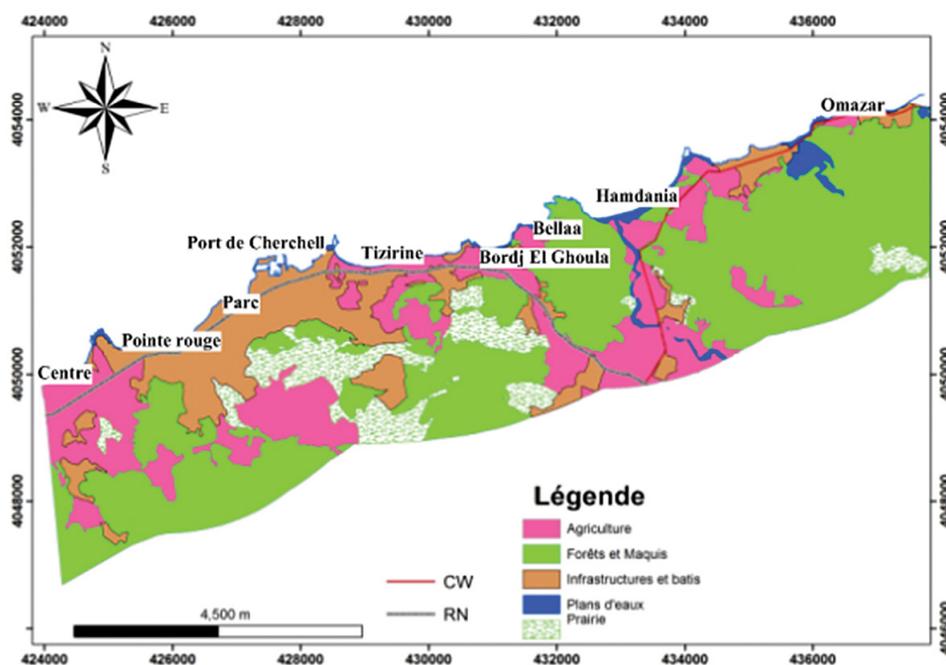


Fig. 12. Agglomération, réseau routier, chemin de fer, occupation des sols de la région de Cherchell.

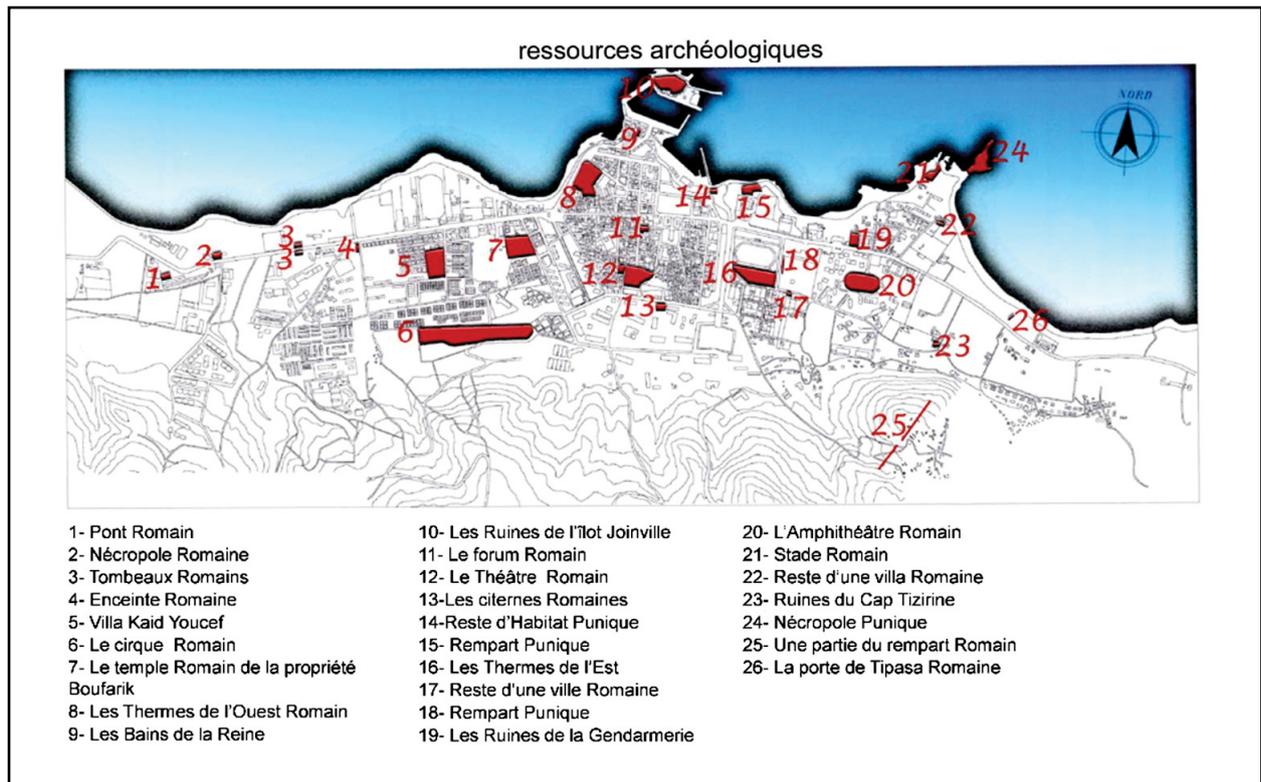


Fig. 13a. Localisation des sites historique et archéologique dans la ville de Cherchell (PAC in DGPC, 2017).



Fig. 13b. Photos de quelques sites historiques de la région de Cherchell (DGPC, 2016).

Variable statut de protection : cette variable concerne les zones côtières importantes du point de vue environnemental et écologique. Ces zones sont délimitées et protégées par des législations nationales ou internationales (Tableau 3). 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).

4. RÉSULTATS

Notre étude nous a permis d'avoir un certain nombre de résultats concernant la vulnérabilité côtière de notre zone d'étude face aux risques d'érosion et de submersion marine. Ces résultats sont présentés dans ce qui suit.

4.1. INDICE DE VULNÉRABILITÉ PHYSIQUE

Concernant l'évaluation de la vulnérabilité physique on constate que 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. L'influence de chaque paramètre est comme suivie (Fig.14a et Tableau 4).

Variable géomorphologie côtière: 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 rocheux. D'après les résultats (Figs. 14a, 14b et Tableau 4), près de la moitié du littoral de Cherchell (48% soit 12,5 km), contenant des plages sableuses et des

Tableau 4. Valeurs attribuées à l'ensemble des cellules et des six indices qui influencent la vulnérabilité physique de la côte de Cherchell

N° de la cellule	Géomorphologie côtière	Pente côtière	Érosion/accrétion des rives	Élévation moyenne de niveau de la mer	Houle a la côte	La marée
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

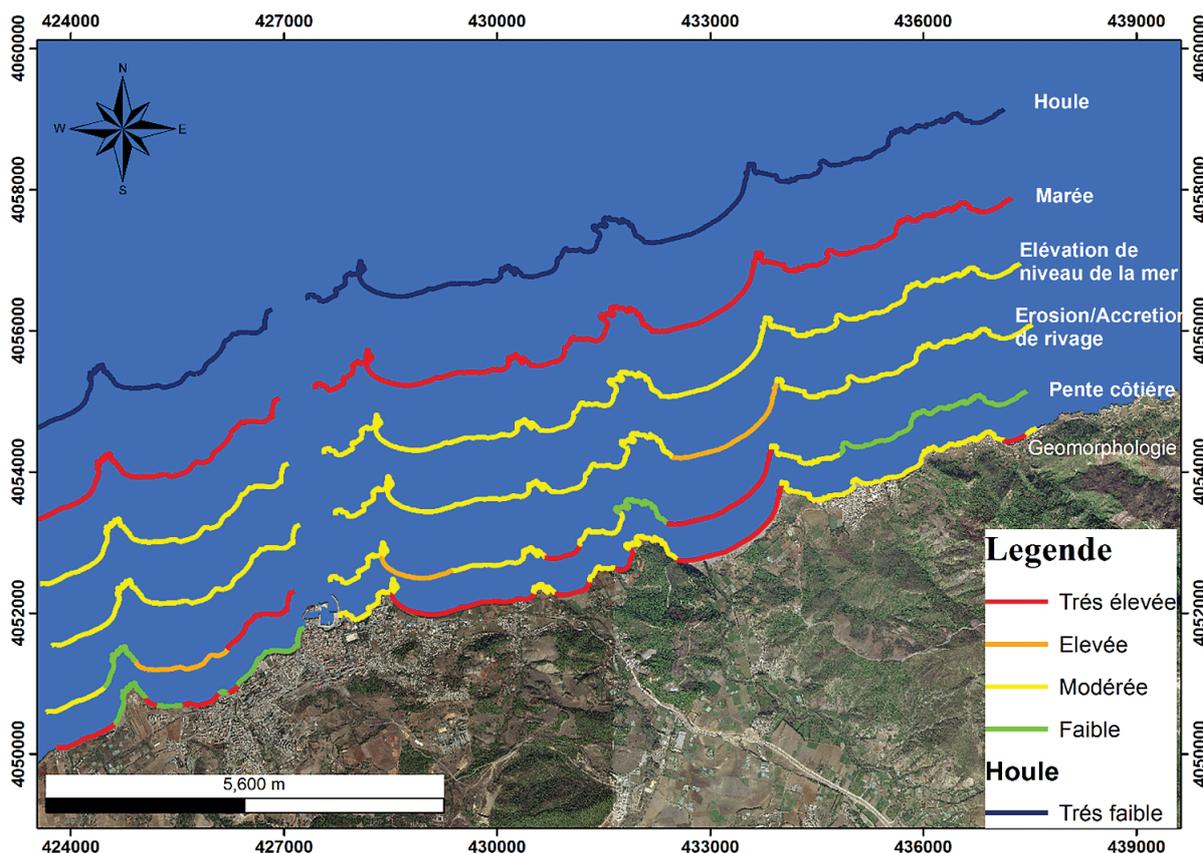


Fig. 14a. Facteurs de risque relatifs aux différentes variables physiques (géomorphologie, pente côtière, taux d'érosion/accrétions des rives, élévation moyenne du niveau de la mer, la marée, hauteur moyenne de la houle) influentes dans la détermination du degré de vulnérabilité de la côte de Cherchell face aux risques d'érosion et de submersion marine.

falaises tendres, présente une vulnérabilité très élevée. En revanche, plus d'un tiers (38% soit 10 km), couvrant les côtes rocheuses, présente une vulnérabilité modérée, tandis qu'une petite partie du littoral (14% soit 3,5 km), présentant des falaises dures, rentre dans la classe de faible vulnérabilité.

Variable pente côtière : 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 présente 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), est exposé à une vulnérabilité élevée, avec des pentes allant de 3 à 6% au niveau des côtes rocheuses, tandis que près d'un quart (24,1% soit 6,2 km) du littoral présente une vulnérabilité très élevée, avec des pentes <3%, le long des plages sableuses (Figs.14a, 14b et Tableau 4).

Variable taux d'érosion/accrétions des rives : les résultats obtenus pour l'évolution du trait de côte, révèlent que 93% (24,2 km) de côtes 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 un risque élevé, avec un taux d'évolution oscillant entre -1 et -1,45 m/an le long de la plage Hamdania (Figs.14a, 14b et Tableau 4).

Taux d'élévation de 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. 14a et Tableau 4). La vulnérabilité relative à cette élévation eustatique sur la côte de Cherchell est modérée.

Hauteurs significatives des vagues à la côte : 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. 14a et Tableau 4).

Amplitude moyenne de 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 ±34 cm par rapport au niveau général de la mer avec un niveau maximal de 1 m. Sur la base de ces résultats, la côte de Cherchell est micro-tidale et présente une vulnérabilité très élevée à l'élévation du niveau de la mer (Fig. 14a et Tableau 4).

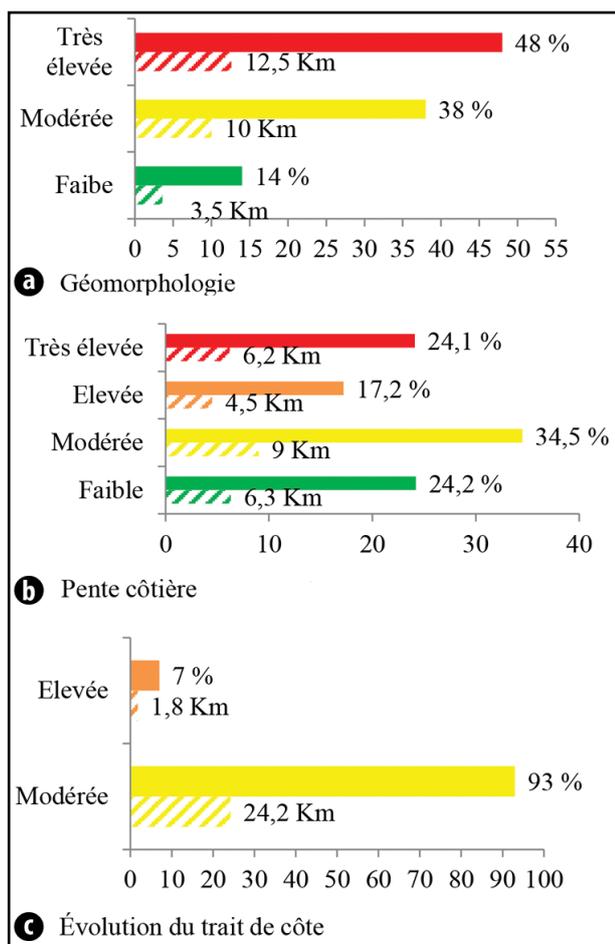


Fig. 14b. Histogrammes de classification des variables de l'IVC – a : géomorphologie côtière ; b : pente côtière ; c : variation du trait de côte – concernant le littoral de Cherchell (longueur et pourcentage relatifs) selon les différentes classes de vulnérabilité physique.

Évaluation de l'indice de vulnérabilité physique : La combinaison des six paramètres a permis de déterminer l'indice de vulnérabilité côtière. 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 sensibilité côtière (risque faible, modéré, élevé et très élevé). Les valeurs des IVC relatives aux risques faible, modéré, élevé et très élevé 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 (Figs. 15a, 15b).

Les résultats obtenus sur l'histogramme (Fig. 15b), 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 plus d'un tiers (35%) de ce littoral présente une vulnérabilité élevée à très élevée où les effets physiques de l'élévation de niveau de la mer pourraient être les plus grands au niveau des accumulations sableuses sur un linéaire côtier de 9,2 km.

En effet, 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 du 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 physiques 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.

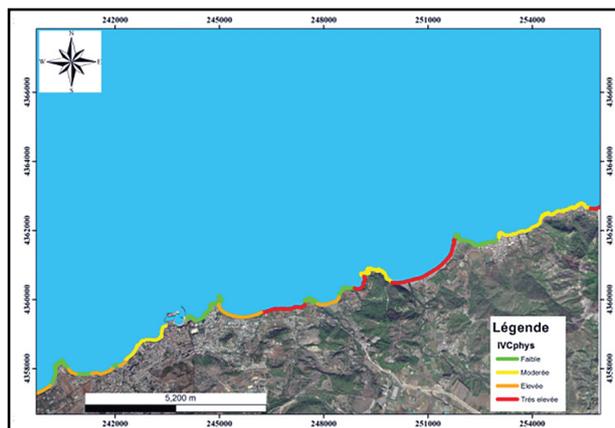


Fig. 15a. Indice de vulnérabilité côtière (*IVCphys*) pour le littoral de Cherchell.

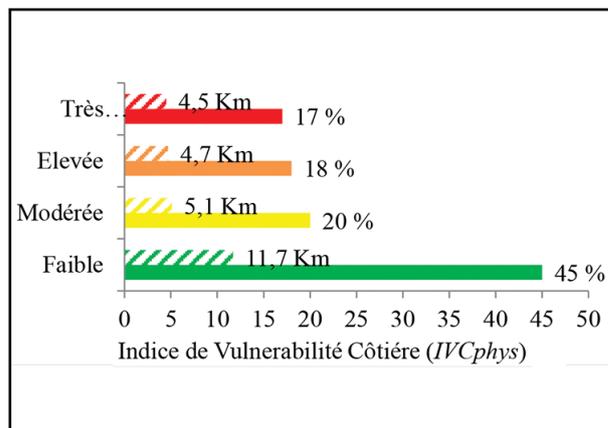


Fig. 15b. Pourcentage du littoral de Cherchell pour chaque degré de vulnérabilité physique.

Une infime 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. Cette partie se caractérise par des plages sableuses à matériaux friables et à pente faible qui se localise d'Est en Ouest à la plage d'Oumazar, Hamdania, Bellaa et la partie Est de la plage Tizirine.

4.2. INDICE DE VULNÉRABILITÉ SOCIOÉCONOMIQUE

Concernant l'évaluation de vulnérabilité socio-économique, on remarque que les indices de vulnérabilité élevés appartiennent aux grandes villes à réseaux routiers et chemin de fer dense et un héritage culturel important, par contre les indices de vulnérabilité faible appartiennent aux zones dépourvues de toute installation humaine. L'influence de chaque paramètre est comme suivie (Tableau 5).

Agglomération : les villes de la région de Cherchell sont concentrées 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 villages Tizirine et Bellaa et les petites villes de Hamdania et Oumazar dans l'extrémité Est du site d'étude. Ce qu'il veut disoit que le côté Ouest est plus vulnérable que le côté Est (Fig. 16a et Tableau 5).

Réseau routier : Deux types de réseau routier traverse la commune de Cherchell, un chemin de wilaya à l'Est à vulnérabilité modérée et une autoroute à l'Ouest à vulnérabilité très élevée. Par contre, la partie centrale de la côte de Cherchell est dépourvue de tous types de réseau

routier, donc la vulnérabilité est très faible dans ce segment de côte (Fig. 16b et Tableau 5).

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.16c et Tableau 5).

Occupation des sols : les zones fortement urbanisées possèdent une vulnérabilité très élevée et concerne la moitié du littoral de Cherchell concentre à l'Ouest, tandis que les segments de côte à forte activité agricole possèdent une vulnérabilité élevée et présente un quart du littoral de Cherchell concentre au centre. Le reste de la région, dépourvu de toute activité humaine, est présenté par des plans d'eau, espaces verts, roches nues et parfois des forêts ; ces segments de côte possèdent une vulnérabilité allant de très faible à modérée et présentent un quart du littoral de Cherchell (Fig. 16d et Tableau 5).

Héritage culturel : L'héritage culturel est dominé dans la partie Ouest, au niveau de la ville de Cherchell, du siège des civilisations romaines et coloniales, à l'exception de quelques vestiges à l'Est dans la région de Hamdania. Ces vestiges sont placés parmi le patrimoine national et, 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. 16e et Tableau 5).

Site de protection : la région de Cherchell ne dispose pas de site de protection, la cotation de vulnérabilité attribuée à cette variable est très faible (Fig. 16f et Tableau 5).

Évaluation de l'indice de vulnérabilité socio-économique : Les valeurs obtenues par le calcul d'*IVCsocio-eco* de la côte de Cherchell vont de 0,41 à 10,21. On distingue quatre classes de vulnérabilité : faible, modérée, élevée et très élevée (Fig. 17).

Tableau 5. Valeurs attribuées à l'ensemble des cellules et aux six indices qui influencent 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

Ces résultats révèlent que 28% (7,17 km) du littoral présente une vulnérabilité socio-économique faible au risque d'érosion et de submersion, avec des valeurs d'*IVCsocio-eco* allant de 0,41 à 0,82, couvrant la région de Hamdania, Cap Blanc, Bellaa, et Bordj el Ghoula. 24% (6,27 km) du littoral présente une vulnérabilité modérée, avec des valeurs d'*IVCsocio-eco* allant de 0,91 à 2,24, couvrant la côte rocheuse d'Oumazar, Cap des Trois îlots, pointe el Riadh, Cap

Tizirine, Pointe Rouge et la plage Centre. 31% (8,06 km) du littoral présente une vulnérabilité élevée, avec des valeurs d'*IVCsocio-eco* allant de 2,74 à 4,56, couvrant les petites villes d'Oumazar, Hamdania, Tizirine et Parc. 17% (4,48 km) du littoral présente une vulnérabilité très élevée, avec des valeurs d'*IVCsocio-eco* allant de 5,77 à 10,21, couvrant la ville de Cherchell.

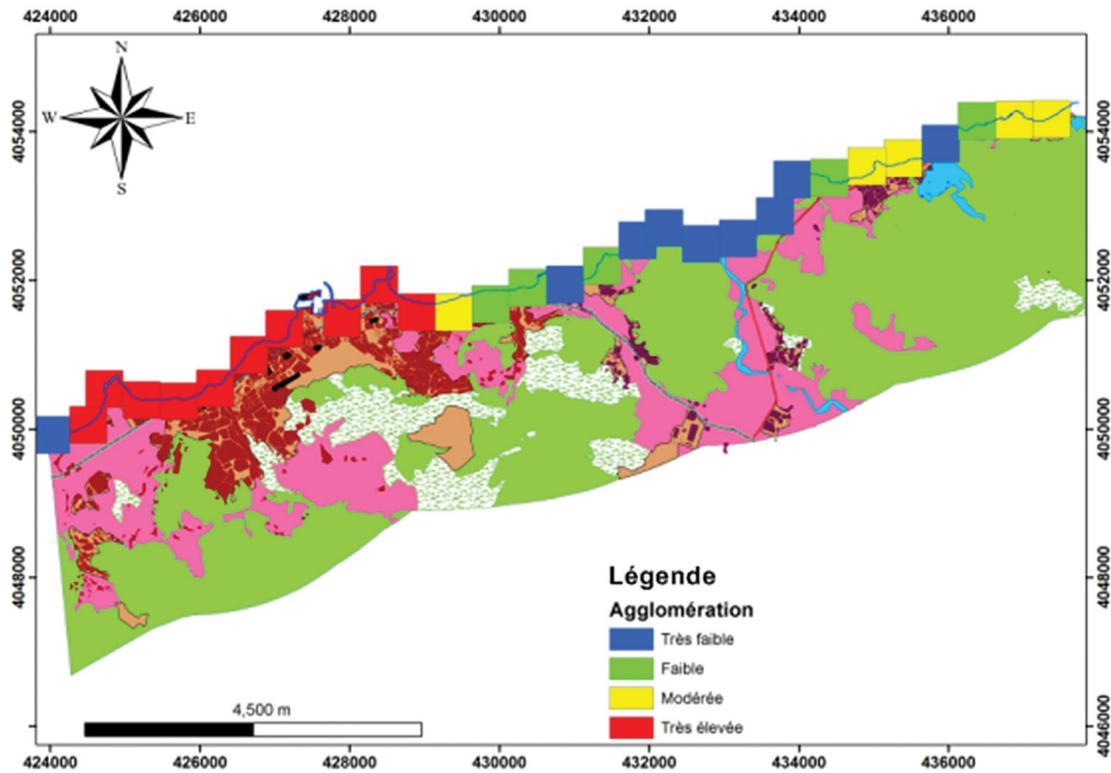


Fig. 16a. Facteur de risque relatif à la variable agglomération, influente dans la détermination du degré de vulnérabilité socio-économique due aux risques d'érosion et de submersion marine du littoral de Cherchell.

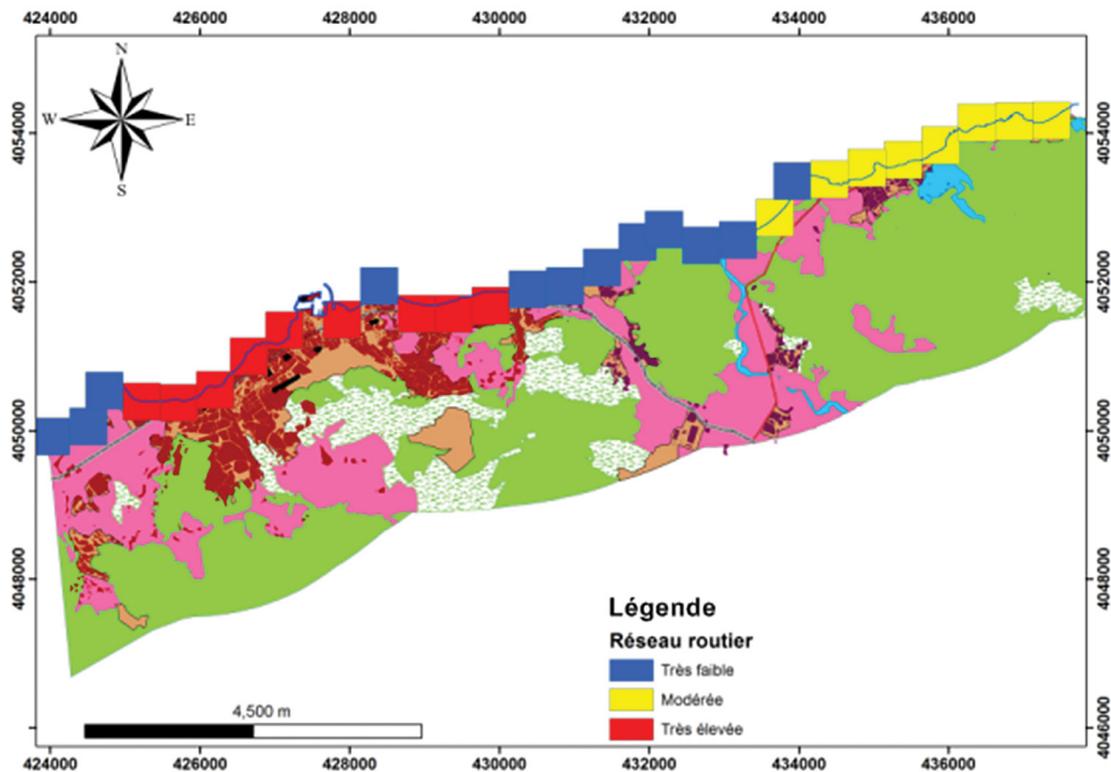


Fig. 16b. Facteur de risque relatif au variable réseau routier, influent dans la détermination du degré de vulnérabilité socio-économique due aux risques d'érosion et de submersion marine du littoral de Cherchell.

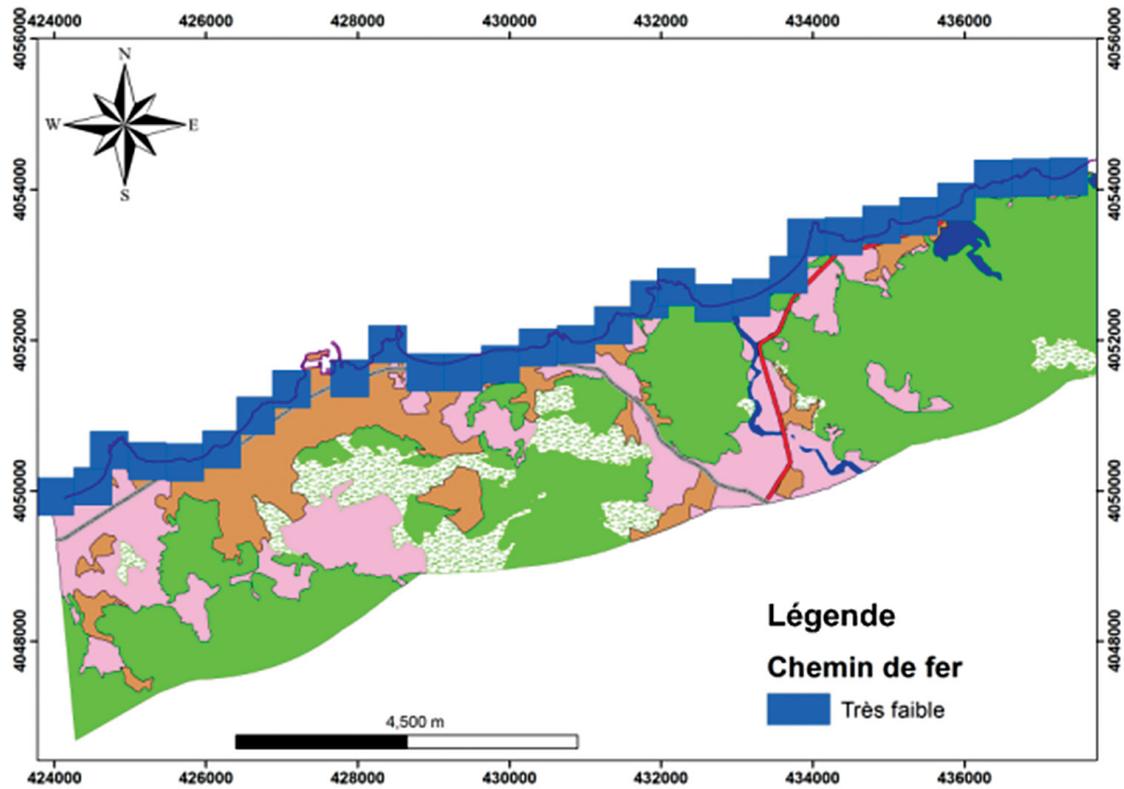


Fig. 16c. Facteur de risque relatif au variable chemin de fer, influent dans la détermination du degré de vulnérabilité socio-économique due aux risques d'érosion et de submersion marine du littoral de Cherchell.

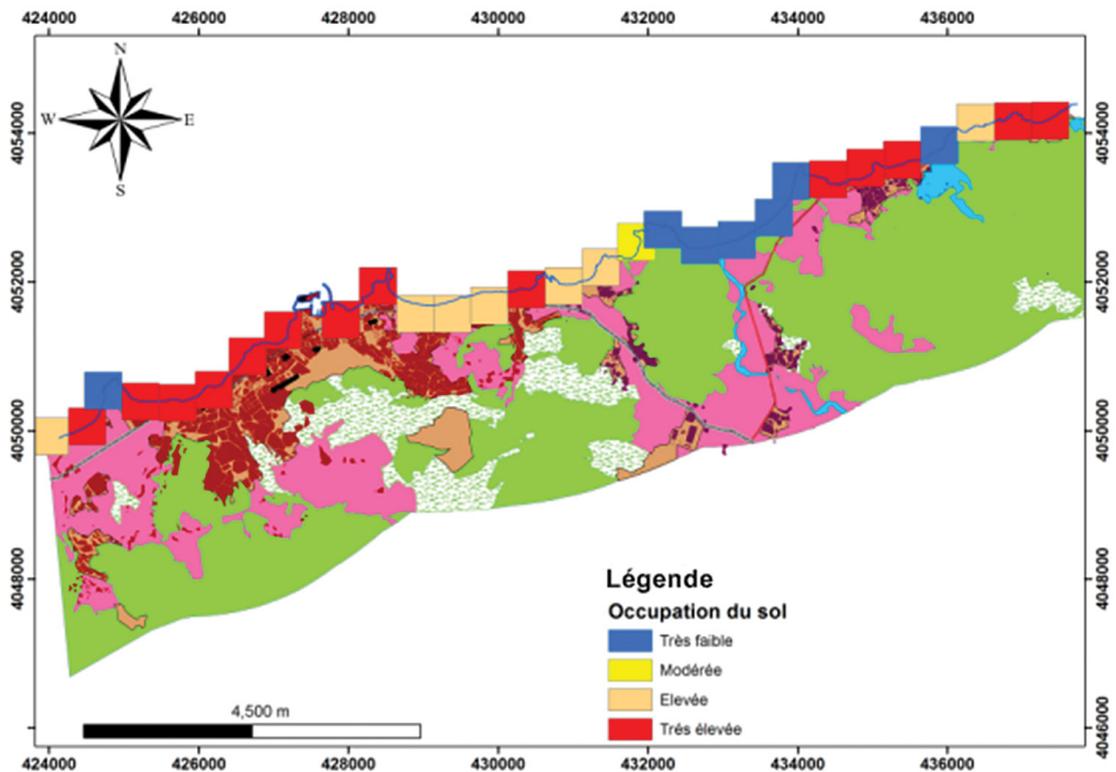


Fig. 16d. Facteur de risque relatif à la variable occupation des sols, influent dans la détermination du degré de vulnérabilité socio-économique due aux risques d'érosion et de submersion marine du littoral de Cherchell.

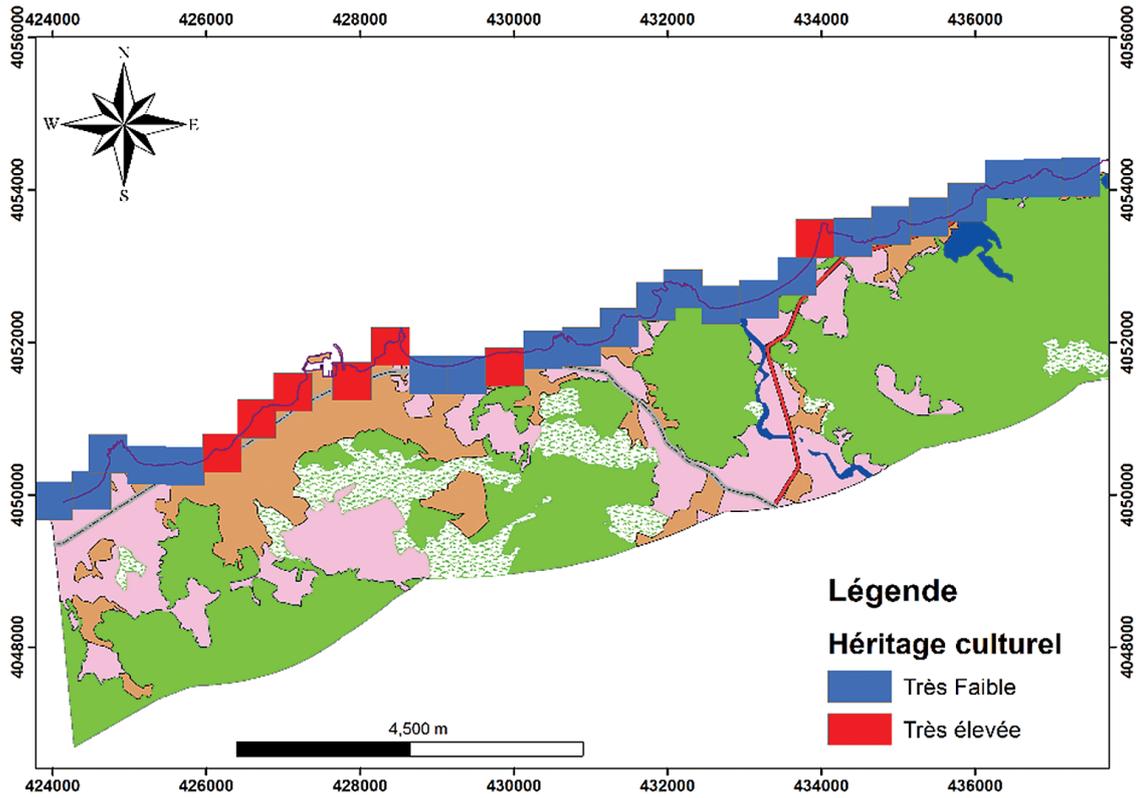


Fig. 16e. Facteur de risque relatif au variable héritage culturel, influent dans la détermination du degré de vulnérabilité socio-économique due aux risques d'érosion et de submersion marine du littoral de Cherchell.

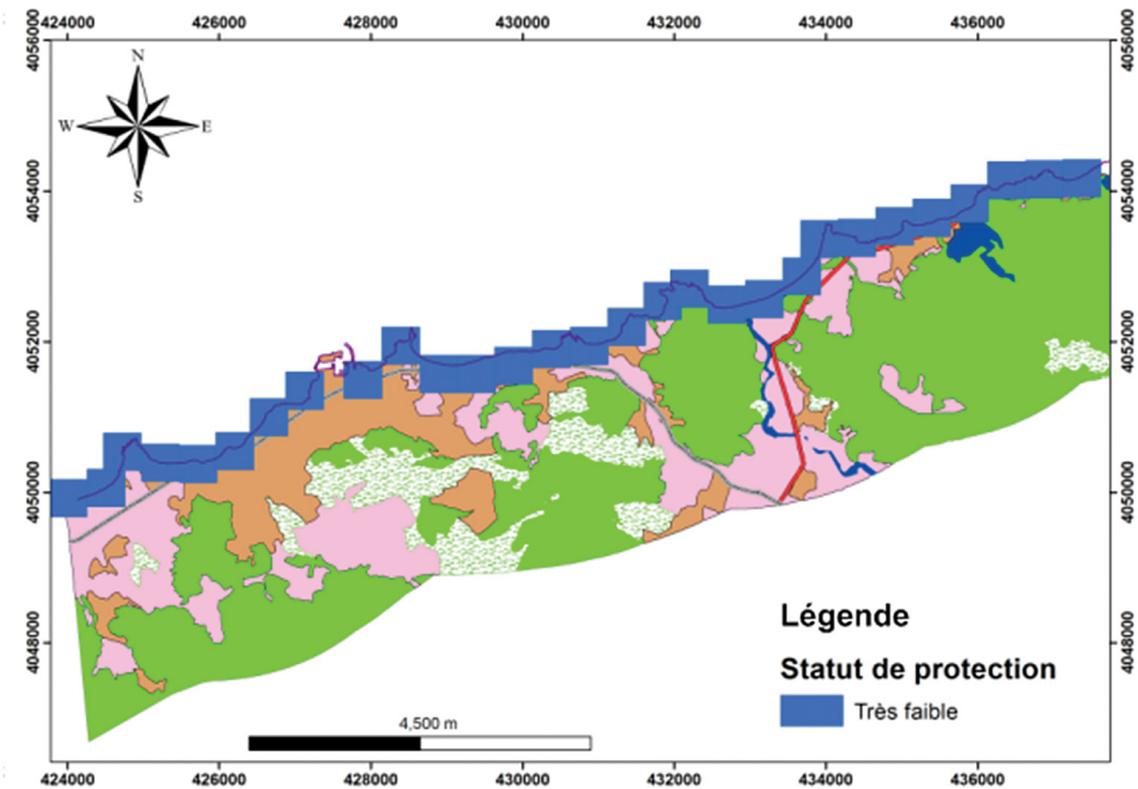


Fig. 16f. Facteur de risque relatif à la variable statut de protection, influence dans la détermination du degré de vulnérabilité socio-économique due aux risques d'érosion et de submersion marine du littoral de Cherchell.

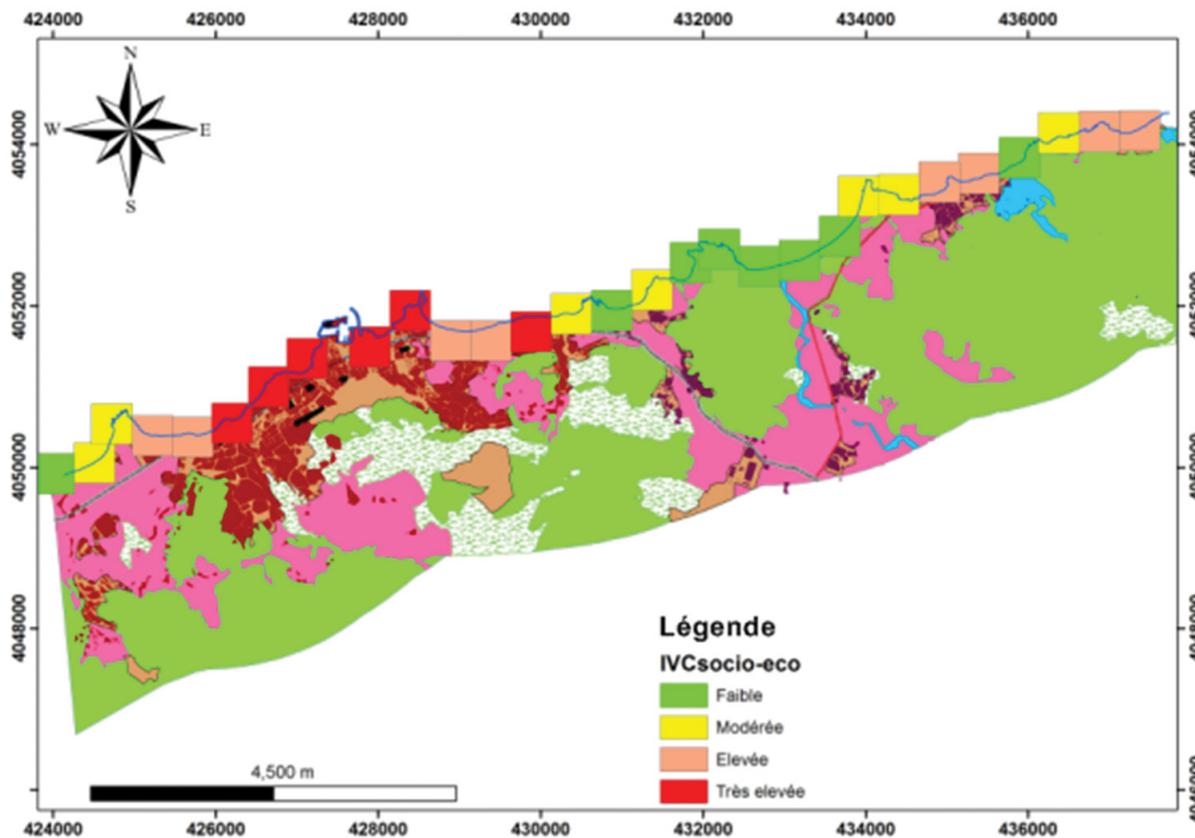


Fig. 17. Indice de vulnérabilité côtière (IVCsocio-éco) pour le littoral de Cherchell.

5. 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, ces segments de côte étant représentés 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 l'arrière-pays de la région (barrage de Boukerdene).

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 ses dernières années dans la région de Hamdania. Cette érosion s'explique par la diminution des apports sédimentaires d'oued El Hachem due

à la construction de barrage 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 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. 18).

La submersion marine 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. Les résultats obtenus sur la côte de Cherchell révèlent que 52% du littoral présentent une vulnérabilité socio-économique faible à modérée à l'érosion et à la submersion marines et 48% possèdent une vulnérabilité élevée a très élevée (Fig. 18). 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, 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

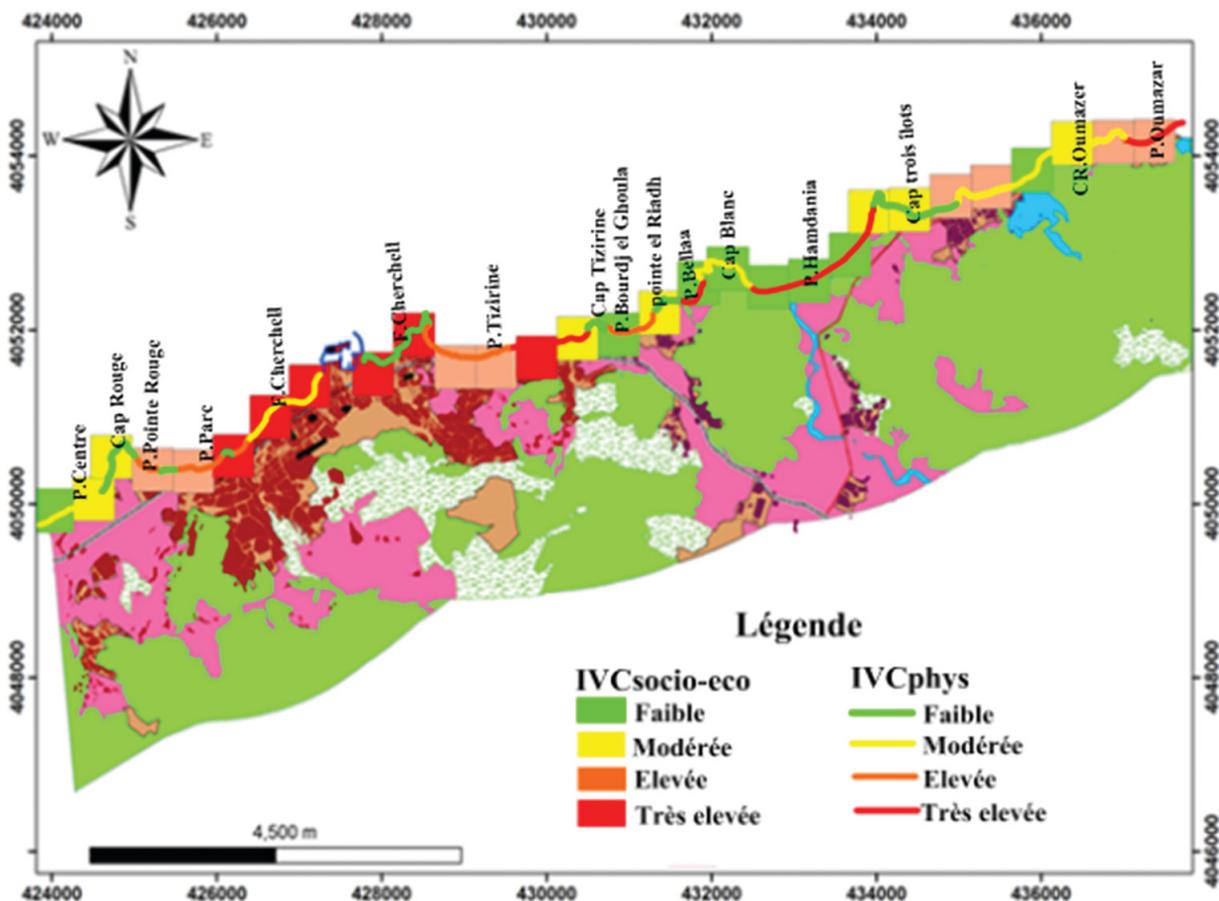


Fig. 18. Superpositions des indices de vulnérabilité côtière (*IVCphys* et *IVCsocio-éco*) pour le littoral de Cherchell.

aux zones de forte occupation humaine, telle que les villes d'Oumazar, Hamdania, 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 villages à vocation agricole telle que les villages d'Oumazar, Hamdania, Pointe el Riadh, Tizirine et Centre. Parmi ces zones, il y a les falaises hautes à accès difficile et à fort couvert végétal. Ces zones sont presque dépourvues de tous types de vie humaine, telle que les forts (Oumazar et Cap Blanc), les plans d'eau et les plages (Hamdania, Bellaa, et Bordj el Ghoula), ces zones sont de faible vulnérabilité socio-économique (Fig. 18).

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 au risque d'érosions et de submersion sur les zones côtières.

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 plage, 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.

6. CONCLUSION

La détermination des zones côtières les plus vulnérables par les méthodes développées par Hammar-Klose et Thieler (2001) (*IVCphys*) et de McLaughlin et Cooper (2010) (*IVCsocio-éco*), met en évidence les zones les plus vulnérables à l'érosion et aux submersions sur le littoral de Cherchell. Ainsi nous avons pu établir la carte de vulnérabilité physique côtière, qui a montré une vulnérabilité élevée à très élevée, face aux risques d'érosion et de submersion, au niveau des accumulations sableuses, et une vulnérabilité faible à modérer au niveau des falaises et des côtes rocheuses.

En revanche, la carte de vulnérabilité socio-économique révèle une forte vulnérabilité correspondant aux zones urbanisées à vocation économique, avec un réseau routier important et des monuments historiques. Par contre, la faible vulnérabilité coïncide avec les zones dépourvues de toutes interventions humaines.

Ces cartes de vulnérabilité présentent un appui pour les décideurs et les planificateurs à mettre des stratégies, non seulement pour atténuer ou s'adapter aux risques d'érosion et de submersion sur chaque segment du littoral, mais aussi pour la gestion actuelle et future de cette côte.

Au terme de cette étude, il apparaît que le littoral de Cherchell est physiquement et socio économiquement

vulnérable aux risques d'érosion et de submersion marine. 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.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BORUFF, B.J., EMRICH, C., CUTTER, S.L. (2005). Erosion hazard vulnerability of US coastal counties. *Journal of coastal research*, 932-942.
- BOUTIBA, M., GUENDOUZ, M. (2006). Géomorphologie dynamique et mouvements des sédiments le long de la côte sableuse Jijelienne (Est Algérie). *Thèse, Université des sciences et de la technologie Houari Boumediène, Alger*, 252 p.
- CROWELL, M., LEATHERMAN, S.P., BUCKLEY, M.K. (1991), Historical shoreline change: error analysis and mapping accuracy, *Journal of coastal research*, 839-852.
- 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.
- DHI (2007). MIKE21 Spectral Waves FM Module: User Guide. Danish Hydraulic Institute
- DJABRI, L., BOUHSINA, S., HANI, A., CHAFFAI, H., BOUGHERIRA, N., ABDESLAM, I., FEHDI, C., BAALI, F. (2019). Essai de cartographie du risque d'intrusion marine par une approche multicritères: cas de la nappe de Collo (N-E, ALGERIEN). *Larhyss Journal*, **38**: 7-20.
- DJOUDEUR, F., BOUTIBA, M. (2017). Vulnerability assessment of coastal areas to sea level rise from the physical and socioeconomic parameters: case of the Gulf Coast of Bejaia, Algeria. *Arabian Journal of Geosciences*, **10** (14): 299, <https://doi.org/10.1007/s12517-017-3062-5>
- 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., VINAY, S., DINAKAR, S., PAI, J.B., MAHAGANESH, K., NATESAN, U. (2008). Integrated coastal zone management plan for Udipi coast using remote sensing, geographical information system and global position system. *Journal of Applied Remote Sensing*, **2** (1): 023515.
- DWARAKISH, G., VINAY, S., NATESAN, U., ASANO, T., KAKINUMA, T., VENKATARAMANA, K., PAI, B.J., BABITA, M. (2009), Coastal vulnerability assessment of the future sea level rise in Udipi coastal zone of Karnataka state, west coast of India. *Ocean & Coastal Management*, **52** (9): 467-478.
- FELSENSTEIN, D., LICHTER, M. (2014). Social and economic vulnerability of coastal communities to sea-level rise and extreme flooding. *Natural Hazards*, **71**(1): 463-491.
- GAKI-PAPANASTASSIOU, K., KARYMBALIS, E., POULOS, S.E., SENI, A., ZOUVA, C. (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.
- GENZ, A.S., FLETCHER, C.H., DUNN, R.A., FRAZER, L.N., ROONEY, J.J. (2007). The predictive accuracy of shoreline change rate methods and alongshore beach variation on Maui, Hawaii. *Journal of coastal research*, 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.
- GORNITZ, V. (1990). Vulnerability of the East Coast, USA to future sea level rise. *Journal of coastal research*, 201-237.
- GORNITZ, V. (1991). Global coastal hazards from future sea level rise. *Global and Planetary Change*, **3** (4): 379-398.
- GORNITZ, V. (1993). Mean sea level changes in the recent past. *Climate and sea level change, observations, projections and implications*, 25-44.
- GORNITZ, V.M., DANIELS, R.C., WHITE, T.W., BIRDWELL, K.R. (1994). The development of a coastal risk assessment database: vulnerability to sea-level rise in the US Southeast. *Journal of coastal research*, 327-338.
- GOROKHOVICH, Y., LEISEROWITZ, A., DUGAN, D. (2013). Integrating coastal vulnerability and community-based subsistence resource mapping in Northwest Alaska. *Journal of coastal research*, **30** (1): 158-169.

- HAMMAR-KLOSE, E.S., THIELER, E.R. (2001). Coastal vulnerability to sea-level rise: a preliminary database for the U.S. Atlantic, Pacific, and Gulf of Mexico coasts. *U.S. Geological Survey Digital Data Series - 68*.
- HOLTHUIJSEN, L.H., BOOUJ, N., HERBERES, T.H.C. (1989). A Prediction Model for Stationary, Short-crested Waves in Shallow Water with Ambient Currents. *Coastal Engineering*, Vol. **13**: 23-54.
- HUGHES, P., BRUNDRIT, G., SEARSON, S. (1992). The vulnerability of Walvis Bay to rising sea levels. *Journal of coastal research*, 868-881.
- JIMENEZ, J.A., SÁNCHEZ-ARCILLA, A. (1997). Physical impacts of climatic change on deltaic coastal systems (II): driving terms. *Climatic Change*, **35** (1): 95-118.
- JOEVIVEK, V., SARAVANAN, S., CHANDRASEKAR, N. (2013). Coastal vulnerability and shoreline changes for southern tip of India—remote sensing and GIS approach. *J Earth Sci Clim Change*, **4** (144): 2.
- KHALFANI, D. (2014). Etude hydro-sédimentaire à l'avant cote de Cap Djinet wilaya de Boumerdes. *Thèse*, 196 p.
- KLEIN, R.J., NICHOLLS, R.J. (1999). Assessment of coastal vulnerability to climate change, *Ambio*, 182-187.
- LAFITTE, A., DENIS, J., HENOCQUE, Y., ANDRAL, B., BOISSERY, P. (2012). Élaboration et test d'indicateurs de suivi des initiatives locales de gestion intégrée du littoral méditerranéen. *Revue Paralia*, **5**: 4.1-4.12.
- LEM (2016) Etude de l'avant-projet détaillé du nouveau port Centre de Cherchell. Mission.1, Chapitre 4.13-Réexamen de Données de base et Chapitre 4.10-Investigations environnementales.
- MCLAUGHLIN, S., COOPER, J.A.G. (2010). A multi-scale coastal vulnerability index: A tool for coastal managers? *Environmental Hazards*, **9** (3): 233-248.
- MCLAUGHLIN, S., MCKENNA, J., COOPER, J. (2002). Socio-economic data in coastal vulnerability indices: constraints and opportunities. *Journal of coastal research*, **36** (sp 1): 487-497.
- MIHOUBI, M., BELKESSA, R., LATRECHE, M. (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.
- MOHAMED, M., BENMAILI, K. (2016). Caractérisation physico-chimique des eaux souterraines de la nappe alluviale de l'oued el Hachem (Tipaza). *Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention d'un diplôme de Master*, Université Djilali Bounaama de Khemis Miliana, Algérie, 105 p.
- NICHOLLS, R., HOOZEMANS, F. (1996). The Mediterranean: vulnerability to coastal implications of climate change. *Ocean & Coastal Management*, **31** (2-3): 105-132.
- PASKOFF, R.P. (2001). L'élévation du niveau de la mer et les espaces côtiers. Le mythe et la réalité. Collection «Propos», *Institut Océanographique*, Paris, 191 p.
- RABEHI, W., GUERFI, M., MAHI, H. (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
- TADRIST, N., DEBAUCHE, O., REMINI, B., XANTHOULIS, D., DEGRÉ, A. (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.
- 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., 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., HIMMELSTOSS, E.A., ZICHICHI, J.L., ERGUL, A. (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.