

Recul des falaises côtières au sud d'Agadir (Maroc atlantique) : évaluation et analyse des facteurs en jeu

Coastal cliff retreat south of Agadir (Atlantic Morocco): assessment and analysis
of the factors at play

Retroceso de los acantilados costeros al sur de Agadir (Marruecos atlántico):
evaluación y análisis de los factores en juego

M'hamed Nmiss

mhamed.nmiss@usmba.ac.ma  0009-0001-4107-3690

Laboratoire Dynamiques des Espaces et des Sociétés (LADES), Département de Géographie, Faculté des Lettres et des Sciences
Humaines de Mohammedia, Université Hassan II de Casablanca, avenue Hassan II, B.P. 546, Mohammedia, Maroc.

Mhamed Amyay

mhamedamyay@hotmail.com  0009-0004-4207-3539

Equipe de Recherche : Milieux Naturels, Aménagement et Dynamiques Socio-Spatiales (MNADSS). FLSH Fès-Sais, Université Sidi
Mohamed Ben Abdellah-Fès, BP 59, Route Immouzer, 30000 Fès, Maroc.

Nadia Atiki

nadiaatiki90@gmail.com  0009-0001-4107-3690

Equipe de Recherche : Milieux Naturels et Aménagement Spatiale (MNAS). Département de Géographie, FLSH Tétouan,
Université Abdelmalek Essaâdi, BP 210 Martil Tétouan, Maroc.

Abderrahmane Ouammou

a.ouammou@uiz.ac.ma  0009-0000-3579-1947

Hassan Nait-Si

hassan.nait-si@edu.uiz.ac.ma  0000-0003-3299-5447

Mahjoub Benbih

benbihmahjoub@gmail.com  0009-0008-5759-8097

Equipe de Recherche : Géographie, Aménagement, Démographie et Développement (GEAMDD),
Département de Géographie, FLSH Agadir, Université Ibn Zohr, Cité Dakhla, BP 29/8, Agadir, Maroc.

8

INFO ARTÍCULO

Reçu : 03-04-2025

Révisé : 24-04-2025

Accepté : 22-05-2025

MOTS CLÉS

SIG

DSAS

Données spatiales

Tifnit

Sidi Toulal

RÉSUMÉ

Les falaises côtières sont des environnements complexes, intrinsèquement érosifs et dynamiques, qui ne sont jamais en équilibre. Leur évolution, irréversible et rapide, résulte d'une combinaison de facteurs intrinsèques et extrinsèques. L'étude de ces formations est devenue une préoccupation majeure pour comprendre la dynamique des littoraux et améliorer la gestion des zones côtières. Cette étude présente les résultats d'une évaluation du recul des falaises côtières sur le littoral atlantique marocain, en prenant comme cas d'étude la côte située au sud d'Agadir. L'évaluation a été réalisée à l'aide d'un environnement SIG et de données spatiales de haute résolution, telles que des photographies aériennes et des orthophotos issues du satellite Pléiades. L'analyse diachronique de l'évolution des falaises a été menée sur une période de 32 ans (1986-2018), en utilisant à la fois la méthode surfacique et l'outil DSAS (Digital Shoreline Analysis System). Deux sites particulièrement touchés par l'érosion ont été sélectionnés pour quantifier le recul des falaises : Tifnit et Sidi Toulal. Les résultats indiquent un recul moyen de 0,37 m/an à Tifnit, avec une surface perdue de 25 455 m², et un recul de 0,22 m/an à Sidi Toulal, avec une surface perdue de 5 088 m². Cependant, l'analyse de la variabilité spatiale révèle des zones fortement exposées à l'érosion et d'autres faiblement affectées. Cette variabilité s'explique par l'interaction de plusieurs facteurs : marins (exposition aux vagues), lithologiques (propriétés physiques du massif rocheux), subaériens (conditions météorologiques)



et anthropiques (interventions humaines). Cette étude pourrait constituer un support solide pour les aménageurs, notamment dans un contexte mondial marqué par l'élévation du niveau de la mer.

KEYWORDS

Cliffs
GIS
Spatial data
Tifnit
Sidi Toual

ABSTRACT

Coastal cliffs are complex, intrinsically erosive, and dynamic environments that are never in equilibrium. Their evolution, both irreversible and rapid, results from a combination of intrinsic and extrinsic factors. The study of these formations has become a major concern for understanding coastal dynamics and improving the management of coastal areas. This research presents the results of an assessment of coastal cliff retreat along the Moroccan Atlantic coastline, focusing on the southern coast of Agadir as a case study. The evaluation was conducted using a GIS environment and high-resolution spatial data, including aerial photographs and orthophotos from the Pléiades satellite. A diachronic analysis of cliff evolution was carried out over a 32-year period (1986-2018), employing both the surface method and the DSAS (Digital Shoreline Analysis System) tool. Two sites particularly affected by erosion were selected to quantify cliff retreat: Tifnit and Sidi Toual. The results indicate an average retreat of 0.37 m/year at Tifnit, with a total lost surface area of 25,455 m², and 0.22 m/year at Sidi Toual, with a total lost surface area of 5,088 m². However, the spatial variability analysis reveals areas highly exposed to erosion, while others are less affected. This variability is explained by the interaction of multiple factors: marine (wave exposure), lithological (physical properties of the rock mass), subaerial (meteorological conditions), and anthropogenic (human interventions). This study could serve as a valuable resource for planners, particularly in a global context marked by rising sea levels.

PALABRAS CLAVE

Acantilados
SIG
Datos espaciales
Tifnit
Sidi Toual

RESUMEN

Los acantilados costeros son entornos complejos, intrínsecamente erosivos y dinámicos, que nunca están en equilibrio. Su evolución, irreversible y rápida, resulta de la combinación de factores intrínsecos y extrínsecos. El estudio de estas formaciones se ha convertido en una preocupación fundamental para comprender la dinámica costera y mejorar la gestión de las zonas litorales. Esta investigación presenta los resultados de una evaluación del retroceso de los acantilados costeros en la costa atlántica de Marruecos, tomando como caso de estudio la costa situada al sur de Agadir. La evaluación se llevó a cabo utilizando un entorno SIG y datos espaciales de alta resolución, como fotografías aéreas y ortofotos del satélite Pléiades. Se realizó un análisis diacrónico de la evolución de los acantilados a lo largo de un período de 32 años (1986-2018), empleando tanto el método superficial como la herramienta DSAS (Digital Shoreline Analysis System). Se seleccionaron dos sitios particularmente afectados por la erosión para cuantificar el retroceso de los acantilados: Tifnit y Sidi Toual. Los resultados indican un retroceso medio de 0,37 m/año en Tifnit, con una superficie perdida de 25.455 m², y de 0,22 m/año en Sidi Toual, con una superficie perdida de 5.088 m². Sin embargo, el análisis de la variabilidad espacial revela zonas altamente expuestas a la erosión y otras menos afectadas. Esta variabilidad se explica por la interacción de múltiples factores: marinos (exposición a las olas), litológicos (propiedades físicas del macizo rocoso), subaéreos (condiciones meteorológicas) y antropogénicos (intervenciones humanas). Este estudio podría constituir un recurso valioso para los planificadores, especialmente en un contexto global marcado por el aumento del nivel del mar.

9

1. INTRODUCTION

Les falaises côtières sont des environnements complexes intrinsèquement érosifs (Naylor *et al.*, 2010 ; Kennedy *et al.*, 2014). À l'échelle mondiale ces formations littorales constituent 80% de la ligne côtière globale (Emery & Kuhn, 1986). L'évolution et la dynamique de ces milieux résultent de la conjonction de plusieurs facteurs internes liés principalement aux propriétés physiques du massif rocheux (lithologie, propriétés mécaniques, état de la roche (altération), discontinuités mécaniques (fractures). D'autres facteurs d'ordre continentaux (dissolution, cryoclastie, hydroclastie, bio-érosion) et marins (vagues, les tempêtes hivernales) interviennent également dans le processus évolutif des falaises côtières. Au cours des dernières décennies, les travaux de recherches portant sur l'érosion et le recul des falaises côtières se sont multipliés du fait de prise de conscience de l'élévation du niveau de la mer due au changement climatique et aux risques associés



(Trenhaile, 2002 ; Hutchinson, 2006 ; Vann Jones *et al.*, 2015 ; Costa & Delval, 2019). Par rapport à l'érosion des zones de plages qu'on peut visualiser à l'œil nu, l'érosion des falaises est un phénomène irréversible qui illustre par des effondrements ou des glissements brutale menaçant les collectivité et les infrastructures le long des côtes mondiaux (Earlie *et al.*, 2015 ; Diguët, 2019). L'érosion progressive des falaises constitue un risque avéré, freinant l'expansion des infrastructures touristiques (Federici & Roadolfi, 2001). Ce phénomène est amplifié par les aléas naturels liés au changement climatique, notamment l'élévation du niveau de la mer et l'intensification des tempêtes (Del Río & Gracia, 2009 ; Trenhaile, 2014a ; Vann Jones *et al.*, 2015 ; Alessio & Keller, 2020).

Au cours des dernières décennies, les études sur les falaises a développé un amalgame de méthodes et de techniques permettant de quantifier de façon précise leur évolution. Parmi ces méthodes et techniques on trouve les mesures sur le terrain et la photo-interprétation (photo-aériennes et images satellitaires). Celles-ci ont été parmi les premières techniques utilisés pour le suivi et la quantification du taux de recul des falaises. Aujourd'hui, ces outils deviennent de plus en plus sophistiqués et précis. Ils permettent de surveiller et de détecter les morphologies, les volumes et les processus d'évolution des falaises avec une grande précision. La télédétection par LIDAR ("Light detection and ranging") qui restitue la géométrie de la surface d'une falaise avec une précision centimétrique au travers de modèles numériques tridimensionnels (Guiliano, 2015), est l'une de ces techniques, bien qu'elle ne soit pas utilisée dans ce travail. Ainsi, l'imagerie satellitaire et les Systèmes d'informations géographiques sont également des moyens efficaces pour la surveillance de dynamique des falaises. Ces moyens offrent une grande possibilité de suivre l'état évolutif des falaises au fil de temps. Elles sont basés sur la comparaison des photos aériennes anciens avec celles des images satellitaire récentes (Hénaff *et al.*, 2002 ; Letortu *et al.*, 2014 ; Costa *et al.*, 2015), afin d'estimer le recul des falaises sur des périodes différentes en fonction de la disponibilité des images. Avec le progrès technologique dans le domaine des systèmes d'information géographique, il est possible aujourd'hui de quantifier le recul des falaises et de déterminer les zones les plus touché par l'érosion. En effet, les SIG par leur capacité d'acquérir, rassembler, stocker, manipuler, analyser, et afficher les données géographiquement référencées (Clarke, 1986, Nmiss *et al.* ; 2020, Nait-Si *et al.*, 2021 ; Nmiss *et al.*, 2025) constituent des outils adaptés à de tels espaces où s'interfèrent de nombreuses composantes. A l'échelle mondiale l'utilisation de ces moyens pour quantifier l'évolution des falaises indiquent des valeurs variante de 0,02 m à 0,5 mètre par ans (Rosser *et al.*, 2005, Lim *et al.*, 2010). Ces variations de taux dépendent essentiellement des caractéristiques géologiques, météorologiques, de l'exposition aux vagues, et les variations spatio-temporelles du type de technique d'analyse utilisée (Leveridge & Hartley, 2006).

Sur le littoral Atlantique marocain, les falaises côtières présentent un élément essentiel du paysage côtier. Depuis longtemps, ces falaises ont suscité un intérêt particulier par les géologues et les quaternaristes afin de reconstituer les paléoclimats et les paléoenvironnements qui ont été régné au cours du quaternaire. Cependant, de point de vue dynamique, l'étude de leur évolution a fait l'objet d'une faible production scientifique par rapport aux plages (Nmiss *et al.*, 2025a ; Aangri *et al.*, 2024 ; Lharti *et al.*, 2024, Nmiss *et al.*, 2022 ; Nmiss *et al.*, 2021b ; Bourhili *et al.*, 2023 ; Aouiche *et al.*, 2016 ; El Mrini *et al.*, 2013). Ceci s'explique d'une part, par la faible vitesse de recul, et d'autre part, par la complexité de ces systèmes côtiers dont l'évolution est régie par plusieurs facteurs marins, atmosphériques (agents subaériens) et continentaux. Pourtant, dans les Cinq dernières années plusieurs travaux de recherches ont été publié en traitant le phénomène de recul des falaises dans les différentes régions du Maroc (Sederati *et al.*, 2022 ; Imam *et al.*, 2023 ; Naji *et al.*, 2025 ; Nmiss *et al.*, 2024 ; Naji *et al.*, 2024.). Ces travaux de recherches ont appuyé sur le moyen SIG pour évaluer l'état évolutif des falaises et de déterminer leur évolution au fil du temps.

Cet article vise à analyser la dynamique contemporaine des falaises du littoral entre Sidi Toual et Tifnit, au sud d'Agadir, à travers une étude multidécennale de leur évolution. Pour ce faire, nous nous sommes appuyés sur des données spatiales de haute résolution, notamment des photographies aériennes de la mission 1986 et des orthophotos de 2018. Ces données ont été analysées et traitées dans un environnement SIG à l'aide de l'outil DSAS intégré à ArcGIS. L'objectif principal ici est de calculer le taux de recul moyen des falaises en mettant en évidence les secteurs les plus affectés par l'érosion marine, en prenant pour exemple deux sites : Sidi Toual et Tifnit (figure 1 a). Ainsi, la compréhension des processus et des mécanismes responsables du recul des falaises est essentielle pour une meilleure connaissance du milieu côtier, notamment dans un contexte d'élévation



du niveau de la mer et d'augmentation de la fréquence des tempêtes. Une meilleure compréhension de ces mécanismes est également cruciale pour l'élaboration de stratégies de gestion adaptées.

2. PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE

Sur le littoral entre l'oued Massa et l'oued Souss, au sud d'Agadir (30° N), les falaises occupent 53 % du linéaire côtier. Elles présentent des morphologies très variées, influencées par de nombreux facteurs tels que la nature lithologique, la tectonique, la hauteur et les processus d'érosion actuels ou passés. La morphologie littorale du secteur côtier entre Sidi Toual et Sidi Rbat, objet de cette étude, est dominée par des falaises gréseuses atteignant une hauteur de 10 à 35 m par endroits. Composées de grès, ces falaises témoignent de la présence d'anciennes dunes quaternaires postérieures au stade isotopique marin 5 (SIM 5). Ce stade a été daté à plusieurs reprises sur des coquilles marines de la terrasse ouljienne en utilisant la méthode de datation U/Th : 103 ka à Agadir Port, 100 ka sur le littoral de Tamri et 95 ka sur le bas plateau littoral de Tiznit (SIM 5.3) (Weisrock, 1980 ; Weisrock *et al.*, 2016 ; Ouammou *et al.*, 2019a ; Ouammou *et al.*, 2019b). Sur le plan morphologique, le secteur littoral entre Sidi Toual et Sidi Rbat se caractérise par l'existence par un amalgame des hautes et des moyennes falaises dressées à la verticale, telles que les falaises de Douira et du sud de Tifnit, des hautes falaises en forme bosselée avec une très forte pente, comme les falaises de Lala khouira, et des basses falaises exposées à la verticale, comme les falaises de Sidi Toual et du nord de Sidi Rbat (figure 2). Cette diversité des falaises s'expliquent par plusieurs facteurs d'ordre géomorphologiques, topographiques et tectoniques (Nmiss, 2018).

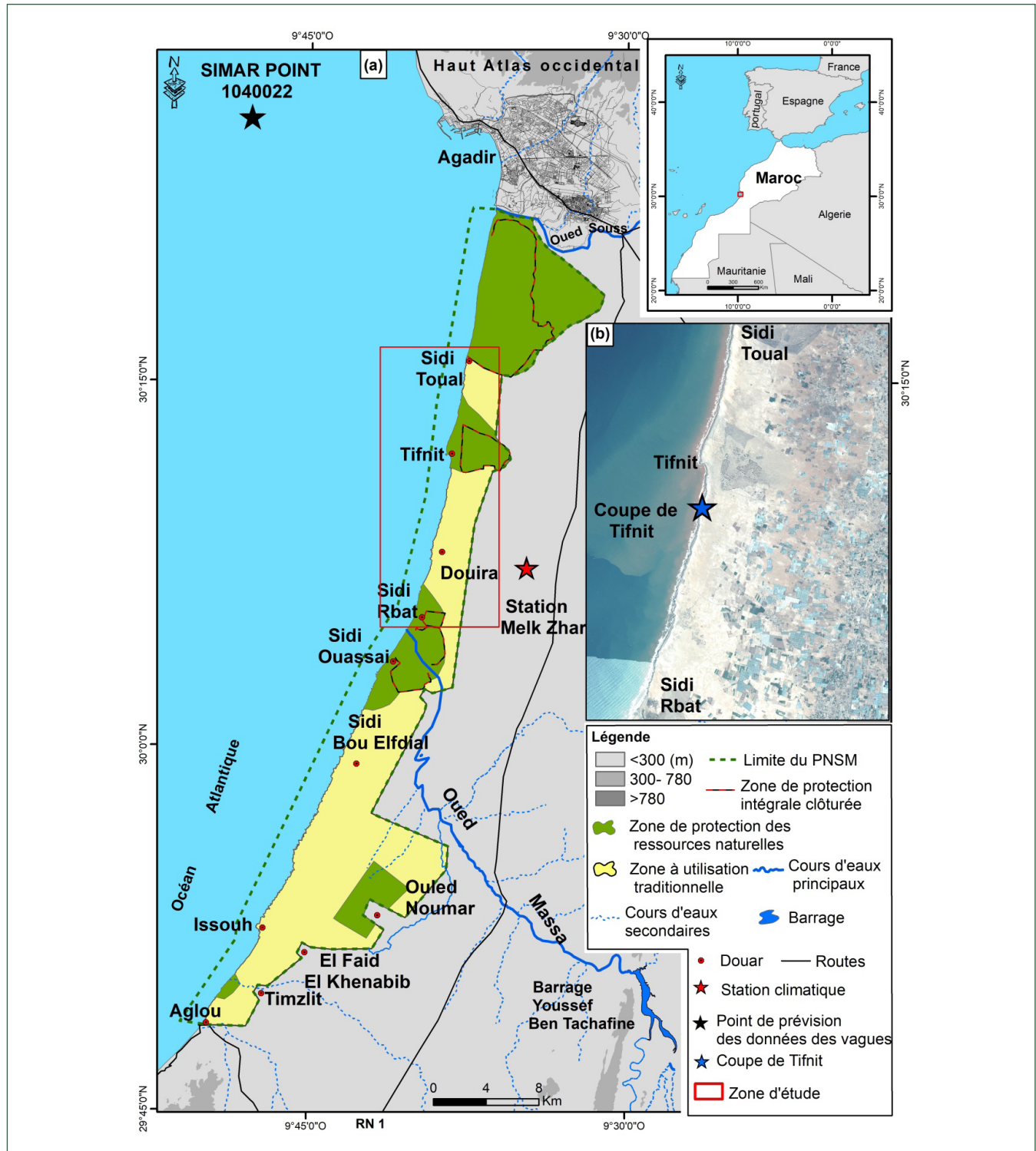
Sur le plan hydrodynamique, le secteur littoral entre Sidi Toual et Sidi Toual est fortement exposé aux vagues atlantiques énergétique du secteur NNW. À partir des prévisions journalières gérées par les autorités portuaires de l'Espagne du SIMAR point 1040022 (coordonnées 30.500 N, -10,000 E) (figure 1 a), la hauteur significative de 82.5% des vagues est inférieure à 2.5 m, tandis que 17,5 % d'entre elles présentent une hauteur supérieure à 2.5 m (figure 3 a). Concernant la période des vagues, 47.14% ont une durée supérieure à 10 secondes (figure 3 b). Cette configuration des vagues met en évidence la prédominance d'un régime dominé par la houle en hiver et des conditions de houle mixte de beau temps et de vagues de plus courte durée en été (Nmiss, 2023 ; Nmiss *et al.* 2021a). Concernant les vents dominants dans ce secteur littoral, ils soufflent principalement du secteur Nord-Ouest (84%) au niveau de la station de Melk Zhar situé à 11 kilomètre de la côte (figure 3 b) (Atiki, 2021).

Afin de mettre l'accent sur la morphologie des falaises littorales du secteur côtière entre Sidi Toual et Sidi Rbat, nous avons levé une coupe géomorphologique au niveau de la région de Tifnit (figure 1 b). Cette coupe se localise à 1,7 km environ au sud du cap Tifnit en Y=30°11'10.09", X= 9°38'19.06". Elle est taillée en falaise vive de 15 m de hauteur, dans un complexe dunaire post ouljien. Cette falaise, à cet endroit est abrupte marquée par des ressauts liés à l'érosion sélective, qui met en relief les niveaux les plus endurcis. De point de vue stratigraphique, la coupe prélevée présente une stratigraphie nette marquée par une succession des séries dunaires et des paléosols interdunaires. Cet empilement a une signification paléoclimatique en ce qui concerne les conditions de mise en place du matériel sableux. En effet, les séries dunaires sont très consolidées, en particulier dans la série basale SD1 (figure 4). Cette série se caractérise par une prédominance du sable moyen, bien classé avec une distribution symétrique vers les éléments fins. L'épaisseur de la série basale (SD1) varie d'un d'endroit à l'autre. Elle prend une épaisseur importante dans les secteurs de hautes falaises, comme c'est le cas de Douira (12m), et diminue davantage vers le nord suite la subsidence du littoral des Chtouka dans sa partie septentrionale. Cette série non seulement commande la dynamique et l'évolution des falaises, mais aussi la configuration morphologique locale de la côte, puisqu'elle constitue des caps et des redans là où elle prend une épaisseur considérable. La présence ou l'absence de cette série, ainsi que le degré de consolidation ont eu un impact significatif sur la dynamique de recul des falaises dans la région. Lorsqu'elle est très consolidée, elle résiste mieux contre l'érosion et vice versa.

D'un point de vue écologique, le secteur littoral étudié se situe dans les limites du parc national de Souss-Massa, une zone de grande valeur écologique et environnementale (figure 1 a). Plus précisément,



il est localisé dans des zones à usage traditionnel ouvertes au public. Ce site abrite la dernière population sauvage d'ibis chauve (*Geronticus eremita*) au monde (Aourir *et al.*, 2016). Des grands efforts ont été faite par l'administration du parc national en collaboration avec Birdlife international pour protéger cette espèce rare. Ces efforts font partie intégrante du plan d'action national pour la conservation de l'Ibis Chauve.



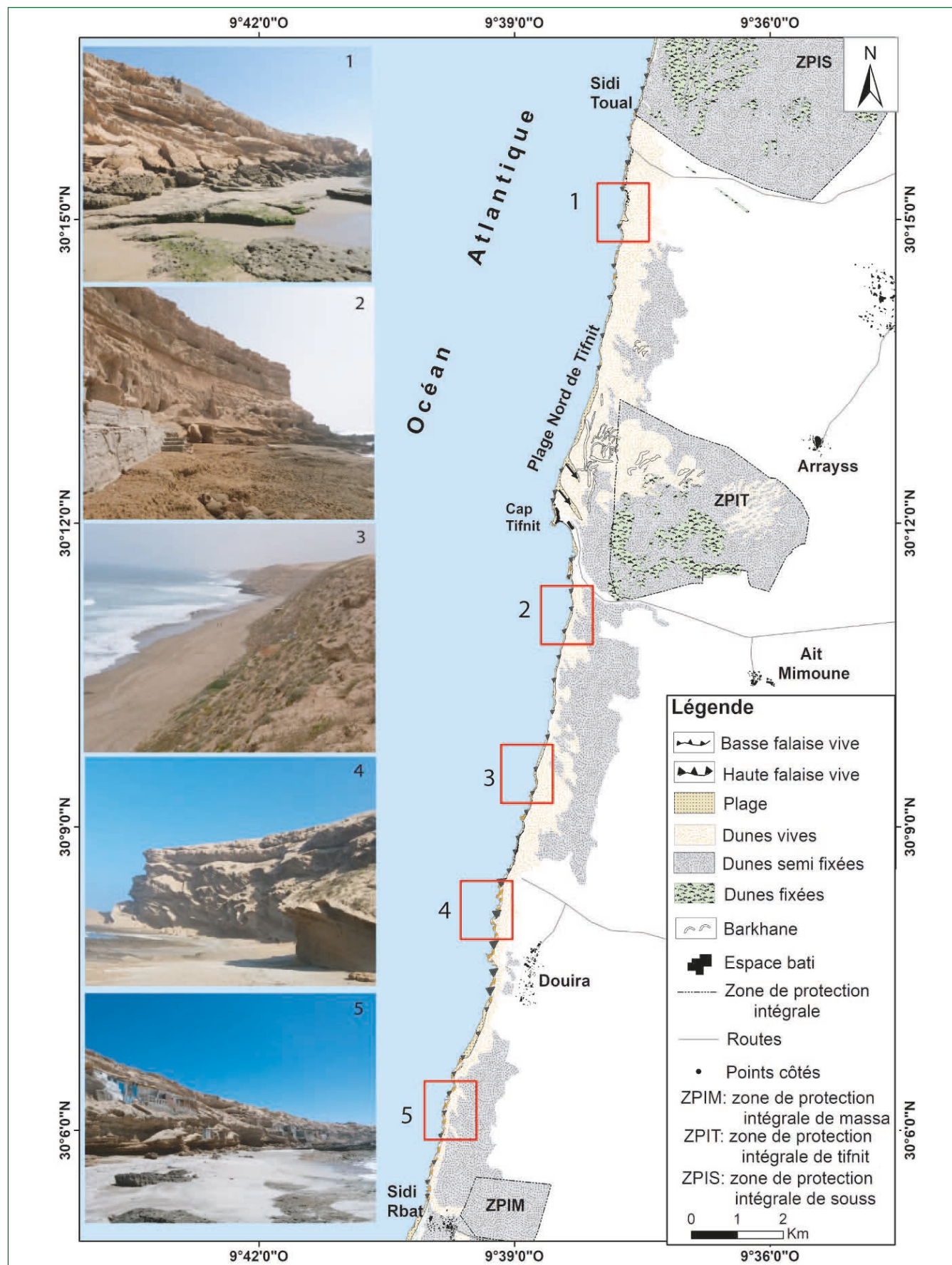


Figure 2. Morphologie et typologie des falaises littorales étudiées : 1 : Sidi Toual ; 2 : Sud de Tifnit ; 3 : Lala Khouira ; 4 : Douira ; 5 : Nord de Sidi Rbat. Source : élaboration personnelle en se basant sur des images Google Earth pro de 2020.

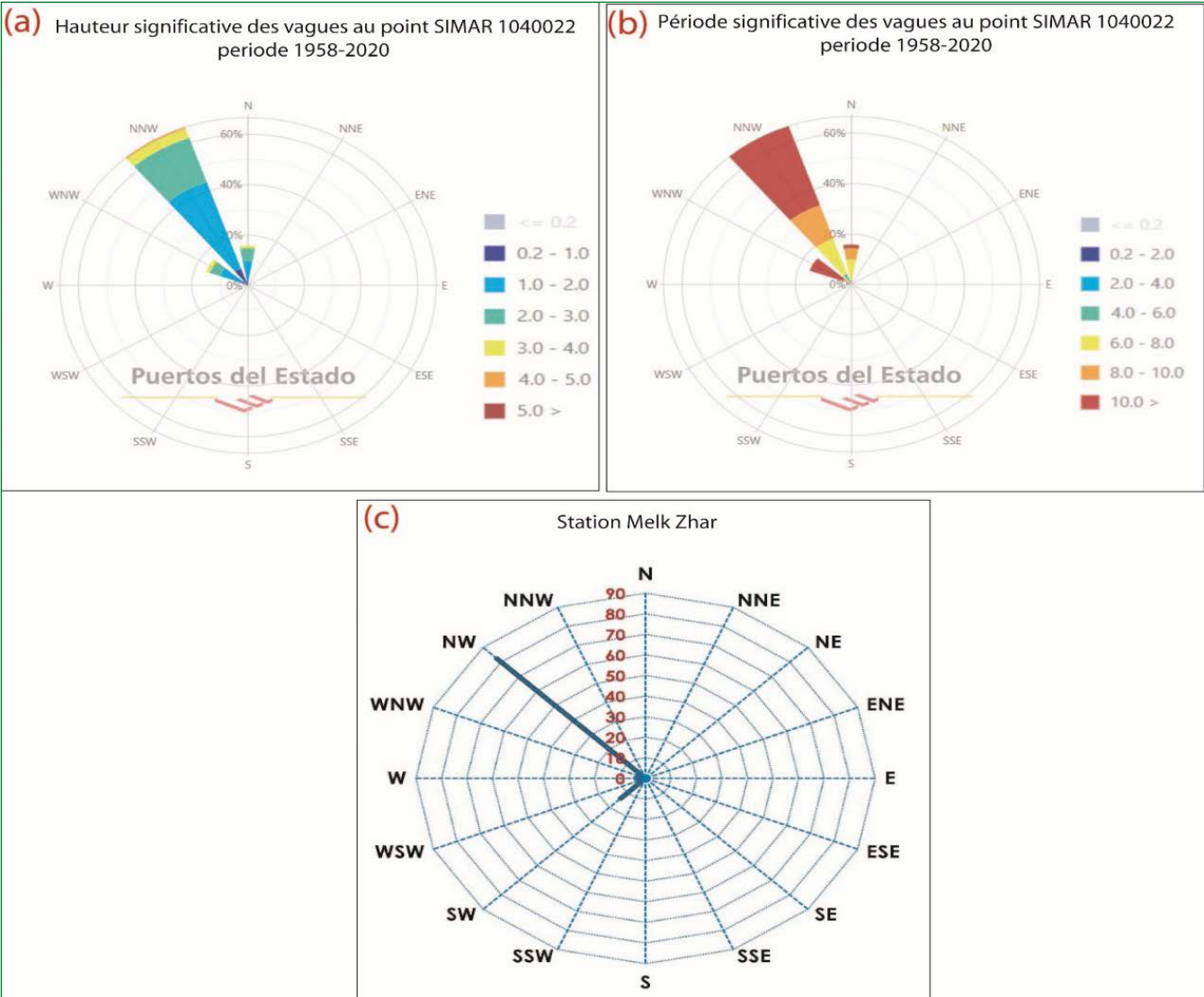


Figure 3. Les roses de vagues et des vents de la zone d'étude. (a) et (b) Hauteur et la période significative entre 1958 et 2020 selon les prévisions journalières des autorités portuaires de l'Espagne du SIMAR point 1040022. Source : travail personnel basé sur <https://portus.puertos.es> . (c) Rose des vents au niveau de station Melk Zhar (figure 1 a) de la période 1986 et 2016. Source : travail personnel basé sur agence du bassin hydraulique Souss Massa.

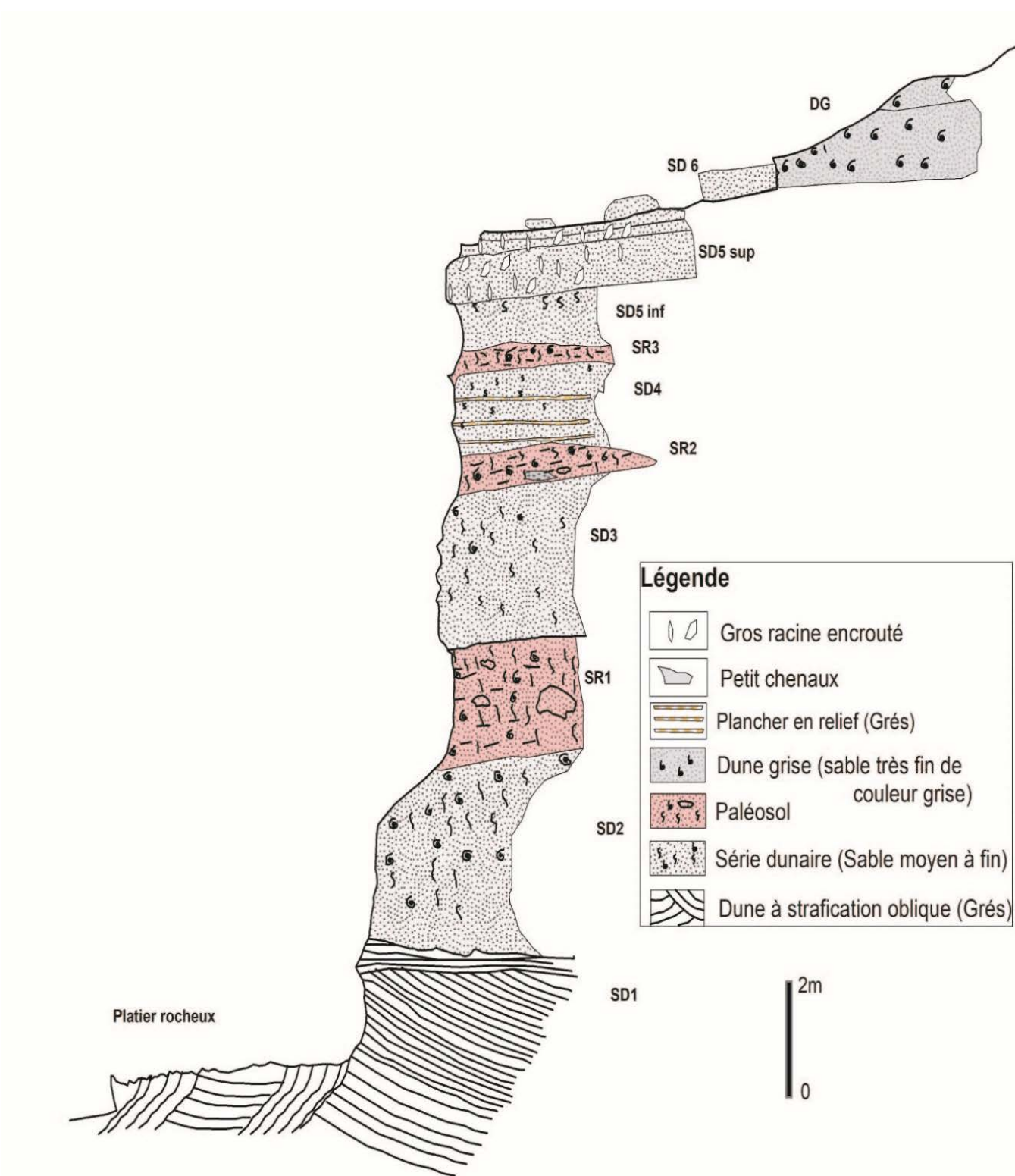


Figure 4. Coupe géomorphologique et stratigraphique prélevée au niveau de la région de Tifnit (figure 1 b). Source : élaboration personnelle.



3. MÉTHODES ET DONNÉES

Afin de quantifier le recul des falaises dans cette étude, les données spatiales utilisées sont des photos aériennes verticales de la mission 1986 avec une échelle de 1/20000 et des orthophotos de 2018 issues du satellite Pléiade de haute résolution spatiale de 0,5m (tableau 1). Bien que ces données révèlent des situations ponctuelles et spontanées, elles peuvent surtout par comparaison, mettre en évidence les différentes phases de l'évolution géomorphologique de la ligne de rivage (Nmiss *et al.*, 2019 ; Nmiss *et al.*, 2025b). De point de vue méthodologique, la quantification du recul des falaises implique quatre étapes : le géoréférencement des données, le choix et la numérisation du trait de côte, le calcul des taux de recul basé sur la surface entre deux traits de côte successifs et le calcul de la marge d'erreur.

Tableau 1. Les données spatiales utilisées pour suivre l'évolution des falaises.

Données spatiale	Date de prise	Echelle	Source
Photos aérienne	22/03/1986	1/ 20000	Agence Nationale de la Conservation Foncière, du Cadastre et de la Cartographie, service de documentation technique
Orthophotographie (Pléaides)	29/10/2018	0.5 m	https://visor.grafcan.es/agadir

Source : élaboration personnelle

3.1. Le géoréférencement des données spatiales

Le processus de géoréférencement des photo-aériennes a été fait à partir des orthophotos de 2018. Plusieurs points de calage, répartis de façon uniforme sur chaque image, ont été utilisés. Ils correspondent à des points fixes dans le temps, comme les angles de mur. Ces points ne changent pas de position entre le moment où les photographies ont été prises et le moment où les données de référence ont été acquises.

3.2. Le choix et la numérisation du trait de côte

Afin de calculer le taux de recul des falaises littorales de manière précise, il est important de déterminer une ligne de référence. Dans cette étude, nous avons choisi de définir cette ligne par le sommet de falaise conformément à plusieurs travaux (Bray & Hooke, 1997 ; Basara, 2019) car la limite du pied de falaise est plus incertaine en raison des variations des accumulations sédimentaires et des phénomènes d'ombrage (figure 5). Pour obtenir cette ligne de référence, nous avons procédé à la vectorisation manuelle du sommet de falaise de chaque image à l'aide du logiciel ArcGIS.

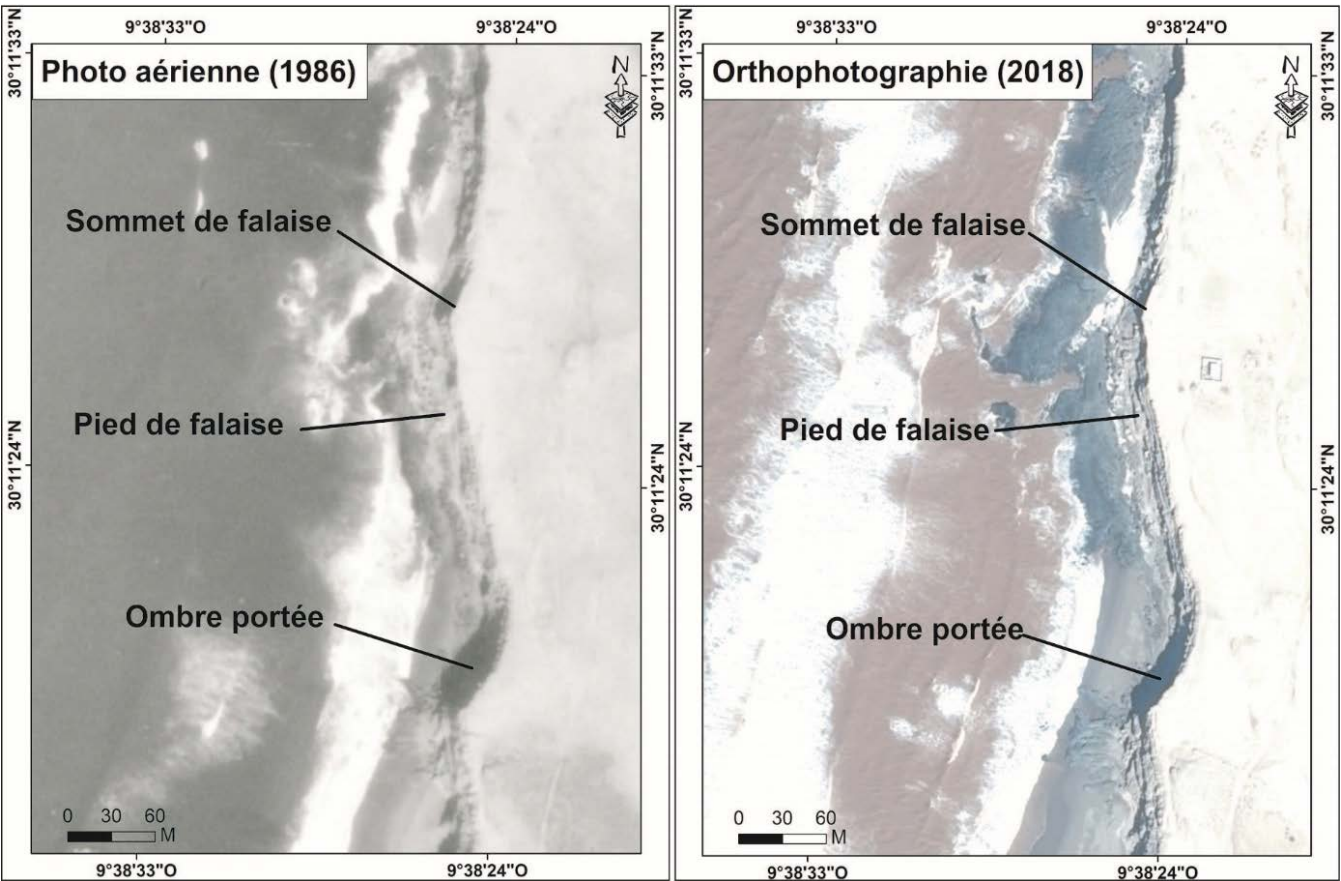


Figure 5. Les lignes de référence tirées sur les images utilisées. (Photo aérienne 1986). Source : élaboration personnelle basée sur l'Agence Nationale de la Conservation Foncière, du Cadastre et de la Cartographie, service de documentation technique. Orthophotographie 2018. Source : travail personnel basé sur <https://visor.grafcan.es/agadir>



3.3. Calcul des surfaces perdues et des taux de recul

Pour calculer les surfaces perdues et le taux de recul, nous avons utilisé la méthode surfacique qui consiste à mesurer la surface érodée entre deux sommets de falaise en mètre carré. Cette méthode est plus appropriée pour étudier la cinématique des falaises en recul dont l'évolution se produit généralement par des mouvements de masse très locaux (Basara, 2019). En 2014, le Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie de la France a adopté cette méthode dans un guide méthodologique pour l'élaboration des plans de prévention des risques afin d'analyser l'évolution des côtes à falaise (MEDDE, 2014). « Elle présente l'avantage de donner une estimation du taux de recul moyen des falaises en prenant en compte l'ensemble du linéaire » (MEDDE, 2014). Cependant, il est important de prendre en considération l'intervalle de temps utilisé pour quantifier le taux de recul moyen des falaises. Un évènement majeur isolé, tel qu'un effondrement ou un glissement, peut entraîner un recul instantané de plusieurs mètres de falaise, ce qui peut influencer les taux d'érosion calculés (Duperret et al., 2002).

La méthode consiste à tracer des polygones entre les traits de sommet de falaise utilisés pour obtenir des surfaces perdues (figure 6). Ces surfaces sont pondérées par le linéaire côtier et par l'intervalle de temps entre les deux dates. Ainsi, le taux moyen annuel de recul est obtenu en utilisant la formule suivante :

$T_x = S / (L \times A)$

- Avec T_x , le taux de recul moyen annuel (m/an) ;
 S , la surface érodée entre deux sommets de falaise (m²) ;
 L , le linéaire de falaise sur lequel la surface est mesurée (m) ;
 A , le nombre d'années séparant les deux levés ;

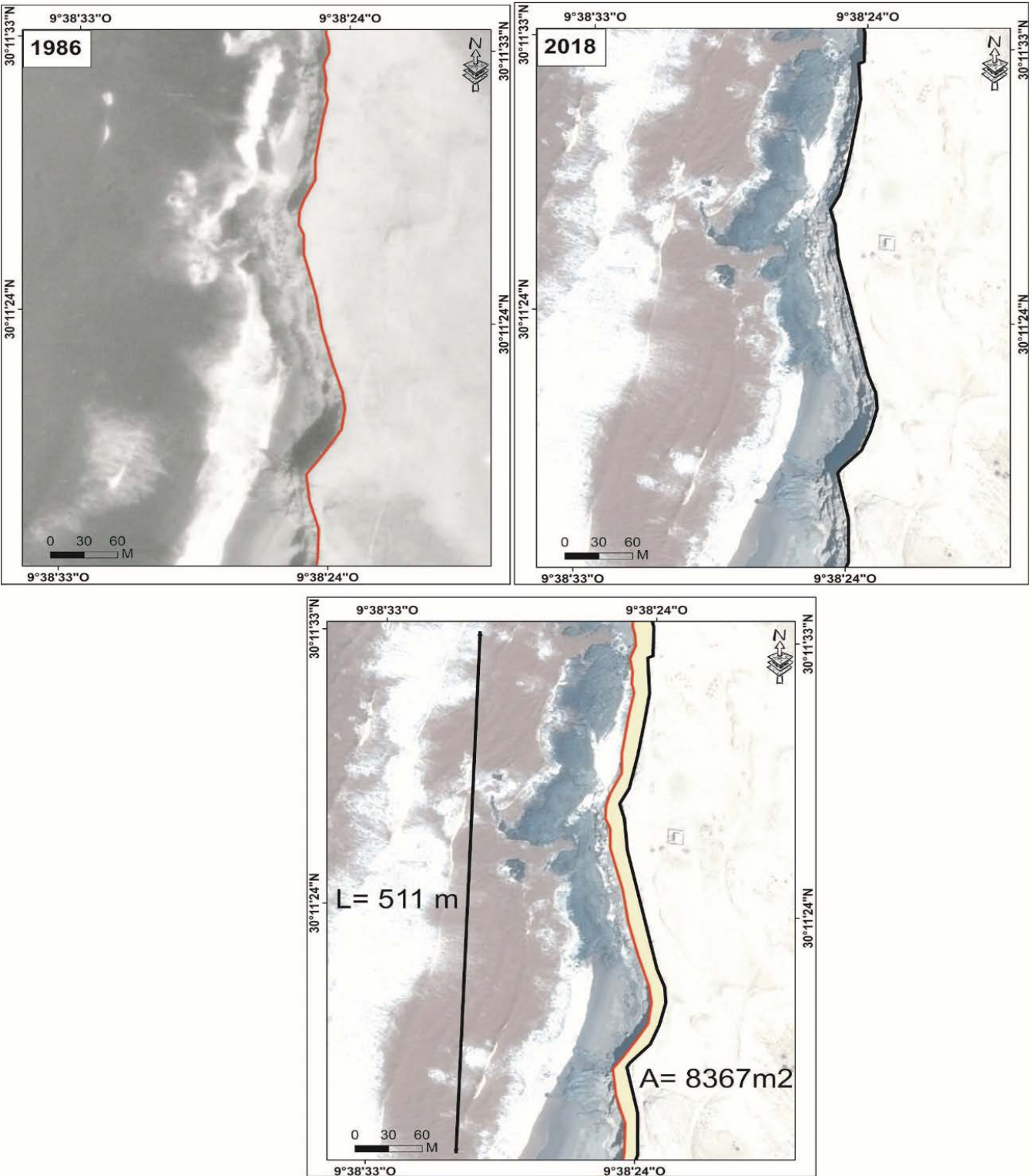


Figure 6. Le principe de calcul des surfaces perdues selon la méthode surfacique. Source : élaboration personnelle basée sur l'Agence Nationale de la Conservation Foncière, du Cadastre et de la Cartographie, service de documentation technique. (<https://visor.grafcan.es/agadir>).



Pour obtenir des informations plus précises, nous nous sommes appuyé également sur l'outil DSAS (Digitale Shoreline Analysis System) qui est un add-in dans l'ArcGIS. Cette application a été développée pour déterminer le taux d'évolution historique du trait de côte en utilisant une série de traits de côtes de dates différentes (Theiler *et al.*, 1994 ; Temitope, 2014). En effet, elle permet aux utilisateurs de calculer les statistiques du taux de changement du littoral sur une série chronologique de positions différentes (USGS, 2005). Le principe de cette application (DSAS) est basé essentiellement sur la création des transects tout au long du littoral à partir d'une ligne de référence fictive appelé ligne de base « Baseline ». Le contact de ces transects avec les traits de côte va nous permettre de calculer deux paramètres. Le premier paramètre est l'NSM : (Net Shoreline Movement) qui indique la distance entre la ligne de rivage la plus ancienne et la plus récente pour chaque transect. Le deuxième paramètre est l'EPR : (End Point Rate) qui est calculé en divisant la distance de déplacement du rivage entre les premières et les dernières mesures sur le nombre d'années.

3.4. Quantification de la marge d'erreur

Avant de quantifier le taux de recul de la falaise, il est nécessaire de déterminer la marge d'erreur associée aux valeurs calculées. La méthode surfacique utilisée pour la quantification d'évolution des côtes à falaise comporte des incertitudes qui proviennent principalement du géoréférencement des données et la numérisation du trait de côte.

La marge d'erreur liée au géoréférencement (QM) est estimée à 1,1 mètre; tandis que celle associée à la digitalisation du trait de côte est estimée à $\pm 2,5$ mètres.

Afin d'estimer la marge d'erreur globale, nous avons additionné les différentes sources d'erreurs. Pour cela, nous avons utilisé la formule proposée par Bray et Hooke en 1997. Cette formule consiste à additionner la marge d'erreur totale des deux traits de côte, puis à diviser le résultat par l'intervalle de temps de la période analysée.

$$E = \frac{eT1 + eT2}{A}$$

17

Où :

- E, la marge d'erreur maximale sur le taux de recul (m/an) ;
- eT1, la marge d'erreur totale sur la position du trait de côte le plus ancien (m) ;
- eT2, la marge d'erreur totale sur la position du trait de côte le plus récent (m) ;
- A, le nombre d'années séparant les deux levés.

La marge d'erreur globale entre 1986 et 2018 est d'ordre de $\pm 0,112$ m.

4. RÉSULTATS ET DISCUSSION

L'analyse comparative des photographies aériennes et des orthophotos issues du satellite Pléiades a permis d'évaluer la dynamique du recul des falaises littorales entre 1986 et 2018. Pour le premier site étudié, une perte de surface de 25 455 m² a été enregistrée sur une longueur de 2128 m et sur période de 32 ans, correspondant à un taux moyen de recul des falaises de 0,37 m/an (figure 7a). Concernant le second site, les résultats indiquent un taux moyen de recul de 0,22 m/an, avec une surface perdue de 5 088 m² sur une longueur de 716 m (figure 8b).

Toutefois, ces valeurs globales ne traduisent pas les variations spatiales du phénomène, car certaines zones connaissent un recul limité tandis que d'autres sont fortement érodées. Afin de mieux appréhender cette variabilité, un total de 100 transects a été généré sur le premier site et 33 sur le second. Les résultats



obtenus mettent en évidence une hétérogénéité dans l'évolution du recul des falaises, illustrant ainsi une dynamique érosive différenciée selon les secteurs. Cette observation souligne l'importance de considérer la variabilité spatiale dans l'étude de l'érosion côtière, afin d'identifier plus précisément les facteurs influençant la stabilité des falaises.

Sur la partie sud du site de Tifnit (Site 1), certains secteurs se révèlent particulièrement vulnérables à l'érosion, notamment entre les transects 21 et 35, où un taux de recul de 0,54 m/an a été mesuré (transect 35). En revanche, d'autres zones situées à l'extrémité sud du site présentent une érosion plus modérée, avec un taux de 0,06 m/an (transect 99) (figure 7b). Pour le site de Sidi Toulal (Site 2), l'analyse a mis en évidence deux secteurs aux dynamiques contrastées. Le premier, localisé au nord du site, affiche un taux de recul de 0,1 m/an (figure 8b) et se distingue par la présence de plusieurs habitations en bordure de falaise, accentuant ainsi les risques d'instabilité et les menaces pour les populations locales (figure 9). Le second secteur, situé plus au sud, subit une érosion intense, avec un taux maximal de recul de 0,52 m/an (figure 8b).

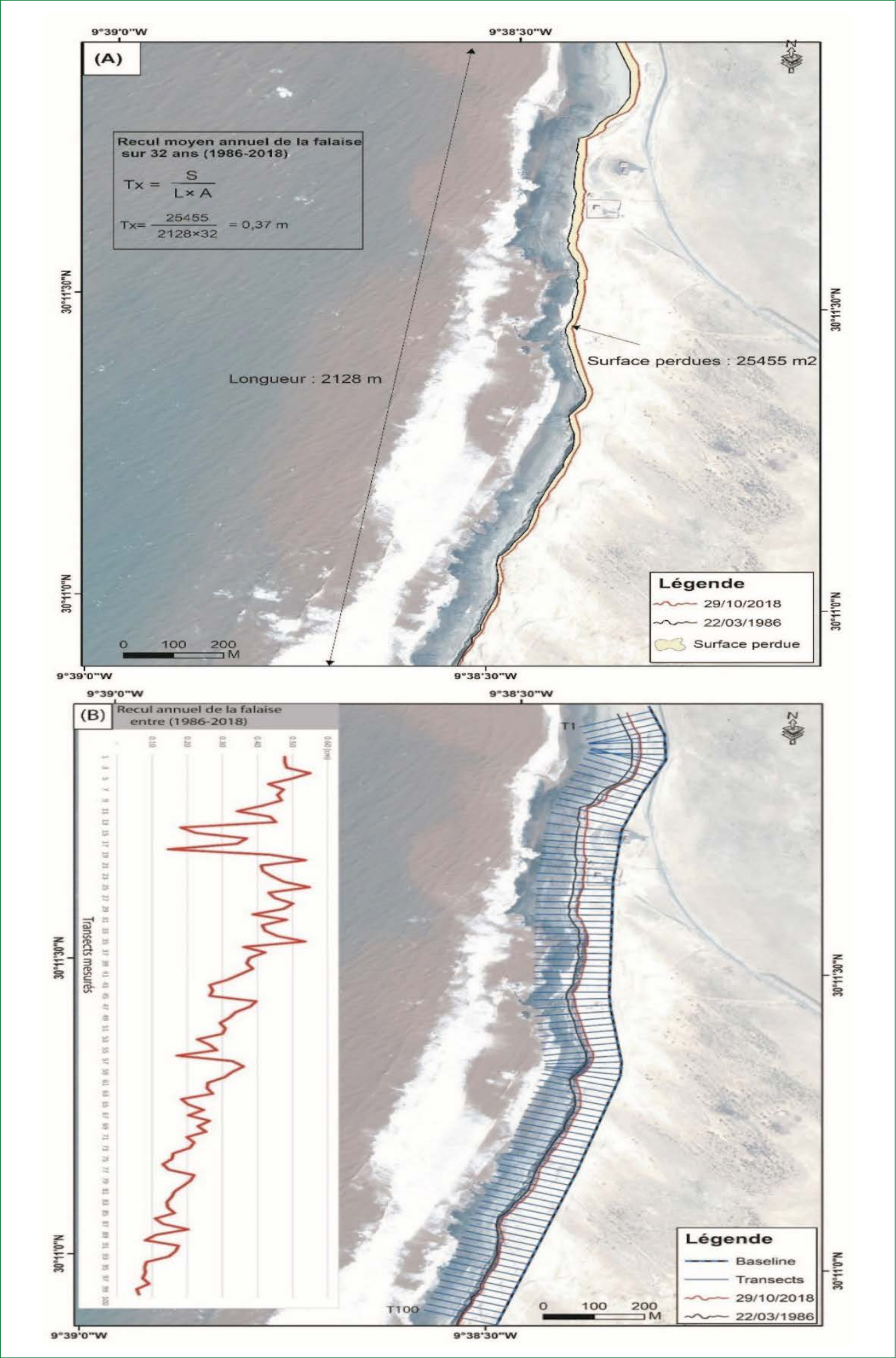


Figure 7. Évolution des falaises littorales entre (1986-2018) au niveau site sud de Tifnit : (A) recul moyen annuel et surface perdues ; (B) évolution annuelle en se basant sur EPR (End Point Rate). Source : élaboration personnelle basée sur une orthophoto du satellite pléiade (<https://visor.grafcan.es/agadir>).

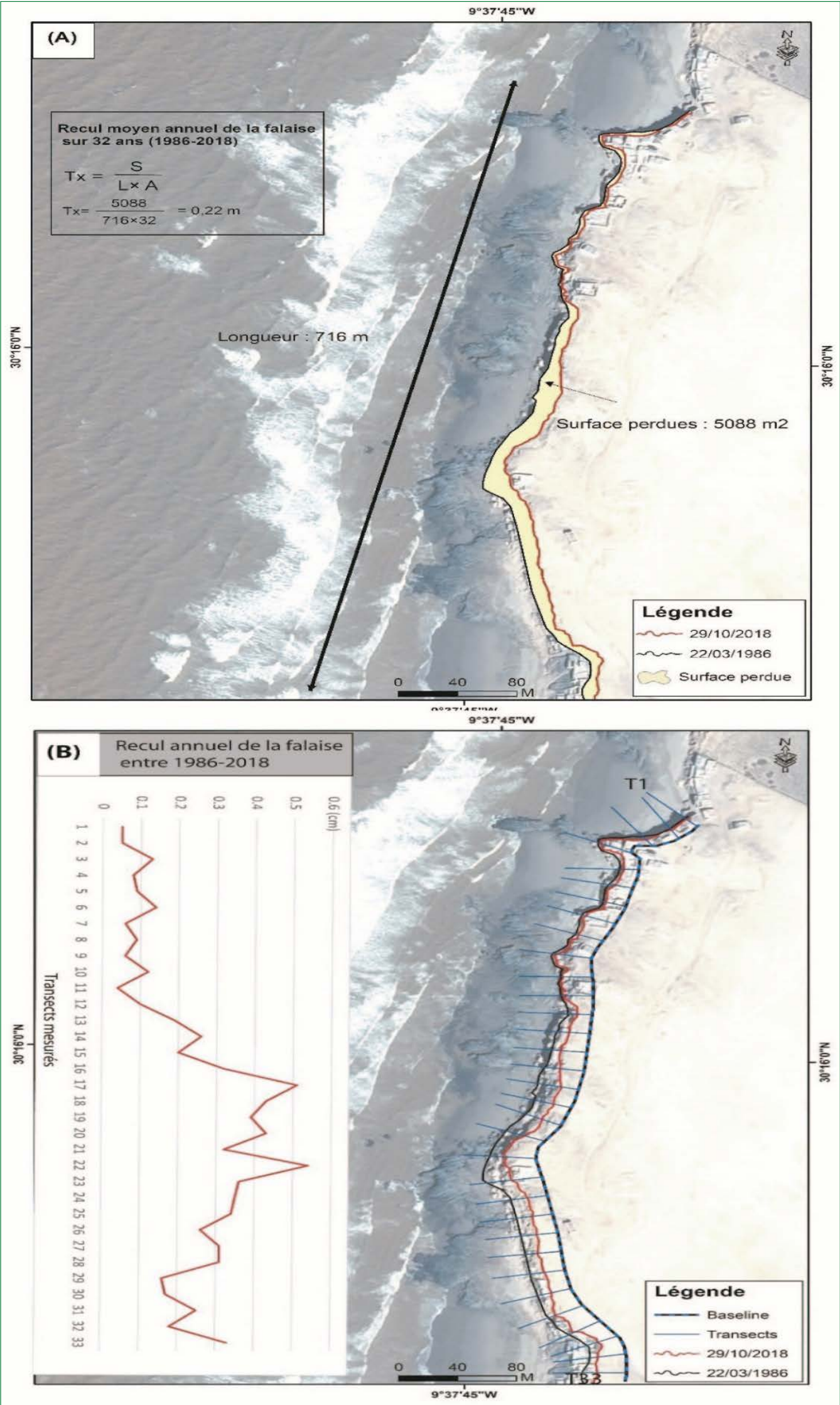


Figure 8. Évolution des falaises littorales entre (1986-2018) au niveau site de Sidi Toual : (A) recul moyen annuel et surface perdues ; (B) évolution annuelle par transects en se basant sur EPR. Source : élaboration personnelle basée sur (fond de carte : une orthophoto du satellite pléiade (<https://visor.grafcan.es/agadir>)).

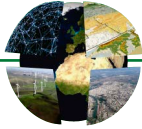


Figure 9. Des constructions au front de la falaise au niveau du secteur Sidi Toul. Source : clichés personnels.

4.1. Les facteurs réagissant l'évolution des falaises dans les deux sites choisis

L'étude diachronique du recul des falaises, accompagnée d'un travail de terrain, permet de mieux comprendre la dynamique actuelle des falaises et d'expliquer les facteurs et les processus responsables de leur évolution. En effet, les cycles d'évolution des falaises côtières du secteur littoral entre Sidi Rbat et Sidi Toul sont contrôlés par un large éventail d'agents et de processus d'érosion, à savoir les forçages marins, les forçages subaériens et les propriétés du massif rocheux.

4.1.1. Les processus d'origine marine

La mer joue un rôle crucial dans l'évolution des falaises littorales. Lors des grandes marées ou pendant les tempêtes, les vagues viennent attaquer le pied de la falaise où leur assaut répété fragilise les parois (Trenhaile, 2008). Le choc des vagues entraine une compression de l'air qui contenue dans les joints ou les fractures de la roche, puis un effet soudain de décompression lorsque les vagues se retirent, accentue l'érosion mécanique (Sunamura, 1992). Ainsi, les cycles tidaux engendrent des cycles de chargement/déchargement sur la falaise, ce qui fragilise le massif rocheux (Prémaillon, 2018). De plus, les courants de dérive littorale ont pour action le transport des sédiments en pied de falaise, ce qui impacte la stabilité des falaises côtières (Masselink & Hughes, 2003).

Sur les deux sites étudiés les facteurs marins et géomorphologiques tels que l'exposition du trait de côte, la hauteur et la période des vagues, ainsi que la fréquence des événements météo-marins de forte énergie (tempêtes), ont un rôle crucial dans la dynamique et l'évolution des falaises littorales.

Dans le premier site étudié (Sud de Tifnit), le cap de Tifnit offre une situation d'abri et de calme hydrodynamique au fond de la plage de Tifnit, tandis que la configuration morphologique du trait de côte rend le secteur sud de Tifnit exposé à la houle du NNW (figure 10 a), ce qui affecte son évolution et sa dynamique à long terme. Dans le deuxième site (Sidi Toul), les falaises littorales sont également soumises à l'érosion marine due à l'action de la houle (figure 10 b).



Figure 10. Configuration morphologique du trait de côte par rapport à la houle dominante. Source : élaboration personnelle basée sur des images Google Earth de 2016 et 2017.



Les conditions météo-marines dominantes, en particulier celles de forte énergie (tempêtes), ont également une influence sur l'évolution des falaises (Masselink *et al.*, 2016). Au cours des dernières années, le littoral atlantique marocain a subi une occurrence des tempêtes, qui posent un problème en termes de relation entre le fonctionnement modal et les phénomènes extrêmes dans l'évolution morphologique de la côte (Houser *et al.*, 2008). L'analyse de la figure ci-dessous montre une tendance à la hausse du nombre de tempêtes ayant une hauteur significative supérieure à 4m, ce qui pourrait avoir des conséquences néfastes en termes de stabilité des falaises (figure 11).

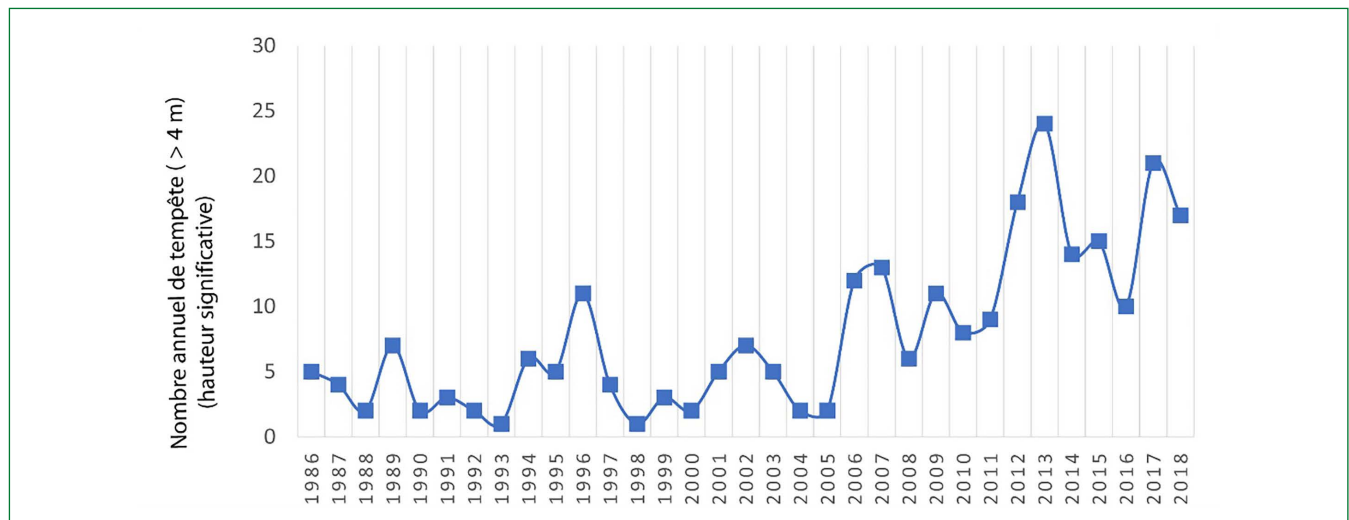


Figure 11. Fréquence du nombre de tempête supérieur à 4 m (HS) enregistré au SIMAR point 1040022 (coordonnées 30.500 N, -10,000 E). Source : élaboration personnelle basée sur des données extraites des prévision journalière des autorités portières espagnole (<http://www.puertos.es/en-us->).

4.1.2. Les facteurs lithologiques (propriété physique du massif rocheux)

Du point de vue morphodynamique, les falaises sont des environnements soumis à une érosion constante. Dans les sites étudiés, cette érosion se manifeste par des phénomènes majeurs tels que des éboulements, des chutes de blocs et une érosion particulière qui ne se remarque pas immédiatement, mais qui affecte la falaise à long terme. Sur le terrain, des investigations ont montré la présence de gros blocs détachés de la falaise en phase d'éboulement, ainsi que des amas de blocs plaqués contre son pied (figure 12 b). Le facteur lithologique joue un rôle primordial dans l'évolution des falaises, et les zones les plus touchées par l'érosion correspondent généralement à des formations friables (figure 12 a).



Figure 12. Le recul des falaises : (a) de gros blocs détachés de la falaise (Sud de Tifnit) ; (b) : des amas de blocs plaqués contre la falaise (Sidi Toulal). Source : clichés personnels.



Figure 13. (a) recul de la falaise sous l'action des vagues dans le secteur littoral de sidi Toual ; (b) un paléosol rose interdunaire facilement érodé par les vagues. Source : clichés personnels.

Dans les zones où les séries basales sont friables et surtout là où elles sont sous-tendues par des paléosols roses interdunaires facilement excavés par les vagues, la dynamique des falaises est de plus en plus accentuée (figure 13). En effet, le recul de la falaise n'est pas imputable seulement au travail de la mer, qui par ses processus d'érosion à travers les vagues provoque une action de surpression et d'aspiration à l'intérieur des diaclases. D'autres facteurs d'ordre climatiques et anthropiques, notamment les précipitations et le creusement des grottes troglodytiques, ont contribué de façon directe à ce recul.

22

Les vagues exercent une force érosive contre les falaises, surtout au moment de fortes tempêtes, particulièrement en période de grandes marées (Earlie *et al.*, 2016). L'impact de la lame d'eau sur une paroi se traduit par une action mécanique. Cette action mécanique est efficace au pied des falaises où, bien souvent, elle est responsable d'encoches qui mettent en porte à faux les parties supérieures des falaises et sont à l'origine de leurs éboulements (Paskoff, 1981, Paskoff 2006). Sur le secteur à falaise entre Sidi Rbat et Sidi Toual, l'éboulement des falaises se traduit par des amas de blocs plaqués aux pieds des falaises. L'existence de ces blocs est intimement liée à la couche basale des falaises, qui selon sa consolidation, favorise la stabilité et/ou l'instabilité de celles-ci. D'ailleurs, d'autres facteurs d'ordre climatique (précipitation, vents, ruissellement) vont également provoquer la chute des blocs.

Par ailleurs, les falaises littorales sont associées à des plateformes littorales très développées qui dévoilent à marée basse un estran rocheux. Ces plateformes traduisent le recul progressif des falaises soumises à l'action des vagues (Duguet, 2019). Leur largeur varie de quelques mètres pour la plus étroite jusqu'à des dizaines de mètres pour la plus large. Ainsi, leur élévation varie aussi considérablement et s'étend jusqu'au-dessous du niveau marin. Ces plates formes littorales sont pentues (1,5 à plus de 4°) et s'étendent en continu du pied de la falaise jusqu'au niveau des plus basses mers (figure 14a)

Morphodynamiquement, les pentes des falaises sont maintenues par l'érosion et leur morphologie abrupte à la verticale favorise la réflexion de l'énergie des vagues sur les plates formes littorales, ce qui tend à limiter l'accumulation de sable sur ces dernières (Nmiss *et al.*, 2022). Néanmoins, l'existence des accumulations de sables clairsemés sur ces plates formes indique que l'érosion des falaises se limite aux phases de forte marée haute pendant la saison hivernale, lorsque les vagues de tempête atteignent directement le pied des falaises (figure 14b). Les stades de marée basse couplés à des vagues modales représentent des conditions durant lesquelles le sapement direct des falaises par les vagues est négligeable.

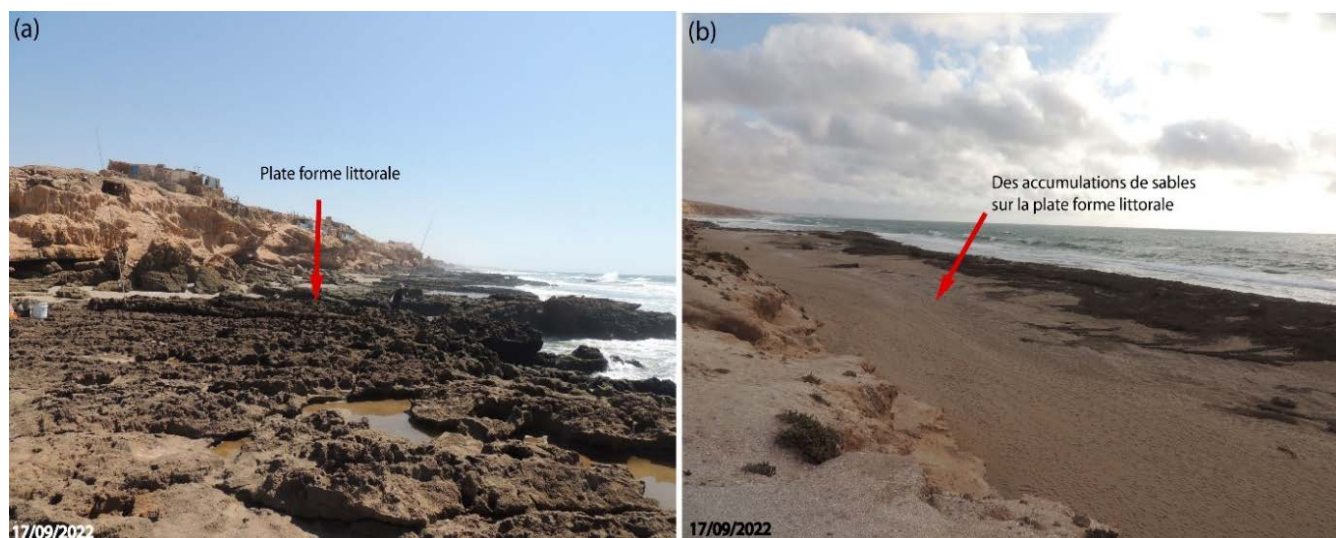


Figure 14. (a) Une plate forme d'abrasion marine au niveau du site de sidi Toual ; (b) des accumulations de sables sur la plate forme littorale au sud de Tifnit. Source : clichés personnels.

4.1.3. Les processus subaériennes

Les processus subaériens, tels que les précipitations et les variations de température, jouent un rôle important dans la préparation des matériaux et sont donc des facteurs déclencheurs de l'évolution des falaises. Bien que leur impact ne soit pas immédiatement visible, ils contribuent sur le long terme à la dégradation des falaises (Pierre & Lahaye, 2017). Les précipitations ont un effet particulièrement important sur la fragilisation des parois des falaises. Lorsque l'eau tombe au sommet de la falaise, elle pénètre dans les fissures et les crevasses de la roche, créant une pression qui peut fragiliser et élargir ces fissures. Au fil du temps, ces fissures peuvent devenir de plus en plus grandes, augmentant ainsi le risque d'effondrement de la falaise.

23

Cette fissuration est particulièrement visible dans le secteur sud de Tifnit (figure 15). Les falaises de ce secteur sont sujettes à la fissuration et à la fragmentation en raison des précipitations hivernales. Le passage répété des véhicules sur le sommet des falaises peut aggraver ce phénomène. En outre, le vent joue également un rôle important en transportant des sels et des sables et en exerçant une force transitoire sur la paroi, soit directement par pression, soit indirectement par aspiration due à l'effet venturi (Duguet, 2019).



Figure 15. Elargissement des fissures au niveau des parois des falaises. Source : clichés personnels.



4.1.4. Le facteur anthropique

Les deux sites étudiés présentent une vulnérabilité naturelle en raison de la fragilité des falaises qui les caractérisent. Cependant, l'intervention humaine peut accélérer leur recul et compromettre leur stabilité. Cette intervention prend deux aspects distincts. Sur le site de Sidi Toual, la construction de plusieurs maisons en béton à proximité immédiate des falaises littorales, principalement constituées de dunes lithifiées, exerce une pression significative sur ces dernières (figure 16 a). Cette pression pourrait avoir des conséquences à long terme sur l'évolution de ces falaises, en particulier dans un contexte marqué par l'élévation du niveau de la mer et l'augmentation de la fréquence des tempêtes. Bien que le taux de recul annuel enregistré au nord de Sidi Toual soit faible, la présence de gros blocs au pied de la falaise indique que cette zone pourrait être exposée au risque d'effondrement dans l'avenir.

Sur le site sud de Tifnit, des dizaines de troglodytes ont été creusées de manière informelle dans les couches friables (SD2 et SR1), ce qui augmente considérablement le risque d'érosion des falaises (figure 16 b). Ces troglodytes, qui sont majoritairement abandonnés aujourd'hui, sont des indicateurs clairs du recul de la falaise et peuvent déclencher leur déstabilisation. La présence de lambeaux de tesselles en suspension dans les falaises témoigne de l'intervention de l'Homme comme facteur d'érosion (figure 16 c).

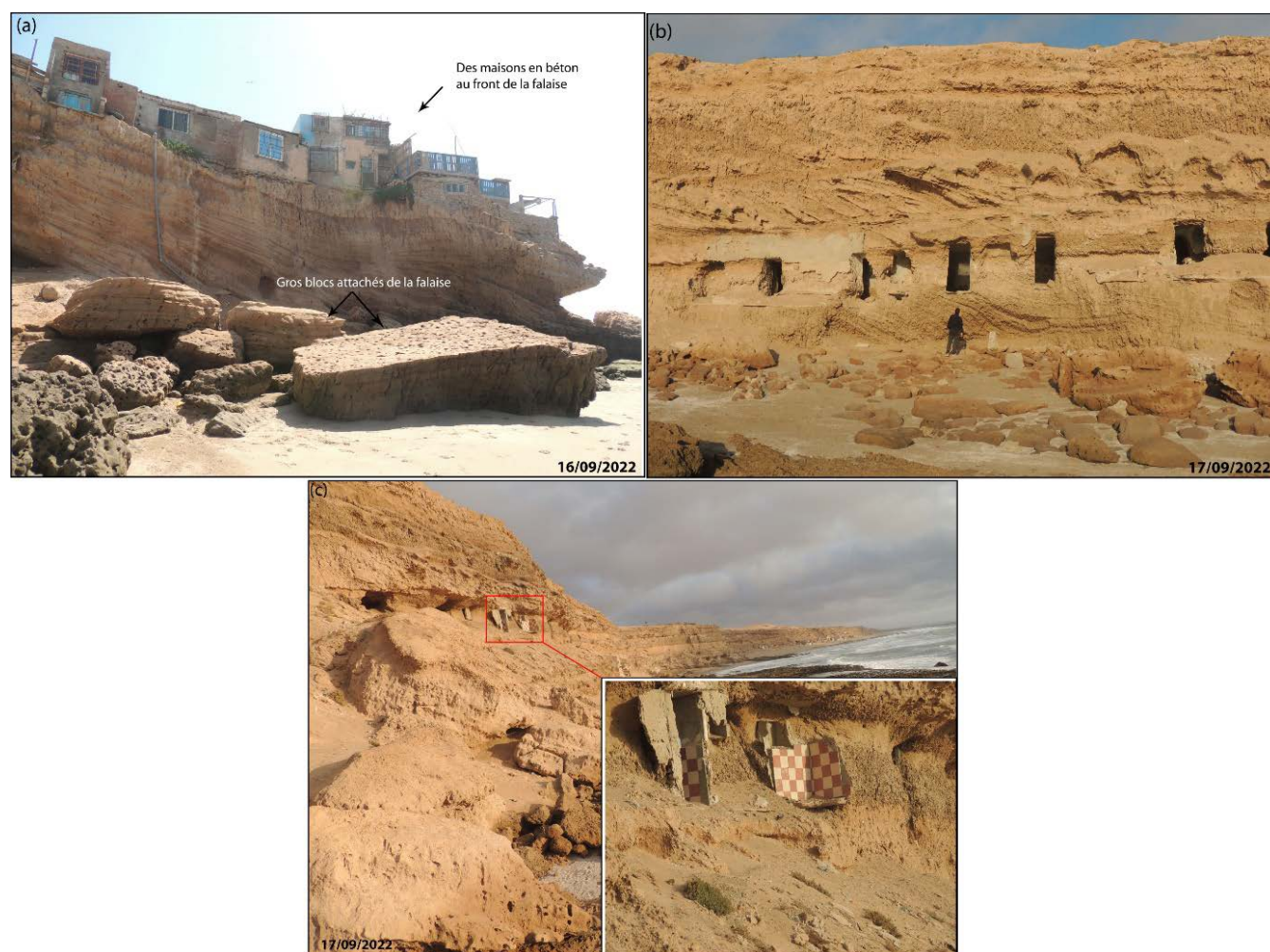


Figure 16. Action anthropique sur les falaises littorales : (a) : construction des maisons en béton au front des falaises ; (b) des troglodytes creusés au niveau des paléosols. (c) des tesselles en suspens attestant de recul de la falaise.
Source : clichés personnels.



5. CONCLUSIONS

L'étude diachronique de l'évolution des falaises littorales dans les secteurs de Sidi Toual et du Sud de Tifnit permet de quantifier le taux moyen annuel de recul et de déterminer les surfaces perdues au niveau des falaises. Les résultats obtenus ont révélé que les taux de recul des falaises littorales varient considérablement d'un secteur à l'autre, voire même au sein du même site. Cette variation peut s'expliquer par l'interaction complexe de plusieurs facteurs internes et externes. En effet, les séries dunaires et les paléosols, qui alternent au niveau des falaises, ont des propriétés différentes en termes de résistance à l'érosion. La série basale des falaises joue un rôle crucial dans leur évolution et leur dynamique. Lorsqu'elle est friable le recul des falaises est plus important et vice versa. Ensuite, les conditions météo-marines et subaériennes sont également des éléments déterminants dans le processus d'érosion des falaises. Les vagues et les précipitations exercent des forces importantes sur les parois des falaises, pouvant entraîner la chute de blocs rocheux. De plus, l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des tempêtes au cours des dernières années peut considérablement influencer le taux de recul des falaises côtières de la zone d'étude, en particulier dans le contexte global de l'élévation du niveau de la mer. En effet, les tempêtes génèrent des vagues puissantes qui érodent la base des falaises, accélérant ainsi leur recul. Cette érosion peut également fragiliser les falaises, les rendant davantage sujettes à l'effondrement lors de prochaines tempêtes. Ainsi, l'action anthropique est un facteur important qui accélère l'érosion des falaises. Le creusement de plusieurs troglodytes dans falaises fragilise leur paroi. Ces troglodytes peuvent affaiblir la structure de la falaise en réduisant sa capacité à résister à la pression exercée par le vent et les vagues.

Remerciements

Les auteurs expriment leur gratitude à l'Agence Nationale de la Conservation Foncière, du Cadastre et de la Cartographie, service de documentation technique, ainsi qu'à l'Agence Urbaine d'Agadir pour la mise à disposition des données spatiales. Ils tiennent également à remercier chaleureusement l'administration du Parc National Souss Massa pour avoir facilité la conduite des recherches sur le terrain. Les auteurs remercient également chaleureusement les relecteurs pour leurs commentaires pertinents, qui ont sans aucun doute contribué à améliorer la qualité de ce travail.

25

Conflits d'intérêts

Les auteurs déclarent n'avoir aucun conflit d'intérêts.

Contributions des auteurs

- M'hamed Nmiss, M'hamed Amyay, Nadia Atiki, Abderrahmane Ouammou: conceptualisation, méthodologie, étude de terrain, rédaction de l'article initial, analyse des données, collecte des données.
- Hassan Nait-Si, Mahjoub Benbih: étude de terrain, analyse des données, relecture et correction.

RÉFÉRENCES

- Aangri, A., Hakkou, M., Krien, Y., Chtioui, T., & Benmohammadi, A. (2024). Risk Assessment of Marine Flooding along the Agadir and Taghazout Coasts (Moroccan Atlantic). *Journal of coastal Research*, 40(1), 179-192. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-23-00033.1>
- Aouiche, I., Daoudi, L., Anthony, E. J., Sedrati, M., Ziane, E., Harti, A., & Dussouillez, P. (2016). Anthropogenic effects on shoreface and shoreline changes. Input from a multi-method analysis, Agadir Bay, Morocco. *Geomorphology*, 254, 16-31 <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.11.013>



- Aourir, M., El Bekay, M., Oubrou, W., Qninba, A., & Znari, M. (2016). Ibis chauve – Zoom sur la dernière population sauvage du Maroc. *Le Courrier de la Nature*, (279), 24-32.
- Atiki, N., Tnourji, H., Nmiss, M., & Ouammou, A. (2021). *Dynamique des vents et leur implication dans la répartition des dunes dans la plaine de souss massa (centre ouest du Maroc)*. Publication de la faculté des lettres et des sciences humaines, Université Mohamed Premier d'Oujda, (pp. 103-108).
- Basara, N. (2019). *L'érosion des littoraux à falaises meubles en Bretagne : aléa, enjeux et gestion du risque*. [Thèse de doctorat]. Université de Bretagne Occidentale.
- Bourhili, A., El Khalidi, K., Minoubi, A., Maanan, M., & Zourarah, B. (2023). Periodical Morphodynamic Changes of Sand Movements at El Jadida Beach. *Ecological Engineering & Environmental Technology*, 24(4), 15–26. <https://doi.org/10.12912/27197050/162253>
- Bray M. J., & Hooke, J. M. (1997). Prediction of soft-cliff retreat with accelerating sea-level rise. *Journal of Coastal Research*, 13(2), 453-467.
- Clarke, K. C. (1986). Advances in geographic information systems. *Computers, environment and urban systems*, 10(34), 175-18. [https://doi.org/10.1016/0198-9715\(86\)90006-2](https://doi.org/10.1016/0198-9715(86)90006-2)
- Costa, S., & Delval, C. (2019). Shore platform lowering due to frost shattering during the 2009 winter at Mesnil-Val, English Channel coast, NW France. *Earth Surface Processes and Landforms*, 44(2), 411-423. <https://doi.org/10.1002/esp.4513>
- Costa, S., Delval, C., Hénaff, A., & Suanez, S. (2015). Shore platform lowering due to frost shattering during the 2009 winter at Mesnil-Val, English Channel coast, NW France. *Earth Surface Processes and Landforms*, 40(4), 491-502. <https://doi.org/10.1002/esp.3648>
- Duguet, T. (2019). *Le recul des falaises de craie de Normandie à l'échelle du quaternaire, par approche terre-mer*. [Thèse de doctorat]. Université de Normandie.
- Duperret, A., Gentert, A., Mortimore, R. N., Delacourtt, B., & De Pomerai, M. R. (2002). Coastal Rock Cliff Erosion by Collapse at Puys, France: The Role of Impervious Marl Seams within Chalk of NW Europe. *Journal of coastal research*, 18, 52-61.
- Earlie, C. S., Young, A. P., Masselink, G., & Russell, P. E. (2016). Coastal cliff ground motions and response to extreme storm waves. *Geophysical Research Letters*, 42(3), 847-854. <https://doi.org/10.1002/2014GL062534>
- Earlie, C. S., Masselink, G., Russell, P. E., & Shail, R. K. (2015). Application of airborne LiDAR to investigate rates of recession in rocky coast environments. *Journal de conservation côtière*, 19, 831-845. <https://doi.org/10.1007/s11852-014-0340-1>
- El Mrini, A., Anthony, E. J., Taaouati, M., Nachite, D., & Maanan, M. (2013). A note on contrasting beach-dune morphodynamics, Tetouan coast, northwest Morocco: the role of grain size and human-altered dune morphology. *Journal of coastal research*, 65, 1283-1288. <https://doi.org/10.2112/SI65-217.1>
- Emery, K. O., & Kuhn, G. G. (1956). Sea cliffs: their processes, profiles, and classification. *Geological Society of America Bulletin*, 67(7), 721-762. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1956\)67\[721:SCTPPA\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1956)67[721:SCTPPA]2.0.CO;2)
- Federici, P., & Rodolfi, G. (2001). Erosion and retreat of coastal cliffs: A review. *Geomorphology*, 41(1-2), 1-20 p. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(01\)00012-8](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(01)00012-8)
- Hénaff, A., Lageat, Y., Costa, S., & Plessis, E. (2002). Le recul des falaises crayeuses du Pays de Caux : détermination des processus d'érosion et quantification des rythmes d'évolution / Retreat of chalk cliffs in the Pays de Caux: processes and rates. *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 8(2), 107-118. <https://doi.org/10.3406/morfo.2002.1132>
- Houser, C., Greenwood, B., & Aagaard, T. (2008). Wave-form variability in nearshore sandbars. *Marine Geology*, 252(1-2), 26-33.
- Hutchinson, J. N. (2006). Coastal cliff geomorphology and stability. In J. N. Hutchinson & R. C. Charman (Eds.), *Cliff Stability* (1-27 p.). Geological Society, London, Engineering Geology Special Publications. <https://doi.org/10.1144/GSL.ENG.2006.020.01.01>
- Imam, C., Chaibi, M., Ayt Ougougdal, M., El Bchari, F., Charif, A., & Ait Malek, H. (2023). Analysis of Coastal Retreat and Slope Movements on Rocky Coastal Cliffs: A Distributed Natural Hazard in the Safi Region, Morocco. *Proceedings*, 87(1), 21. <https://doi.org/10.3390/IECG2022-13962>
- Kennedy, D. M. (2014). The rock coast of Australia. Geological society. *London, Memoirs*, 40(1), 235-245. <https://doi.org/10.1144/M40.14>



- Letortu, P., Costa, S., Bensaïd, A., Cador, J. M., & Quénol, H. (2014). Vitesses et modalités de recul des falaises crayeuses de Haute-Normandie (France) : méthodologie et variabilité du recul. *Géomorphologie: relief, processus, environnement*, 20(2), 133-144. <https://doi.org/10.4000/geomorphologie.10588>
- Leveridge, B., & Hartley, A. J. (2006). The Variscan Orogeny: the development and deformation of Devonian/Carboniferous basins in SW England and South Wales. In P. J. Brenchley & P.F. Rawson (Eds.), *The Geology of England and Wales* (pp. 225-255) Geological Society of London. <https://doi.org/10.1144/GOEWP.10>
- Lharti, S., Florb, G., El kasmi, S., Flor-Blanco, G., El Janati, M., Marcelli, M., Piazzolla, D., Scanu, S., Della Ventura, G., Boukili, B., & El Moutaoukkil, N. (2024). Multi-decadal evolution of the Moroccan Atlantic shoreline: A case study from the Essaouira coastal sector. *Journal of African Earth Science*, 212, 1-24. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2024.105191>
- Lim, M., Rosser, N. J., Allison, R. J., & Petley, D. N. (2010). Erosional processes in the hard rock coastal cliffs at Staithes, North Yorkshire. *Geomorphology*, 114, 12-21. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.02.011>
- Masselink, G., & Hughes, M. G. (2003). *Introduction to Coastal Processes and Geomorphology*. Hodder Arnold.
- Masselink, G., Scott, T., Poate, T., Russell, P., Davidson, M., & Conley, D. (2016). The extreme 2013/2014 winter storms: hydrodynamic forcing and coastal response along the southwest coast of England. *Earth Surface Processes and Landforms*, 41(3), 378-391. <https://doi.org/10.1002/esp.3836>
- MEDDE (2014). *Plan de prévention des risques littoraux (PPRL)-Guide méthodologique*. Direction Générale de la Prévention des Risques.
- Nait-Si, H., Ouammou, A., & Nmiss, M. (2022). *Apport du SIG dans l'analyse physique et hydrographique dans un bassin versant anti-atlasique. Cas du bassin versant de l'oued Adoudou*. Publication de la faculté des Lettres et des Sciences Humaines-Oujda (53-58 p.).
- Naj, M., Aberkan, M., & Saadane, A. (2025). Morocco's Atlantic coast: exploring and discovering sites at high risk of marine erosion. *E3S Web of Conferences* 502(03007), 1-5. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202450203007>
- Naylor, L. A., Stephenson, W. J., & Trenhaile, A. S. (2010). Rock coast geomorphology: Recent advances and future research directions. *Geomorphology*, 114, 3-11. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.02.004>
- Nmiss, M. (2018). *Le littoral des Chtouka Ouest : morphologie, dynamique et caractérisation du matériel sableux*. Edition universitaire européenne.
- Nmiss, M. (2023). *Morphologie et dynamique actuelle du littoral atlantique marocain entre oued Massa et oued Souss*. [Thèse de doctorat]. Université Sidi Mohamed Ben Abdellah Fès.
- Nmiss, M., Amyay, M., & Ouammou, A. (2020). Apport des SIG et de la télédétection dans la détermination et le suivi de la dynamique de ligne de rivage: application sur le littoral de la baie d'Agadir et des Chtouka ouest (Maroc). *Revue Géomagherb*, 16, 34-43.
- Nmiss, M., Amyay, M., & Ouammou, A. (2021b). *Dynamique du trait de côte d'une plage peu anthropisée cas de la plage Sidi Ouassai, Massa (Maroc Atlantique)*. Publication de la faculté des lettres et des sciences humaines-Oujda, (249-256 p.).
- Nmiss, M., Amyay, M., Atiki, N., & Irifi, H. (2019). *Apport du SIG et de la télédétection au suivi de la dynamique des espaces côtiers : Application sur le littoral de la baie d'Agadir (Maroc)*. Publications de la faculté des Lettres et Sciences Humaines, Oujda, (51-62 p.).
- Nmiss, M., Amyay, M., Atiki, N., & Tnourji, H. (2021a). *The morphological consequence of the storm of 1 march 2018 on a highly anthropized beach: the case of Agadir Bay*. Publication de la faculté des lettres et des sciences humaines de Oujda, Université Mohamed Premier, (27-32 p.).
- Nmiss, M., Anthony, E., Amyay, M., & Ouammou, A. (2022). Multi-decadal shoreline change, inherited coastal morphology and sediment supply in the Souss-Massa littoral cell (Morocco), and a prognosis with sea-level rise. *Journal of African Earth science*, 196, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2022.104672>
- Nmiss, M., Amyay, M., Ouammou, A., Mahjoub, B., & Atiki, N. (2024). *Quantification du recul des falaises sur le littoral entre Tifnit et Sidi Toul au Sud D'Agadir. Acte de colloque international sur les risques hydroclimatiques et géomorphologiques : typologie, cartographie et gestion. Cloture du Projet PPR*. Publication de la faculté des Lettres et des Sciences Humaines-Oujda, (86-91 p.).
- Nmiss, M., Amyay, M., Atiki, N., Ouammou, A., Benbih, M., & Nait-Si, H. (2025a). Seasonal morphological changes and grain size distribution mapping on the Massa beaches using topographic survey and GIS. *International Journal of Engineering and Geosciences*, 10(2), 272-289. <https://doi.org/10.26833/ijeg.1598677>



- Nmiss, M., Amyay, M., Atiki, N., Ouammou, A., Benbih, M., Nait-Si, H., Yazami Ztait, M., & Naji, E.(2025b). Shoreline Changes at the Souss and Massa rivers mouths, Morocco: A five decades analysis (1970-2024). *International Journal of Engineering and Geosciences*, 10(3), 456-476. <https://doi.org/10.26833/ijeg.1646118>
- Ouammou, A., Weisrock, A., Balescu, S., El Ouahidi, A., Ghaleb, B., Guerin, G., Hardy, F., Viñuela, J.M., Abdessadok S., Charif, A., Rousseau, I., Lamothe, M., & Falgueres, C. (2019 a). Paléorivages, dunes côtières et occupations humaines à l'embouchure de l'oued Tamri, Maroc atlantique, au pléistocène supérieur (SIM5). *Journal of Water and Environmental Sciences*, 3, RQM, 9, 391-406.
- Ouammou, A., Weisrock, A., Balescu, S., Viñuela, J. M., Guérin, G., Hardy, F., El Ouahidi, A., Charif, A., Ghaleb, B., & Lamothe, M. (2019 b). Systèmes dunaires littoraux de Boughrara (province de Tiznit, Maroc) et occupation humaine depuis le SIM 5, étude préliminaire. *Bulletin d'Archéologie Marocaine, PANAF*, 1-24 p.
- Paskoff, R. (1981). *L'érosion des côtes que sais-je ?*. Presses universitaires de France.
- Paskoff, R. (2006). *Les littoraux impacts des aménagements sur leur évolution*. Troisième édition, Armand colin.
- Pierre, G., & Lahaye, M. (2017). Role of geological factors in cliff instability along the French Channel coast. *Journal of Coastal Research*, 33(2), 264-276.
- Prémaillon, M. (2018). *Hiérarchisation des facteurs de l'érosion des falaises côtières du site au globe*. [Thèse de doctorat]. Université de Toulouse III Paul sabatier.
- Rosser, N. J., Petley, D. N., Lim, M., Dunning, S. A., & Allison, R. J. (2005). Terrestrial laser scanning for monitoring the process of hard rock coastal cliff erosion. *Q J Eng Geol Hydrogeol*, 38,363-375. Routledge. <https://doi.org/10.1144/1470-9236/05-008>
- Sedrati, M., Morales, J. A., El Mrini, A., Anthony E.J., Bulot, G., Le Gall, R., & Tadibaght, A. (2022). Using UAV and Structure-From-Motion Photogrammetry for the Detection of Boulder Movement by Storms on a Rocky Shore Platform in Laghdira, Northwest Morocco. *Remote sensing*, 14, 1-23. <https://doi.org/10.3390/rs14164102>
- Sunamura, T. (1992). *Geomorphology of Rocky Coasts*. Chichester: John Wiley & Sons.
- Temitope, D., & Oyedotun, T. (2014). Shoreline Geometry: DSAS as a tool for historical trend analysis. *Geomorphological techniques*, 3, 1-12.
- Theiler, E. R., & Danforth, W. W. (1994). Historical shoreline mapping (I): improving techniques and reducing positioning errors. *Journal of Coastal Research*, 10(3), 549-563.
- Trenhaile, A. S. (2002). Rock coasts, with particular emphasis on shore platforms. *Geomorphology*, 48(1-3), 7-22. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(02\)00174-5](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(02)00174-5)
- Trenhaile, A. S. (2008). *The Geomorphology of Rock Coasts*. Oxford University Press.
- Vann Jones, E. C., Rosser, N. J., Brain, M. J., & Thompson, S. S. (2015). Quantifying the environmental controls on erosion of a hard rock cliff. *Marine Geology*, 363, 230-242. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2014.12.008>
- Weisrock, A., 1980. *Géomorphologie et paléoenvironnement de l'Atlas Atlantique (Maroc)*. [Thèse de doctorat d'Etat]. Université de Paris.
- Weisrock, A., Balescu, S., Ouammou, A., Abdessadok, S., Ghaleb, B., Rousseau, L., Huot, S., Lamothe, M., & Falguères, C. (2016). Géomorphologie, stratigraphie, géochronologie et oscillations glacio-eustatiques dans le domaine de la basse terrasse côtière, à l'embouchure de l'Assif Tamraght (Baie de Tarhazout, Agadir, Maroc) pendant le MIS 5 et le MIS 4. *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 22(3), 265-286. <https://doi.org/10.4000/geomorphologie.11439>.