EUROPEAN COMMISSION
DIRECTORATE-GENERAL
HUMANITARIAN AID AND CIVIL PROTECTION - ECHO
ECHO A - Strategy, Policy and International Co-operation
Unit A.5 - Civil Protection Policy
Brussels, ECHO.A.5 (2016) 3129102

UD-RASP- Résilience aux catastrophes urbaines par l'évaluation des risques et la planification durable

Ref. No. ECHO/SUB/2016/740186/PREV19

D2.2/D3.3 - Erosion Côtière à Monastir

(31. October 2018)

Coordonné par

IABG mbH Geodaten Factory
Einsteinstraße 20
D-85521 Ottobrunn
GERMANY

En coopération avec:

United Nations University
Institute pour l'environnement et la sécurité humaine (UNU-EHS)
Platz der Vereinten Nationen 1,
53113 Bonn, Germany

Municipality of Monastir
Avenue Habib Bourguiba,
5019 Monastir, Tunisia

D2.2/D3.3 – Erosion côtière à Monastir

Tâche	T2 - Retrospective analysis/ T3 - Multi-hazard risk assessment/	
Action	A2.2, 3.2	
Niveau de diffusion	✓ Publique • Réservé aux autres partenaires du programme (y compris la DG ECHO) • Limité à un groupe spécifié par le consortium (y compris la DG ECHO) • Confidentiel, uniquement pour les membres du consortium (y compris la DG ECHO)	
Date de publication	Octobre 2018	
Responsable de la tâche ou de l'activité	Tâche: IABG	Activité: IABG
Personne à contacter	Konstanze Fila (fila@iabg.de)	
Contributeurs	Felicitas Bellert, Kristin Fleischer, Sonia Ayed	
Bref résumé	Identification des zones à risque causées par l'érosion côtière dans la ville de Monastir sur la base d'une revue de la littérature et de consultations de la municipalité de Monastir et de l'APAL Tunis	
Mots-clés	Érosion côtière, zone à risque, risque de catastrophe, zone urbaine	

Les recherches qui ont abouti à ces résultats ont reçu un financement de la Direction générale de l'aide humanitaire et de la protection civile (ECHO) de la Commission européenne dans le cadre de la convention de subvention n° ECHO/SUB/2016/740186/PREV19.
Cette publication n'engage que son auteur et l'Union européenne ne peut être tenue responsable de l'usage qui pourrait être fait des informations qu'elle contient.

Tous droits réservés

Ce document ne peut être copié, reproduit ou modifié en tout ou en partie à quelque fin que ce soit sans l'autorisation écrite du Consortium UD-RASP. En plus de l'autorisation écrite de copier, reproduire ou modifier ce document en tout ou en partie, une mention des auteurs du document et de toutes les parties applicables du copyright doit être clairement indiquée.

Table of Contents

1. Introduction 5
2. Erosion Côtière 6
   2.1 Processus et facteurs d'influence 6
   2.2 Impact du changement climatique sur l'érosion côtière 7
   2.3 L'érosion côtière en tant que danger naturel 8
   2.4 L'érosion côtière en Afrique du Nord 10
3. Méthodologie 12
   3.1 Examen de la situation passée et actuelle 12
   3.2 Analyse des dangers et de l'exposition 12
      3.2.1 Données d'entrée 12
      3.2.2 Flux de travail 13
4. Zone d'étude 15
   4.1 Géographie 15
   4.2 Géologie 16
   4.3 Climat 17
   4.4 Hydrologie 18
5. Resultats et Discussion 19
   5.1 L'érosion côtière à Monastir 19
   5.2 Partie 1 20
   5.3 Partie 2 20
   5.4 Partie 3 22
   5.5 Partie 4 23
   5.6 Partie 5 24
   5.7 Partie 6 26
   5.8 Ruissellement de surface 28
6. Conclusions et perspectives 29
Annex – Cartes "Coastal Erosion" 33

List of figures

Figure 1: Perte annuelle de terres due à l'érosion jusqu'en 2100 en Tunisie selon trois scénarios différents d'élévation du niveau de la mer 11
Figure 2: Segments côtiers 13
Figure 3: Analyse des risques liés au déroulement du travail 14
Figure 4: Analyse des risques liés au déroulement du travail 14
Figure 5: Analyse de l'exposition au flux de travail 15
Figure 6: Localisation de la faille Skanès-Khniss et son extension au golf de Hammament et à la presqu'île du Cap Bon 16
Figure 7: Ampleur et fréquence des tremblements de terre dans la région de Monastir (1930-2010) 17
Figure 8: Climat de Monastir, Tunisie (Station climatique "Monastir-Skanès" 18
Figure 9: Réseau hydrographique du gouvernorat de Monastir 18
Figure 10: Analyse de l'exposition, partie 1 20
Figure 11: Analyse de l'exposition, partie 2 21
Figure 12: Partie 2 -1) Murs Marin 2) Rip Raps 3) Caniveaux de drainage 21
Figure 13: Partie 2 - 1) Érosion des collines due à l'absence de couverture végétale 2) Blocage des canaux de drainage par accumulation de débris et croissance de la vegetation 22
Figure 14: Analyse de l'exposition, partie 3 23
Figure 15: Analyse de l'exposition, partie 4 24
Figure 16: Analyse de l'exposition, partie 5 25
Figure 17: Processus d'érosion - Zone touristique 1) digues 2)-4) Infrastructure touchée 26
Figure 18: Analyse de l'exposition, partie 6 27
Figure 19: Ripraps de la partie 6 28
Figure 20: Limite des bassins versants s'étendant vers la côte 28
Figure 21: Direction des canaux de drainage internes vers la côte 29

List of tables

Tableau 1: Données d'entrée pour l'analyse des dangers et de l'exposition 12

Abbreviations

APAL	Agence de Protection et d'Aménagement du Littoral
DPM	Domaine Public Maritime
MNT	Modèle numérique de terrain
INM	Institut National de la Météorologie
ENM	Elévation du Niveau de la Mer
WV3	World View 3 / images satellitaires
CUS	Capacité de l'utilisation du sol

1. Introduction

Le risque de catastrophes urbaines est un problème croissant qui est dû à deux grandes tendances du changement global: l'urbanisation et l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des phénomènes extrêmes liés au climat. Les villes côtières sont en outre confrontées à l'élévation du niveau de la mer, aux glissements de terrain et à l'érosion côtière. Conjuguées à des niveaux élevés de vulnérabilité sociétale, ces tendances augmentent les risques de catastrophes et les pertes en vies humaines, en terres et les dommages économiques qui en découlent. La Tunisie est confrontée à des risques majeurs parmi les pays européens voisins, compte tenu de sa croissance démographique rapide et de près de 80% de ses zones urbaines concentrées le long de la mer méditerranée.

Dans ce contexte, le Ministère tunisien de l'Equipement de l'Habitat et de l'Aménagement du Territoire envisage de développer un système national d'information et d'analyse des risques urbains pour évaluer l'impact de ces risques et réduire leurs effets. Toutefois, sa mise en œuvre se heurte à plusieurs difficultés majeures, notamment l'absence de données géospatiales pertinentes pour l'analyse des risques urbains, ainsi qu'une compréhension insuffisante des facteurs sous-jacents, des zones à risques actuelles et des scénarios futurs possibles des risques de catastrophes urbaines. Pour soutenir ce processus, le projet UD-RASP utilise la ville de Monastir comme cas pilote, représentatif des zones urbaines côtières tunisiennes confrontées à des risques environnementaux similaires.

Les zones côtières sont situées à l'interface entre la terre et la mer et constituent des systèmes naturels extrêmement dynamiques et complexes. Toute modification des propriétés de la terre ou de la mer entraîne un impact physique et socio-économique important.[1] Les zones côtières sont constamment soumises à des pressions provenant de sources terrestres telles que les inondations fluviales, ou de sources maritimes comme les vagues et les ondes de tempête.L'érosion de la côte qui en résulte est un phénomène mondial qui est provoqué par divers processus et facteurs environnementaux qui agissent ensemble dans l'environnement côtier à la morphologie dynamique. Les principaux facteurs naturels sont l'élévation du niveau de la mer, les tempêtes, les vents, les courants littoraux ainsi que le front de mer. En outre, l'érosion côtière est influencée par des facteurs anthropiques tels que l'ingénierie côtière, le dragage, la réglementation des rivières et les barrages. En raison des impacts du changement climatique, l'élévation du niveau de la mer étant un facteur clé, l'érosion côtière s'est accélérée et constitue désormais un défi majeur pour les zones côtières du monde entier.

Comme étape vers l'évaluation des risques pour la ville de Monastir, ce rapport se concentre sur la situation passée, actuelle et future de l'érosion côtière dans la région. La littérature scientifique ainsi que la littérature grise sont passées en revue afin de mieux comprendre les processus locaux. Une analyse des principaux facteurs d'influence du risque d'érosion côtière est effectuée. Tout au long du processus, les parties prenantes sont consultées afin de bénéficier des connaissances des experts locaux et d'assurer un compte rendu actualisé de la situation actuelle. Enfin, il donne un aperçu des développements et des défis futurs dans la zone d'étude.

[1] Özyurt and Ergin (2009)

2. Erosion Côtière

Dans ce chapitre, les processus sous-jacents et les facteurs d'influence de l'érosion côtière sont expliqués. En outre, le changement climatique est introduit comme un facteur moteur de l'accélération de l'érosion côtière sur de nombreuses côtes. Dans une étape ultérieure, le phénomène est examiné dans son rôle de danger naturel. Enfin, la situation générale de l'érosion côtière en Afrique du Nord est présentée, en prenant comme exemple la Tunisie et le Maroc.

2.1 Processus et facteurs d'influence

Dans des conditions d'équilibre, il existe un équilibre très délicat entre les processus qui érodent la plage en emportant des matériaux et ceux qui qui les transportent vers la côte pendant le processus d'accrétion. Ce processus est entraîné par les vagues de surface et détermine la forme du rivage. Le profil du rivage est généralement déterminé par un certain niveau d'activité des vagues, la topographie locale et la taille des grains de sédiment.[2]

L'érosion se produit lorsqu'il n'y a pas d'équilibre entre le transport des matériaux à l'extérieur de la rive et le dépôt de nouveaux matériaux sur la rive. L'érosion et l'accrétion des reliefs côtiers sont des processus naturels qui subissent des cycles périodiques à des échelles de temps allant de quelques jours à des années.[3] Elle est définie comme "...l'enlèvement physique des sédiments par les vagues et l'action des courants ".[4] Elle peut aussi être définie comme "...la perte de terres côtières due à l'enlèvement net des sédiments ou du substratum rocheux du rivage..."[5] Au cours du processus d'érosion, une zone côtière perd sa partie terrestre subaérienne, comme les plages, les dunes et les falaises. L'enlèvement de matière est entraîné par l'action des vagues et des courants, les processus de gaspillage de masse sur les pentes ainsi que l'affaissement.[6]

Tous les types de côtes sont touchés par l'érosion côtière, mais le mécanisme d'érosion primaire dépend de la géomorphologie de la côte.[7] Les plages s'érodent lorsque les vagues ou les courants retirent les matériaux du rivage. En conséquence, la plage devient plus étroite et plus basse en altitude. Le matériau érodé est ensuite transporté au large et déposé dans de grands bancs de sable. Au fil du temps, les sédiments sont ramenés vers la côte par les vagues. Sur les promontoires côtiers, l'érosion entraîne la dégradation des falaises et des pentes abruptes. Le processus contribue en outre aux processus de gaspillage en masse avec le développement de fissures et de chutes de pierres ultérieures. Les fortes précipitations peuvent augmenter la saturation du sol et entraîner une réduction de la résistance au cisaillement du sol, ce qui augmente la vulnérabilité à la rupture de la pente.[8]

Outre la géomorphologie côtière, le niveau de la mer est un facteur important qui influence l'érosion côtière. Elle varie sur des échelles de temps allant de quelques heures à plusieurs siècles et sur des échelles spatiales allant de moins de 1 km à l'échelle mondiale. Les variations de hauteur varient de

[2] Australian Department of Climate Change (2009)
[3] Van Rijn (2011)
[4] Klein and Nicholls (1998)
[5] Woolfe (2017)
[6] Woolfe (2017)
[7] Klein and Nicholls (1998)
[8] Woolfe (2017)

quelques millimètres à plus d'un mètre. Le niveau de la mer varie en réaction aux fluctuations de la température de l'eau ou au transfert de l'eau entre les océans et les continents et les calottes glaciaires. Elle varie également au cours de la redistribution de l'eau lors des marées et des changements dans la circulation océanique et atmosphérique.

Les événements météorologiques, comme les tempêtes, qui peuvent entraîner le transport de sédiments au large des côtes, constituent un autre facteur. Les tempêtes côtières, les ondes de tempête, les inondations et les tsunamis entraînent des niveaux d'eau beaucoup plus élevés et une intensité accrue des vagues et des courants due aux vents et à la pression atmosphérique. Les conditions des vagues et les courants jouent un rôle majeur dans la formation du trait de côte, car ils influencent le transport du sable et sont une cause majeure d'érosion et d'accrétion. Contrairement aux changements du niveau de la mer, qui provoquent un lent processus d'érosion, les tempêtes provoquent une érosion courte mais très intense sur la côte. Selon les caractéristiques de la tempête, des taux d'érosion importants de plusieurs mètres par événement peuvent survenir.[9] Par conséquent, les ondes de tempête ou les inondations causées par les tsunamis qui y sont associées peuvent affecter des formes de relief qui ne sont généralement pas influencées par l'érosion.[10]

L'influence anthropique est un autre facteur qui a un impact important sur l'élimination des formes de relief par érosion. La construction de structures côtières comme des brise-lames ou des digues peut entraîner une modification des voies de transport des sédiments côtiers. Par la suite, les modèles d'érosion et d'accrétion dans les paysages touchés peuvent changer. L'enlèvement des sédiments par dragage ou extraction de sable est un autre facteur d'érosion. En réduisant la quantité d'énergie dissipée par les vagues entrantes, l'érosion peut être augmentée. La régularisation des cours d'eau peut entraîner une réduction de l'apport de sédiments, ce qui entraîne également une érosion côtière.[11]

2.2 Impact du changement climatique sur l'érosion côtière

Le changement climatique d'origine naturelle et humaine est susceptible de moduler les taux et les schémas d'érosion côtière à l'avenir.[12] Les facteurs liés au climat (2.1) subiront les changements les plus importants, ce qui entraînera une modification des futurs modèles d'érosion. Parmi les nombreux facteurs qui influencent l'érosion côtière comme le niveau de la mer, les courants, les vents et les vagues, chacun d'entre eux est affecté par le changement climatique.[13]

Parmi ces facteurs, le niveau de la mer et le rythme prévu de son élévation est l'un des éléments les plus importants du changement climatique et fait l'objet de nombreux débats scientifiques et publics. Il constitue une menace sérieuse pour les établissements humains et les activités économiques situés le long des régions côtières.[14]

[9] Beatley, et al. (2002)
[10] Woolfe (2017)
[11] Woolfe (2017)
[12] Niang et al. (2014)
[13] Wong et al. (2014)
[14] Dasgupta et al. (2009)

L'augmentation du réchauffement de l'océan, qui entraîne une dilatation thermique de l'eau de mer, est l'un des principaux facteurs influant sur le ENM, liée au changement climatique..[15] Il a été prouvé dans de nombreuses études que le niveau moyen global de la mer a augmenté au cours du 20ème siècle. Cette tendance devrait s'accélérer au cours du XXIe siècle.[16] Le taux moyen entre 1901 et 2010 était de 1,7 (1,5-1,9) mm/an-1 avec une augmentation à 3,2 (2,8 à 3,6) mm/an-1 entre 1993 et 2010. [17] Plusieurs modèles prévoient que le taux de ENM au XXIe siècle dépassera le taux observé en 1971 et 2010.[18]

Les systèmes côtiers et les basses terres devraient être de plus en plus influencés par l'inondation, les inondations côtières et l'érosion côtière à la suite du ENM.[19] L'élévation du niveau de la mer fait reculer le littoral vers l'intérieur des terres en favorisant le transport des sédiments en mer.[20] Lorsque le niveau de la mer monte, la plage cherche à maintenir un équilibre du profil de la plage. Pour maintenir cet équilibre tout au long du ENM, les sédiments sont retirés du rivage et déposés au large, de sorte que la zone littorale gagne une élévation égale à l'élévation du niveau de la mer. Par conséquent, les volumes des matériaux érodés et déposés sont égaux.[21]

Il faut tenir compte du fait que les différences locales et régionales en termes de ENM et de température, d'occurrence et de réaction aux effets du changement climatique varieront à travers le monde. Les impacts du changement climatique sur les schémas d'érosion côtière seront spécifiques à chaque site et largement déterminés par des facteurs locaux.[22] Outre le ENM, les ondes de tempête auront un impact significatif sur les zones côtières.[23] L'effet destructeur de ces phénomènes s'accentuera à mesure que le changement climatique pourrait entraîner une augmentation de la hauteur des vagues extrêmes et de l'intensité des tempêtes.[24]

2.3 L'érosion côtière en tant que danger naturel

Les zones côtières se caractérisent à l'échelle mondiale par un développement économique et une croissance démographique rapides, qui entraînent une exposition accrue des infrastructures, des biens et des activités côtières.[25] Le processus d'érosion côtière a toujours existé, mais il est maintenant accéléré par les activités humaines.[26] Ce processus naturel se transforme en risque dès qu'il affecte les activités humaines ou les infrastructures. Étant donné qu'un pourcentage élevé de la population mondiale vit dans des zones côtières vulnérables à l'érosion côtière, il est de plus en plus nécessaire de s'adapter à ses effets sur la population, l'environnement bâti et les infrastructures.[27]

[15] Linham and Nicholls (2010)
[16] Gutierrez et al. (2011)
[17] Rhein et al. (2013)
[18] Church et al. (2013)
[19] Wong et al. (2014)
[20] Wong et al. (2014), Linham and Nicholls (2010)
[21] Linham and Nicholls (2010), Bruun (1962)
[22] Klein and Nicholls (1998)
[23] Woth et al. (2006)
[24] Linham and Nicholls (2010)
[25] Lenton et al. (2009)
[26] Van Rijn (2011)
[27] McLaughlin et al. (2002)

Plusieurs méthodes d'évaluation des risques d'érosion côtière ont été mises au point. Divers facteurs doivent être pris en compte pour déterminer la méthode d'évaluation. La forme et la composition du relief côtier et la présence d'îles-barrières ainsi que de récifs dans la zone côtière sont des facteurs qui définissent les processus à prendre en compte. Les plages sablonneuses et les rivages rocheux présentent des caractéristiques différentes qui influencent les analyses.[28] L'échelle spatiale et temporelle de l'analyse doit être adaptée en fonction de l'échelle de la zone d'étude. De plus, l'échelle de temps de l'analyse doit être définie à l'avance. A une échelle de temps courte et interannuelle, il faut tenir compte du comportement côtier sur l'ensemble du cycle météorologique saisonnier. Pour les échelles de temps décennales à long terme, la variabilité du climat devrait être prise en compte.

Il est crucial pour les communautés côtières de prendre en compte les risques du changement climatique dans leur planification urbaine afin de réduire les risques liés à ces impacts. Sans adaptation, les plages, les dunes de sable et les falaises actuellement en érosion s'éroderont encore plus sous l'influence de l'augmentation du ENM. [29] La planification proactive doit devenir une priorité, car elle réduit la nécessité d'une réponse réactive aux dommages causés par les impacts du changement climatique. La priorité de ces mesures de planification de la protection est de protéger les personnes, les biens et les infrastructures.

Les techniques d'adaptation sont un vaste ensemble de processus qui fournissent les connaissances, l'expérience et l'équipement nécessaires pour réduire les effets de l'érosion côtière. Ces technologies visent à réduire les conséquences de l'érosion des rives, des dommages causés par les vagues et des inondations. Les mesures peuvent être appliquées individuellement ou en combinaison, selon le site spécifique. L'action peut être différenciée en mesures "dures" et "douces".

Les mesures " dures " présentent l'approche traditionnelle de la protection côtière. Des barrières solides sont construites entre la terre et la mer afin d'éviter toute interaction. [30] Il s'agit de structures telles que des digues, des épis, des digues, des digues et d'autres barrières. Bien que ces mesures offrent une protection tangible aux sections de rive qu'elles protègent, elles n'empêchent pas le processus physique d'érosion. Le processus est simplement transféré du rivage au fond de la mer ou à la côte adjacente.[31]

Avec la compréhension croissante des fonctions naturelles des rives, une tendance aux mesures non structurales et " douces " s'est développée. Ces mesures tentent de compléter et de s'adapter aux processus naturels. Ils mettent l'accent sur l'information, le renforcement des capacités, les arrangements institutionnels ainsi que l'élaboration de politiques et de stratégies. [32] Des exemples de ces mesures sont l'amélioration de la régénération de la végétation côtière, la stabilisation des dunes au moyen de clôtures et de végétation, la restauration de l'habitat, l'alimentation des plages ou la construction de digues pour réduire l'érosion et améliorer la côte comme barrière aux ondes de tempête. [33] Grace à ces mesures, le paysage naturel ainsi que la fonction d'habitat peuvent être mieux

[28] Woolfe (2017)
[29] French 2001
[30] French 2001
[31] Nicholls et al. (2007)
[32] Linham and Nicholls (2010)
[33] Snoussi et al. (2009)

préservés. Ils nécessitent cependant une surveillance, une maintenance et une ingénierie continues et régulières afin d'assurer une protection efficace. Ces coûts et capacités supplémentaires doivent être pris en compte lors du choix de l'option appropriée. [34]

Actuellement, les deux types de mesures sont appliquées, même s'il y a eu une tendance vers des mesures "douces". Généralement, des mesures "dures" sont appliquées pour protéger les zones urbaines contre l'érosion et les inondations. "Les mesures " douces " sont plus souvent utilisées sur les côtes sédimentaires, composées de plages.[35]

2.4 L'érosion côtière en Afrique du Nord

Les zones côtières d'Afrique du Nord sont des zones à forte densité de population et à forte activité économique. A partir des années 1960, plusieurs zones côtières ont commencé à se développer vers le tourisme, le changement le plus significatif ayant eu lieu dans les années 1980 avec un développement accéléré du tourisme et de l'urbanisation. Les zones côtières en particulier ont subi une transformation rapide et ont connu une croissance urbaine et économique. [36] Les régions auparavant inhabitées ont connu une augmentation de la densité de population. Le nombre de ports et de marinas a augmenté avec la construction et l'extension simultanées d'infrastructures portuaires.

En ce qui concerne les risques naturels, les pays côtiers d'Afrique du Nord sont confrontés à des défis similaires. Les facteurs et les pressions anthropiques tels que la croissance démographique, le développement économique et l'urbanisation entraînent une exposition accrue aux risques côtiers pour les infrastructures humaines et la population. [37] Les facteurs naturels liés aux aléas naturels et à l'érosion côtière en particulier sont liés à des phénomènes liés au changement climatique, tels que l'accélération du phénomène ENM, l'augmentation des tempêtes extrêmes et l'inondation croissante des zones côtières.[38]

En Tunisie, l'évolution passée a perturbé l'équilibre naturel des zones côtières. Le pays a environ 1300 kilomètres de côtes, dont environ 575 kilomètres sont des plages de sable. [39] Ces plages sont des milieux fragiles et facilement déstabilisables. [40] Ainsi, un tiers des côtes tunisiennes sont constituées de plages érodables. La croissance et la densification de la population ont entraîné des conflits et des dégradations.

Hinkel et al (2015) ont modélisé la perte annuelle de terres sur la côte tunisienne pour le passé et pour les scénarios futurs. Trois scénarios d'élévation du niveau des phoques (avec une élévation du niveau de la mer de 0,3 m, 0,51 m et 1,11 m au XXIe siècle) ainsi que trois scénarios de développement socio-économique ont été retenus. La longueur totale des plages érodables a été calculée à 734, 2 km.

La figure 1 montre les pertes annuelles prévues en raison de l'élévation du niveau de la mer. Selon le scénario d'élévation du niveau de la mer en haute mer et sans adaptation, l'élévation du niveau de la

[34] Chadwick et al. (2013)
[35] Linham and Nicholls (2010)
[36] Oueslati (2010)
[37] Snoussi et al. (2009)
[38] Snoussi et al. (2009)
[39] Snoussi et al. (2009)
[40] APAL (2011)

mer devrait éroder environ 523 m2 de terres en 2100. Selon le scénario de faible élévation du niveau de la mer, 71 m2 seront perdus en 2100.

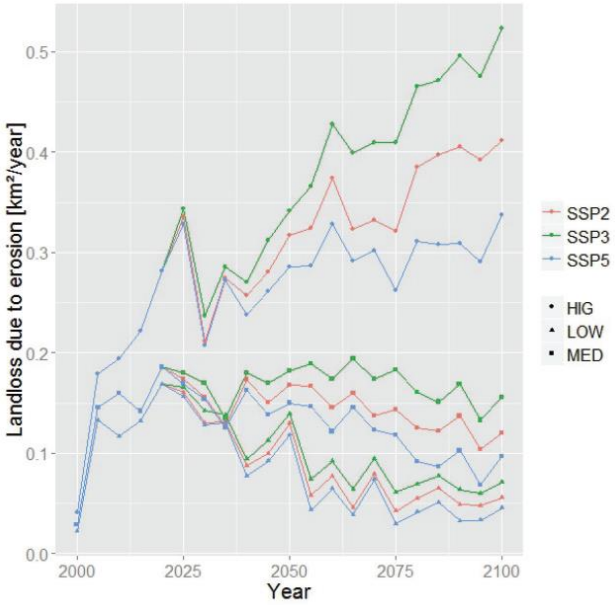


Figure 1: Perte annuelle de terres due à l'érosion jusqu'en 2100 en Tunisie selon trois scénarios différents d'élévation du niveau de la mer [41]

Le Maroc est un autre pays d'Afrique du Nord touché par l'érosion côtière. Sa zone côtière s'étend sur plus de 3500 kilomètres et borde l'océan Atlantique et la mer Méditerranée. Environ 60 % de la population vit dans des villes côtières, qui abritent 90 % des industries. La partie orientale de la côte méditerranéenne du Maroc a une faible topographie et une grande valeur écologique et touristique. En conséquence, la zone côtière est physiquement et socio-économiquement vulnérable aux aléas tels que l'élévation du niveau de la mer ou l'érosion côtière. Selon le scénario, jusqu'à 50 % de la superficie sapée devrait se situer dans les zones côtières. Selon l'emplacement, l'inondation ou l'érosion est la principale des rives de l'isndy dans l'est du Maroc sera inondée d'ici 2050. En outre, une inondation importante est exsue.[42]

La ville côtière de Tanger est le pôle socio-économique le plus important du nord du Maroc. La ville de Tanger a été la première destination touristique balnéaire dans les années 1970 au Maroc. La zone côtière est de plus en plus urbanisée et le tourisme est devenu sa principale ressource économique. [43] Cependant, l'érosion des plages de l'Est et la pollution des eaux côtières constituent une menace majeure pour le secteur touristique. [44] Outre les infrastructures côtières touristiques, les défenses côtières, les ports, les zones urbaines, les chemins de fer et les zones industrielles sont particulièrement vulnérables à l'érosion côtière.

[41] Hinkel et al. (2015)
[42] Snoussi et al. (2009)
[43] Anfuso et al. (2010)
[44] Anfuso et al. (2010)

En conclusion, les pays côtiers d'Afrique du Nord sont confrontés à une accélération de l'érosion côtière qui nécessite une évaluation détaillée du risque et de son développement futur à la lumière du changement climatique.

3. Méthodologie

3.1 Examen de la situation passée et actuelle

Afin d'analyser la situation passée et actuelle de l'érosion côtière sur la côte de Monastir, une revue de littérature a été menée pour recueillir des informations sur l'état passé de l'érosion côtière dans la zone d'étude. Les rapports de l'Agence de Protection et d'Aménagement du Littoral (APAL) ont permis de comprendre les processus naturels. L'accent a également été mis sur les mesures de protection mises en œuvre et prévues. En plus des rapports des autorités locales, la littérature scientifique a été analysée afin d'explorer les développements actuels et futurs dans la région, en particulier en considérant le changement climatique comme un facteur d'influence. De plus, des entrevues avec les intervenants ont été menées à plusieurs reprises. Des experts de l'APAL à Tunis ont fourni des informations précieuses sur l'état actuel de la côte à Monastir. Au cours de diverses entrevues, la municipalité a contribué à une compréhension détaillée de la situation et des processus sur place. Lors d'une enquête de terrain menée avec l'appui de la municipalité, la situation actuelle a été documentée. L'accent a été mis sur l'identification des zones à risqué actuels d'érosion côtière et sur l'analyse des mesures de protection déjà mises en œuvre parmi celles qui étaient prévues précédemment.

3.2 Analyse des dangers et de l'exposition

Au cours du projet, des analyses SIG ont été effectuées pour évaluer les zones de danger et d'exposition à l'érosion côtière à Monastir.

3.2.1 Données d'entrée

Les données d'entrée utilisées pour les analyses ont été décrites plus en détail dans le livrable "D1.2". Par conséquent, seul un aperçu des données est donné dans le présent rapport (tableau 1). L'imagerie stéréoscopique World View 3 (WV3) a servi de base aux analyses ultérieures. Un modèle numérique de terrain (MNT) a en outre été calculé à partir de la DV 3 et les données "Urban" et "Additional" de la géodatabase de l'UDRASP ont été utilisées. Les vitesses d'écoulement maximales, calculées dans le cadre de la modélisation du risque de crue éclair, ont également été incluses dans l'analyse (voir livrable "D2.2").

Tableau 1: Données d'entrée pour l'analyse des dangers et de l'exposition

Données d'entrées	Source	Date
Image 2017 (0.5 m)	EUSI – World View 3 – mosaique	2017
DSM1 & DTM1 (Raster)	IABG, preparer à partir de l'imagerie WV3	2017
Base de données UDRASP (Ensemble de données urbaines, Additionnel)	IABG, Preparer par l'intégration du PAU et la cartographie/mise à jour basée sur l'imagerie WV3	2017
Vélocité maximale	DHI, événement de précipitation HQ100	2018

3.2.2 Flux de travail

Avant de procéder à l'analyse, la côte de Monastir a été subdivisée en six segments côtiers (Figure 2). Les segments sont basés sur des délimitations qui ont également été utilisées dans les rapports de l'APAL.[45] Dans le chapitre 5, chaque segment sera discuté séparément et examiné en ce qui concerne son danger et son exposition à l'érosion côtière.

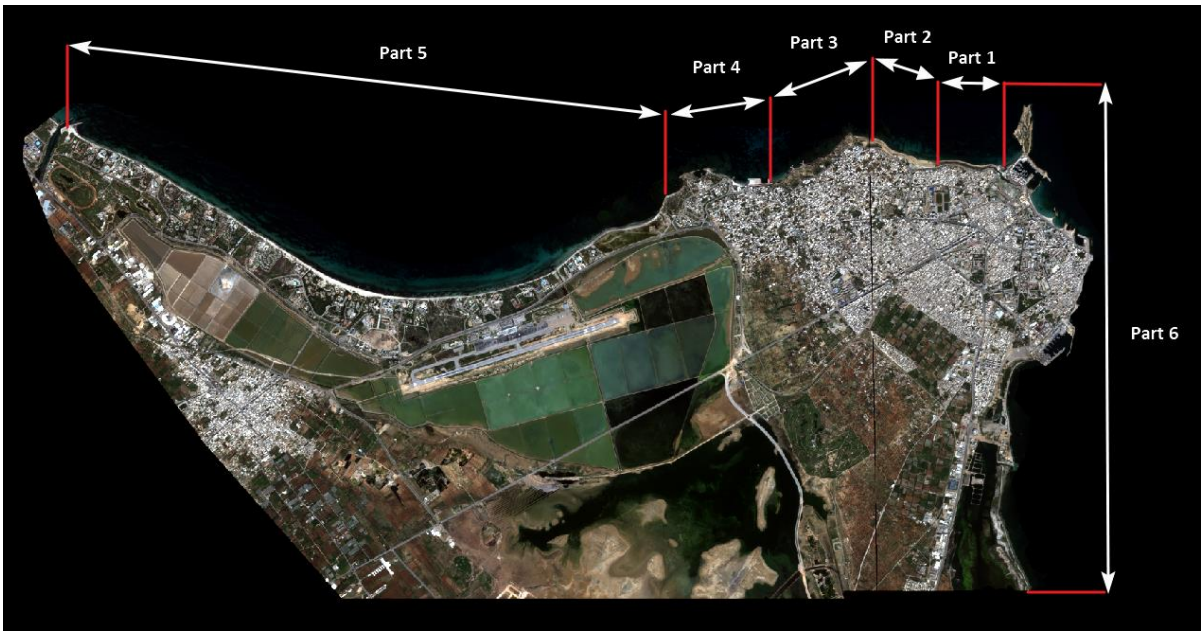


Figure 2: Segments côtiers

La figure 3 illustre le déroulement des opérations pour la définition de la zone dangereuse. Pour définir le danger dû à l'érosion marine, la zone située à 200 mètres à l'intérieur des terres de la côte est à peu près prédéfinie comme une zone de danger potentiel. De plus, l'érosion due au ruissellement de surface est prise en compte en incluant la situation du terrain sur la rive. La situation du terrain est prise en compte en combinant les informations de pente du MNT avec le modèle "Vitesse maximale d'écoulement" (HQ100). L'imagerie satellitaire est inspectée, en combinaison avec la situation du terrain pour adapter manuellement la limite de la couche de danger. La mémoire tampon prédéfinie de 200 m est maintenue ou adaptée en fonction de la pente et de la vitesse d'écoulement. Dans les zones à fortes pentes et à vitesses d'écoulement maximales élevées, la zone à risque est élargie, tandis que dans les zones à faible pente et à vitesse d'écoulement maximale, la zone tampon de 200 m a été maintenue comme limite. Sur plusieurs sites, la zone de danger prédéfinie est adaptée et définie le long des routes principales ou d'autres caractéristiques dominantes.

[45] APAL (2011b), APAL (2009)

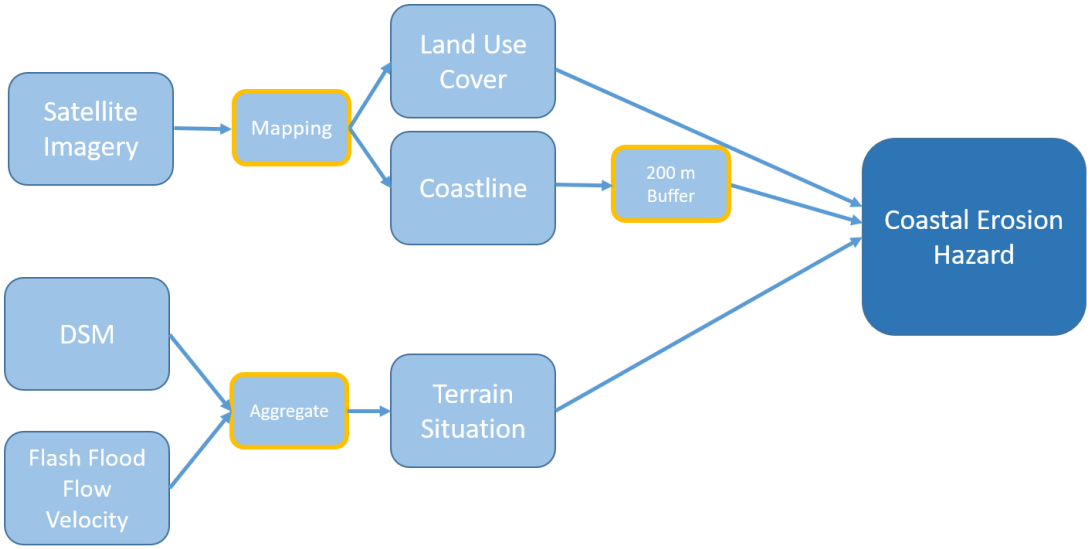


Figure 3: Analyse des risques liés au déroulement du travail

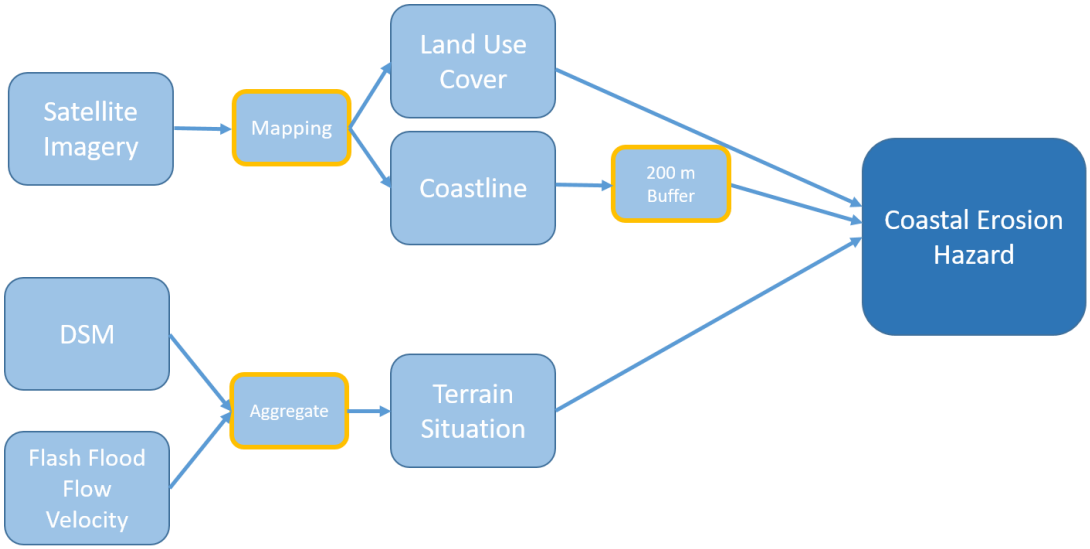


Figure 4: Analyse des risques liés au déroulement du travail

Dans l'étape suivante, l'utilisation du sol à l'intérieur de la zone à risque est classée en cinq catégories (figure 4). La classification se fait en étroite relation avec la cartographie de l'utilisation des terres créée précédemment (voir livrable "D1.2"). Chaque polygone CUS est classé en fonction de son état de

développement. L'exposition de chaque segment côtier est examinée et décrite en tenant compte des conditions du terrain, des classes CUS et de l'état de développement.

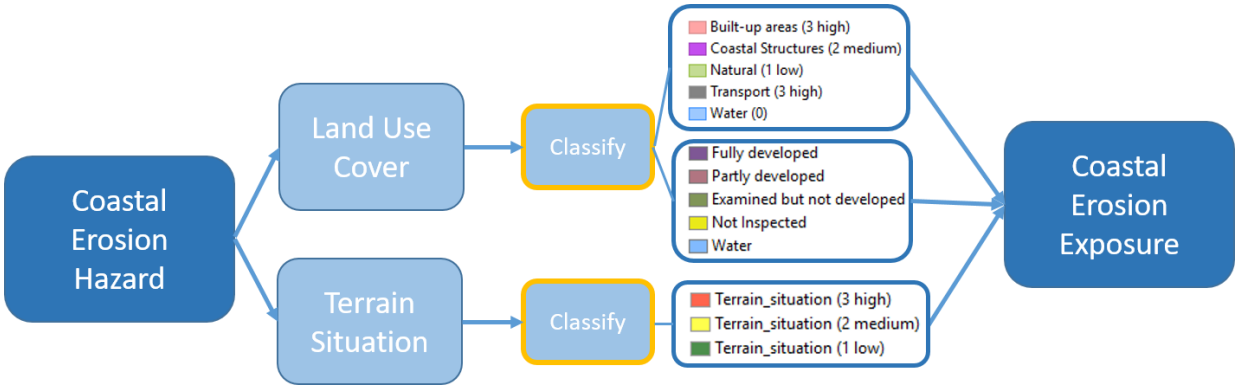


Figure 5: Analyse de l'exposition au flux de travail

Les résultats des analyses SIG sont ensuite combinés aux résultats des rapports des autorités locales comme la municipalité de Monastir et l'APAL. De plus, les résultats de l'enquête sur le terrain sont interprétés afin de bien comprendre les processus d'érosion côtière dans la zone d'étude et d'identifier les zones exposées.

4. Zone d'étude

Ce chapitre décrit la zone d'étude de Monastir. Une vue d'ensemble de la géographie ainsi que du contexte géologique, du climat et de l'hydrologie est donnée.

4.1 Géographie

La côte le long du golf de Hammamet est orientée NW-SE et suit un parcours très droit jusqu'à ce qu'elle soit brusquement interrompue par la presqu'île de Monastir. La ville est située sur un plateau qui s'incline à l'est et au sud-est. [46] La presqu'île de Monastir est située dans l'est de la Tunisie à environ 160 kilomètres au sud de la capitale Tunis. Elle couvre une superficie d'environ 1020 km2, soit 0,6% de la superficie du pays. [47]La ville a une population de 93 306 habitants (recensement de 2014). Elle est située à l'est de la Tunisie et jouxte la Méditerranée à l'est et à l'ouest et les municipalités de Sahline et Bembla au sud. La côte de Monastir s'étend sur 15 kilomètres et est limitée par l'oued Hamdoun au nord et l'oued Khniss au sud. La région est située sur un plateau, un Sebkha.[48] Le littoral de Monastir a une longueur totale d'environ 50 kilomètres. Il s'étend de l'estuaire de l'oued Sidi Abdlahmid dans le nord-ouest à Ras-Dimas dans le sud-ouest.[49]

[46] ARCHIPLAN (2017)
[47] ARCHIPLAN (2017)
[48] ARCHIPLAN (2017)
[49] APAL (2010)

4.2 Géologie

Sur le plan géologique, Monastir est situé dans une région relativement jeune. Le socle rocheux du plateau de Monastir est constitué d'une formation néogène qui est en même temps le matériau géologique le plus ancien de la région. La formation est composée d'argiles sableuses provenant du Miocène et de grès grossiers et de calcarénite remontant au Pliocène. Ils deviennent visibles en surface sur les bords ouest et nord du plateau de Monastir ainsi que sur l'oued Tefla. Sur l'ensemble du plateau, le substrat rocheux néogène est recouvert de dépôts marins du Quaternaire. La région de Khniss et de la Sahline est constituée d'un calcaire sablonneux qui est exploité dans des carrières.[50]

La péninsule de Monastir se caractérise par une alternance de plages de sable et de côtes rocheuses avec des sections de falaises abruptes entre les deux. [51] Les falaises se composent principalement de couches alternées de grès et d'argile du Pliocène. Dans certaines zones de falaises inférieures (2-4 m), les grès pliocènes et les matériaux quaternaires dominent. La zone présente généralement une topographie basse, interrompue par la roche mio-plio-quaternaire de Monastir et les collines thyréniques de Ksibet el Mediouni, ainsi que des zones effondrées autour du Sabkha de Sahline. La falaise la plus haute et la plus longue est située à l'ouest, près de l'île de Ghedamsi. Elle s'étend vers l'ouest jusqu'à l'ancienne embouchure de l'oued Melah. La hauteur de la falaise varie entre 5 et 20 mètres.

La zone autour de Monastir est sismiquement active, avec plusieurs lignes de faille actives, la plus importante étant celle de Skanès-Khniss (figure 5). Le monoclinal est orienté NE-SO et est visible en surface sur plusieurs kilomètres.

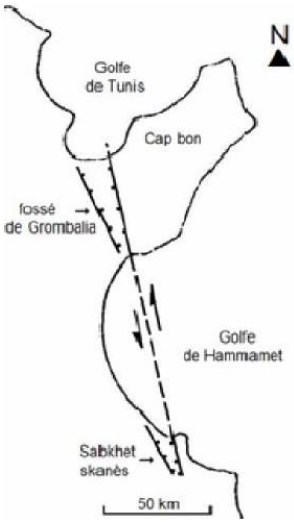


Figure 6: Localisation de la faille Skanès-Khniss et son extension au golf de Hammament et à la presqu'île du Cap Bon. [52]

La région de Monastir est située dans un "coin tectonique", ce qui entraîne une accumulation de pression. Cette situation entraîne une fréquence élevée de tremblements de terre dans la région.

[50] ARCHIPLAN (2017), APAL (2011a)
[51] ARCHIPLAN (2017), APAL (2011a)
[52] APAL (2011)

Cependant, l'intensité des séismes reste généralement modérée, dépassant rarement la magnitude 5 sur l'échelle de Mercalli. Par conséquent, elles ne sont pas très destructrices.[53] Depuis 1934, tous les séismes ont eu une magnitude de 5 ou moins sur l'échelle de Mercalli (figure 6). La magnitude moyenne de tous les tremblements de terre enregistrés entre 1934 et 2005 est de 3, 35. [54]

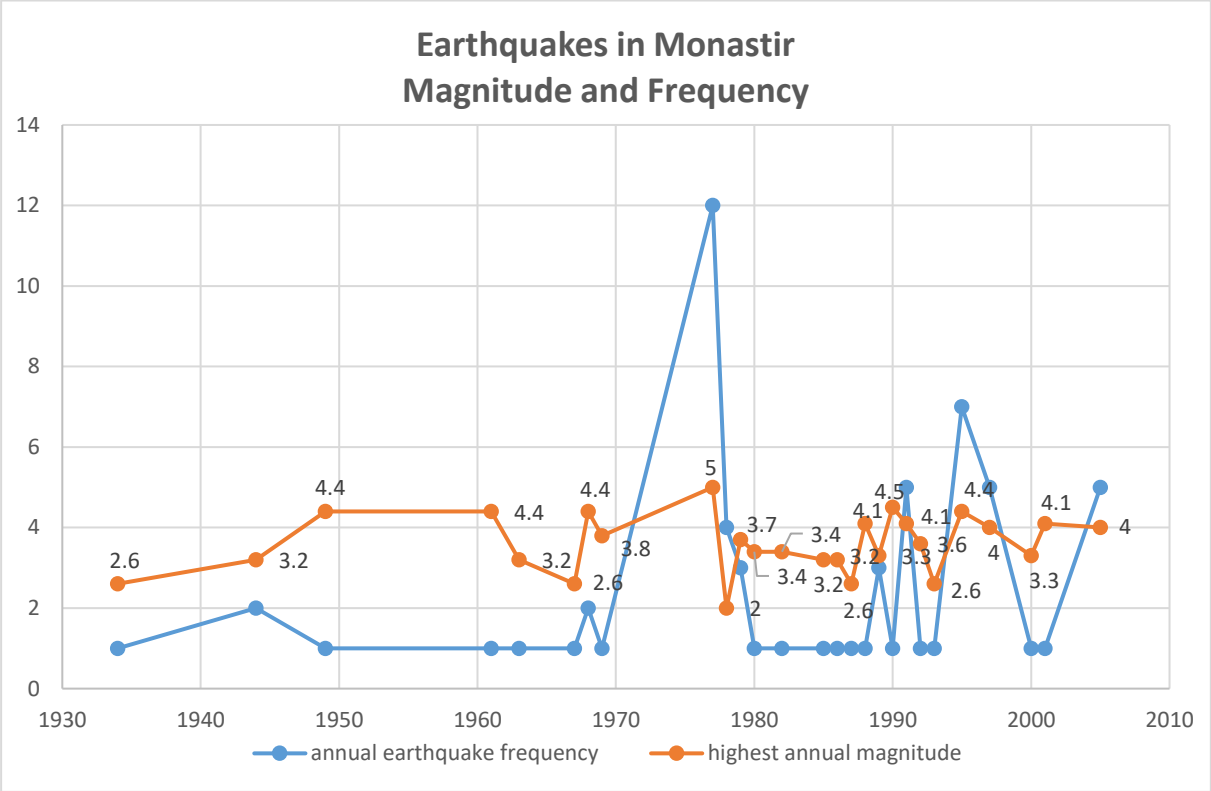


Figure 7: Ampleur et fréquence des tremblements de terre dans la région de Monastir (1930-2010) [55]

4.3 Climat

La ville est située dans une région semi-aride qui présente des hivers doux et pluvieux et des étés chauds et secs. Les précipitations annuelles moyennes sont d'environ 300 mm. Des précipitations brèves et intenses se produisent à l'échelle régionale. Ils présentent une grande variabilité intersaisonnière et interannuelle et se produisent à intervalles irréguliers.[56]

Les températures moyennes mensuelles à Monastir varient de 12,43°C en janvier à 27,86°C en juillet. Les précipitations mensuelles moyennes sont très faibles pendant les mois d'été avec des valeurs de 6,24 mm en juin et de 1,99 mm en juillet. Les mois de janvier (46,18 mm), septembre (45,23 mm) et octobre (61 mm) enregistrent les plus fortes précipitations annuelles. Les températures maximales

[53] APAL (2009)
[54] INM (2013)
[55] INM(2013)
[56] URAM (2003)

moyennes moyennes les plus élevées peuvent être observées en août (32,83°C) et en juillet (32,38°C). Les températures minimales moyennes mensuelles les plus basses se produisent pendant les mois de janvier (8,34 °C) et février (8,79 °C).[57]

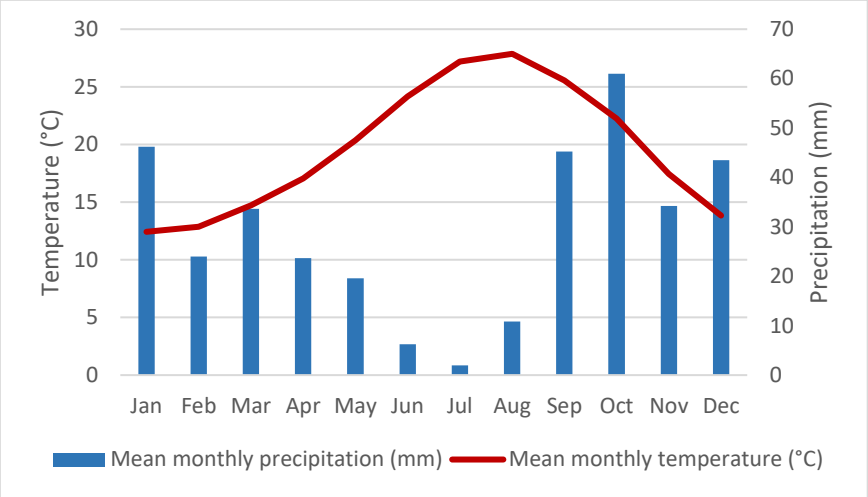


Figure 8: Climat de Monastir, Tunisie (Station climatique "Monastir-Skanès"

(Long: 10, 75, Lat: 35 667), données moyennes de 1981 à 2014) [58]

4.4 Hydrologie

Le réseau hydrographique de l'ensemble du gouvernorat de Monastir est constitué en grande partie de bassins endorhéiques. Le nord est divisé entre la zone de l'oued Sidi Abdlahmid et la zone de l'oued Maleh, qui se jette dans la sebkha de Sahline-Bembla, dont une grande partie est détournée artificiellement vers la baie de Monastir par le drain Khniss. Plus au sud, de grandes quantités d'eau s'écoulent dans la sebkha de Moknine.[59]

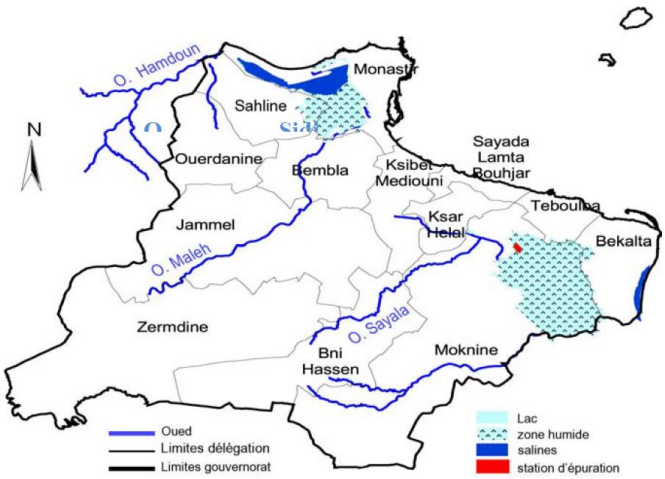


Figure 9: Réseau hydrographique du gouvernorat de Monastir

[57] INM (2014)
[58] INM (2014)
[59] APAL (2010)

5. Resultats et Discussion

Ce chapitre présente les résultats des analyses des dangers et de l'exposition concernant l'érosion côtière à Monastir. Les résultats des analyses SIG (3.2) sont présentés. Ces informations sont liées aux résultats de l'enquête bibliographique afin de mieux comprendre la situation passée sur la côte de Monastir. Le développement des zones côtières de Monastir est illustré et les mesures d'adaptation mises en œuvre sont examinées. De plus, les résultats d'une visite sur le terrain, effectuée le 16 mai 2018, sont inclus dans l'analyse pour démontrer la situation locale actuelle et identifier les zones à rique actuels.

5.1 L'érosion côtière à Monastir

Dans le passé, les autorités tunisiennes et les experts locaux ont mené plusieurs enquêtes afin d'analyser les processus d'érosion sur la côte de Monastir, d'identifier les zones à risques et de planifier des mesures de protection pour la zone côtière. Le chapitre suivant résume les résultats des études locales et présente les mesures de protection mises en œuvre et prévues.

En raison des diverses caractéristiques du site (chapitre 4), la côte de Monastir est sensible aux processus d'érosion. Les principaux facteurs qui influencent les taux d'érosion côtière dans la région sont :

- Géologie
- Sismicité
- Vagues et vents
- Ruissellement de surface

La côte est composée de roches tendres de différentes résistances géologiques. La base des falaises est constamment attaquée par la mer, ce qui entraîne la formation d'entailles creusées par les vagues. Ce processus entraîne l'érosion des chutes de roches de la formation et l'effondrement de la paroi de la falaise. Les falaises côtières sont en outre sensibles à l'érosion pendant les épisodes de précipitations de forte intensité. Par le ruissellement de surface, l'eau peut s'infiltrer dans les falaises par les fissures et les fissures des falaises. Cela entraîne la formation de réservoirs humides à l'intérieur de la falaise, ce qui diminue la stabilité de la pente. La lithologie de plusieurs parties du rivage est caractérisée par une forte teneur en argile (4.2) qui a généralement une faible perméabilité à l'eau. Cependant, à mesure que la pression hydrostatique s'accumule dans les réservoirs, l'eau pénètre dans les pores de l'argile. Comme l'argile a une capacité de gonflement élevée sous l'influence de l'eau, l'argile gonfle et se dilate. Par conséquent, les couches inférieures de la falaise deviennent instables. Cet effet conduit à de profonds morceaux de falaise qui glissent ou se brisent dans l'océan. [60] La situation qui vient d'être décrite illustre les processus naturels qui dominent la zone côtière. Ces processus sont constamment influencés et altérés par les changements anthropiques sur le littoral, qui sont décrits plus en détail ci-après.

[60] APAL (2011)

5.2 Partie 1

La partie 1 de la zone d'étude a une longueur d'environ 800 mètres (figure 9). Il est dominé par des pentes abruptes, mais présente également des pentes douces à l'est. La zone côtière est presque entièrement couverte par des mesures de protection. Une protection longitudinale sous la forme d'enrochements a été installée. Directement derrière ces structures, une route longe la côte. Sur la pente derrière la route, le drainage des eaux de ruissellement de surface a été assuré par l'installation de canaux de drainage menant du haut de la pente vers l'océan. [61]De plus, les pentes ont été recouvertes de terre et la végétation a été plantée pour prévenir l'érosion de surface. La partie est est est dominée par des zones bâties. En raison de ses fortes pentes, la zone est généralement affectée par les risques d'érosion côtière, mais les mesures de protection le long de la côte ont considérablement réduit l'exposition de la zone. La route derrière les enrochements ainsi que la zone bâtie sont identifiées comme les objets exposés les plus pertinents.

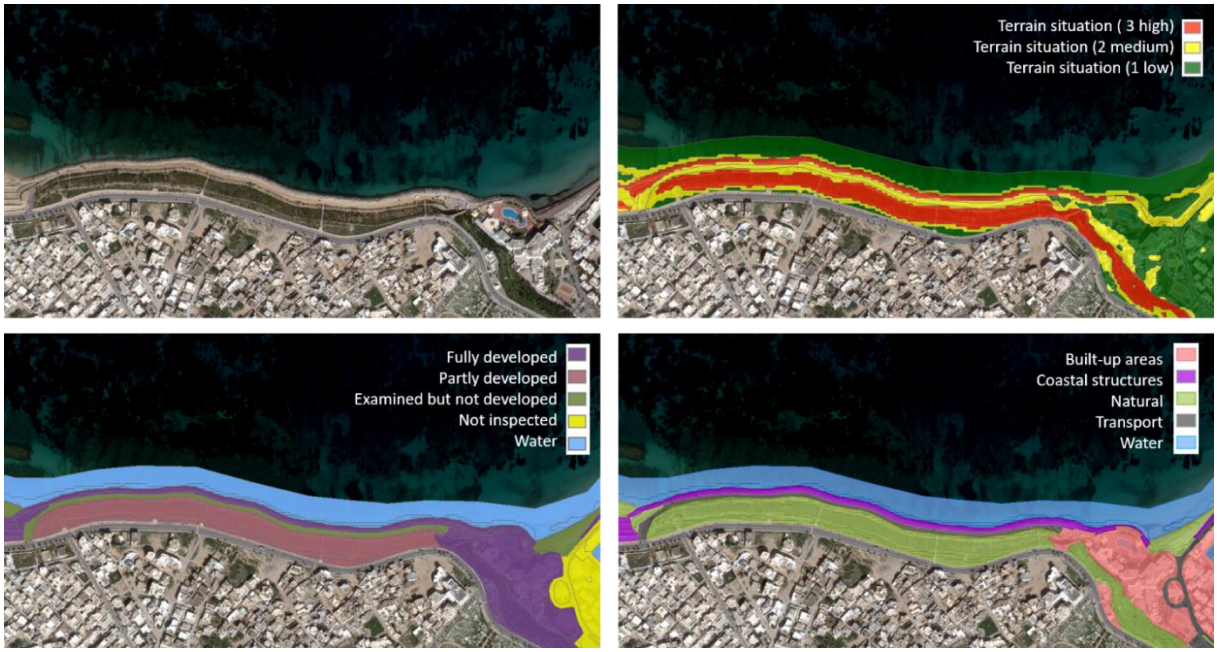


Figure 10: Analyse de l'exposition, partie 1

5.3 Partie 2

La partie 2 de la zone d'étude (figure 10) est également dominée par un terrain escarpé avec des pentes plus douces à l'est. L'ensemble de la section a été entièrement développé en termes de mesures de protection.

[61] APAL (2010)

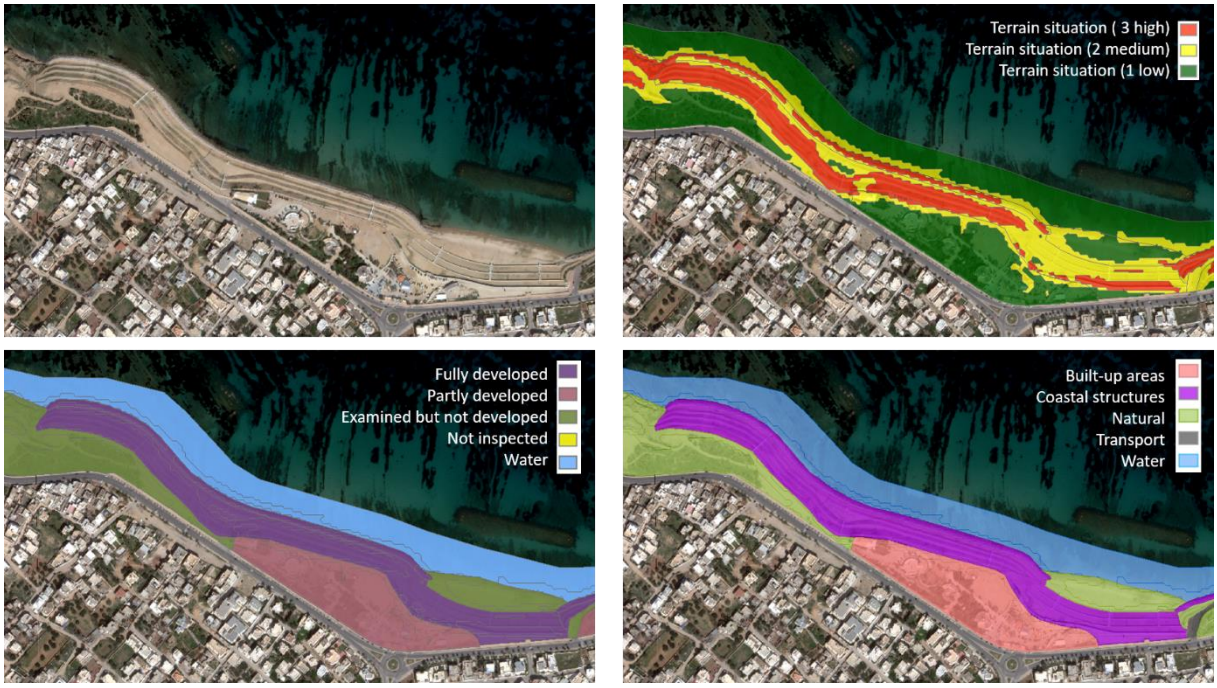


Figure 11: Analyse de l'exposition, partie 2

In Dans la partie est, on a installé des digues avec des canaux de drainage ainsi que des brise-lames en promontoire (figure 11.1). Dans la partie ouest, des enrochements en combinaison avec des canaux de drainage verticaux et horizontaux ont été construits (figure 11.2, figure 11.3). La municipalité confirme que, dans cette zone, l'érosion précédente a été réduite grâce aux mesures mises en œuvre.

Figure 12: Partie 2 -1) Murs Marin 2) Rip Raps 3) Caniveaux de drainage

Même si des mesures de protection ont été mises en œuvre dans la partie 2, les processus d'érosion affectent la zone. Les pentes de la partie 2 sont constituées de matériaux non consolidés et n'ont pas de couverture végétale (figure 12.1). Le matériau déposé artificiellement est donc très sensible à l'érosion par ruissellement de surface (figure 12.2). Les débris qui s'érodent des pentes obstruent les canaux qui ont été construits pour drainer l'eau. Par conséquent, la capacité du chenal à canaliser l'eau en cas de pluies intenses est considérablement diminuée.

Figure 13: Partie 2 - 1) Érosion des collines due à l'absence de couverture végétale 2) Blocage des canaux de drainage par accumulation de débris et croissance de la vegetation

5.4 Partie 3

La figure 13 montre la troisième section côtière, qui couvre plus de 30 hectares et présente un terrain escarpé. La morphologie du littoral est dominée par des falaises de 5 à 20 mètres. Cette zone illustre les processus côtiers naturels qui ont lieu le long de la côte en l'absence de structures de protection. Les falaises ne sont actuellement pas aménagées et sont sujettes à divers processus de dégradation. Les pentes de la région sont instables et se sont effondrées à plusieurs endroits. Des glissements de terrain se sont produits à un certain nombre d'endroits. Des ravins profonds traversent les pentes, qui sont parfois canalisés par des ouvrages de drainage. De petites étendues de plages sablonneuses sont situées sur les rives, qui ont été soumises à une érosion accélérée par le passé. La seule mesure de protection qui a été prise concerne deux épis qui ont été installés dans la partie sud-est du segment. Entre les deux structures, une plage de sable s'est formée.

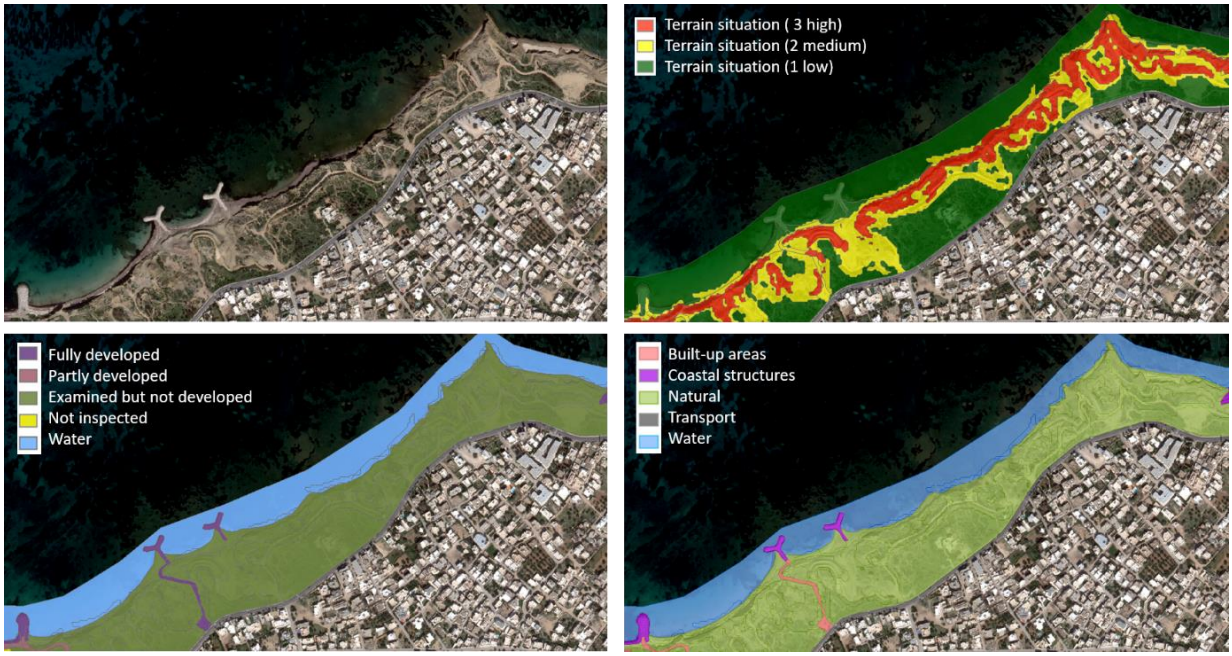


Figure 14: Analyse de l'exposition, partie 3

En général, la partie 3 est très exposée à l'érosion côtière. La municipalité prévoit actuellement d'installer des mesures de protection le long de ce segment afin de stabiliser les falaises et de prévenir d'autres dommages causés par l'érosion côtière et de surface. Les débits d'eau provenant de bassins versants externes seront interceptés au niveau de la route côtière. L'eau sera ensuite acheminée par des tuyaux de drainage souterrains, puis rejetée dans l'océan. L'interception de tous les débits des bassins versants externes au niveau de la route existante permettra le drainage de toutes les eaux arrivant à ces points. L'écoulement sera ensuite dirigé à travers des canaux et drainé dans l'océan.

5.5 Partie 4

Le long de la frange côtière, située entre l'hôtel Skanes Serail et l'ancien palais présidentiel (partie 4), la plage de sable au niveau du palais est protégée par trois digues construites en 1967 (figure 14). Les brise-lames offrent une protection contre les vagues et ont entraîné une accumulation de sédiments dans la région. À l'ouest de l'ancien palais présidentiel un autre brise-lames a protégé le rivage et a également permis à une accumulation de matériel. 62 La partie 4 est caractérisée par un terrain peu profond et des pentes douces le long de la côte. La région est dominée par une zone bâtie qui est protégée par des enrochements qui recouvrent le rivage. La zone est fortement touchée par le danger

[62] APAL (2010)

en raison de son terrain peu profond, mais son exposition est réduite en raison des mesures de protection installées.

Figure 15: Analyse de l'exposition, partie 4

5.6 Partie 5

La partie 5 (figure 15) comprend la zone touristique avec plusieurs complexes hôteliers le long de la côte. Une comparaison du trait de côte entre 1925 et 1988 dans le secteur ouest de la baie de Dhikla (partie 5) montre une tendance à l'érosion, commençant à l'embouchure de l'oued Hamdoun et s'étendant sur 8 kilomètres. Le taux d'érosion moyen se situe entre 0,48 et 1,24 m/an et est influencé par les crues du Nord et du Nord-Est. Le recul des rives a été moins important dans les parties est de la baie, avec des taux d'érosion allant de 0,11 m/an à 0,86 m/an. Dans la zone autour du fond de la baie Dkhila, les rives s'accréditent, car elles sont alimentées en sédiments par les dérives Nord-Sud et Est-Ouest des côtes adjacentes. Les taux de désactualisation se situent entre 0,31 et 0,84 m/an.[63] Cette zone fortement exposée n'était pas développée jusqu'au début des années 1960, au début de l'activité touristique. La situation naturelle est caractérisée par quatre zones qui mènent à l'intérieur des terres à partir du rivage. La plage sablonneuse est suivie de la zone dunaire, suivie d'un chott puis d'un sebkha. La plage avait une largeur variant entre 20 et 90 mètres. Le développement de la zone touristique de Skanès a entraîné une réduction drastique de la largeur des plages et la disparition quasi totale des dunes en plusieurs endroits. Le chott est caractérisé par une topographie basse avec des sols boueux et la présence de plantes halophiles. Le vaste Sebkha de Skanès est fortement influencé par le climat. Bien qu'il soit inondé pendant la saison des pluies, sa taille est considérablement réduite pendant l'été. Aujourd'hui, cette frange côtière a perdu sa morphologie d'origine en raison d'une urbanisation intense. Depuis la construction de l'aéroport de Monastir-Skanès en 1968, une quarantaine de complexes hôteliers ont été construits et de nombreuses lignes de circulation, comme des routes et des voies ferrées ont été créées. De nombreux complexes hôteliers ont été construits tout le long de la côte, plusieurs bâtiments étant situés à moins d'un mètre du rivage. Des terrasses et

[63] ARCHIPLAN (2017)

des bars ont été construits sur d'anciennes dunes. L'APAL a calculé la largeur moyenne des plages de la région à moins de 15 mètres. [64] Ces développements ont entraîné un affaiblissement du bilan sédimentaire dans une grande partie de la côte de la région. [65]

Entre 1988 et 2000, les taux d'érosion et d'accrétion ont augmenté. L'érosion s'est intensifiée le long des côtes de la partie ouest de la baie, avec des taux compris entre 0,43 et 2,30 m/an. La sédimentation au fond de la baie Dkhila s'est accélérée là où l'on observe une avancée du rivage de 0,46 m/an à 1,54 m/an. L'érosion accrue dans le secteur ouest peut être liée à l'extension de la zone bâtie dans la région. Dans la partie orientale de la baie de Dkhila, caractérisée par une côte ondulée, alternant petites baies et calottes, la tendance évolutive s'inverse par rapport à la période 1925-1988. Le rivage avance dans les baies et derrière les brise-lames Skanès, où il recule le long des capes.

La comparaison du trait de côte entre 2000 et 2016 indique un léger ralentissement de l'érosion côtière dans le secteur ouest. Le taux de recul entre 0,43 et 2,3 m/an entre 1988 et 1996 diminue entre 1996 et 2001, les valeurs variant entre 0,32 et 2,06 m/an. Cependant, le fond de la baie continue d'avancer mais à une vitesse plus élevée : 0,46 à 1,54 m/an, pour la période 1988-1996 et 1 à 4,5 m/an entre 2000 et 2016.[66]

Figure 16: Analyse de l'exposition, partie 5

Sur plusieurs sites, des mesures ont été prises pour protéger les zones hôtelières (Figure 16.1). Actuellement, cependant, plusieurs structures touristiques sont situées très près du rivage et ne sont pas bien protégées. En conséquence, ces zones sont fortement exposées à l'érosion côtière. En divers endroits, des structures comme des terrasses et des barres ont été endommagées par l'eau (figure 16.2) et sont très exposées (figure 16.3, figure 16.4).

Le Domaine Public Maritime (DPM) est un règlement de l'APAL qui définit que la construction de bâtiments est interdite à moins de 25 mètres du littoral. Malgré la réglementation, plusieurs structures ont été construites, ce qui démontre la nécessité d'une meilleure application de la loi afin d'assurer la conformité avec la DPM.

[64] APAL (2010)
[65] APAL (2010)
[66] ARCHIPLAN (2017)

Figure 17: Processus d'érosion - Zone touristique 1) digues 2)-4) Infrastructure touchée

5.7 Partie 6

Dans le secteur nord-est de la côte, les falaises sont caractérisées par une alternance de couches d'argile et de grès (figure 17). Malgré un certain degré de protection à travers les îles voisines et les eaux peu profondes, l'érosion côtière a un effet sur la zone. La zone est caractérisée par des matériaux affaissés et des arbres renversés en raison de la dissection causée par les forces des vagues. Les routes qui longent la côte au sud de la partie 6 ont été déplacées à l'intérieur des terres plusieurs fois dans le passé.[67]

[67] APAL (2011)

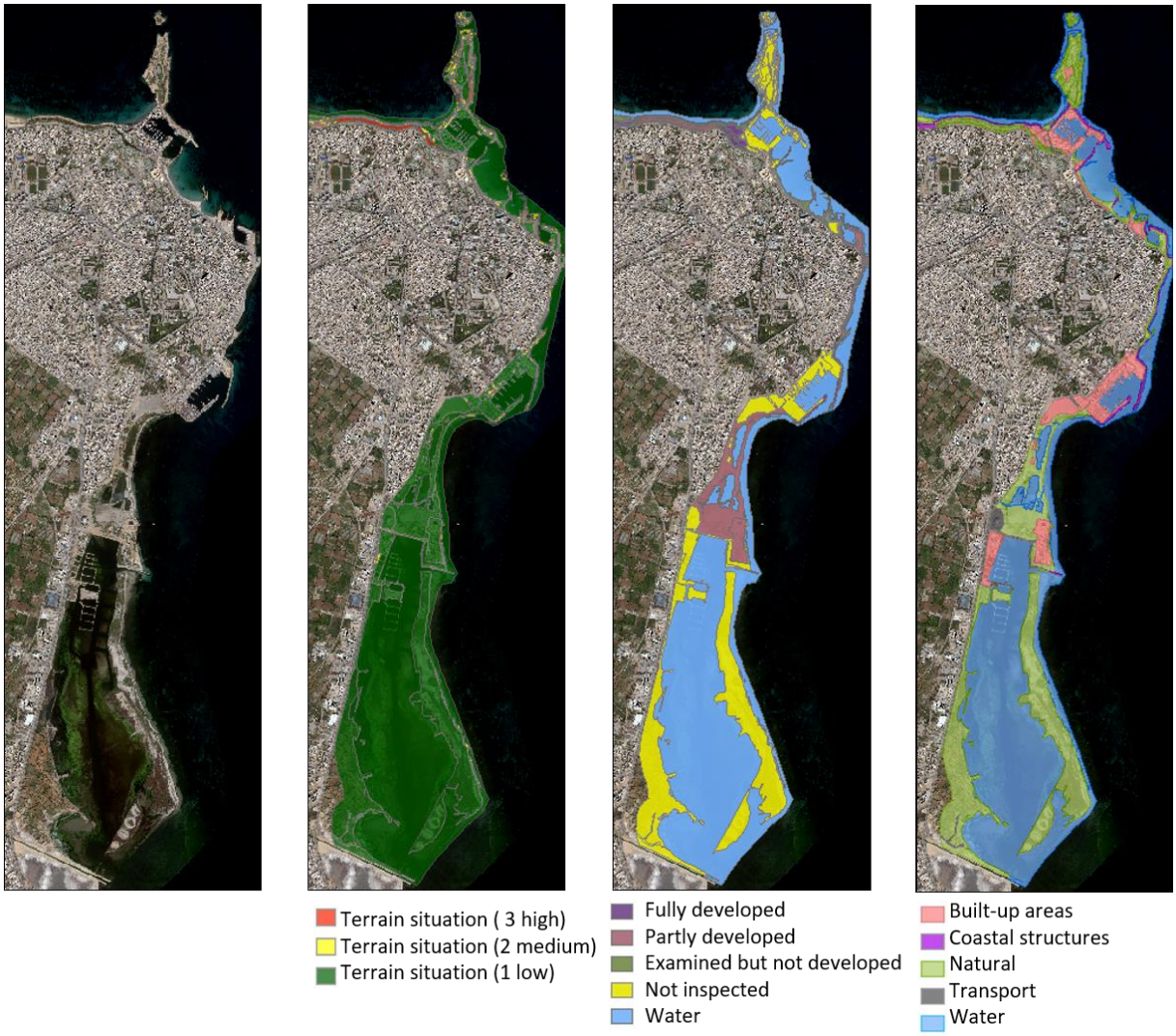


Figure 18: Analyse de l'exposition, partie 6

Plusieurs segments de la côte Est de Monastir (partie 6) sont protégés par des enrochements, comme le montre la figure 18.

Figure 19: Ripraps de la partie 6

5.8 Ruissellement de surface

Lors d'événements pluvieux, le ruissellement de surface devient le principal facteur d'érosion et a un impact majeur sur l'érosion des falaises de la côte de Monastir. Le ruissellement superficiel est divisé en deux types. Tout d'abord, le ruissellement superficiel qui vient de l'au-delà de la rue qui longe la côte. Le deuxième type de ruissellement est celui qui se produit entre ladite route et l'océan[68].

Une quantité importante d'eau provient d'une contribution externe à travers les bassins versants de la région. (Figure 19). Cette région extérieure couvre une superficie d'environ 120 hectares répartis sur 12 bassins versants.

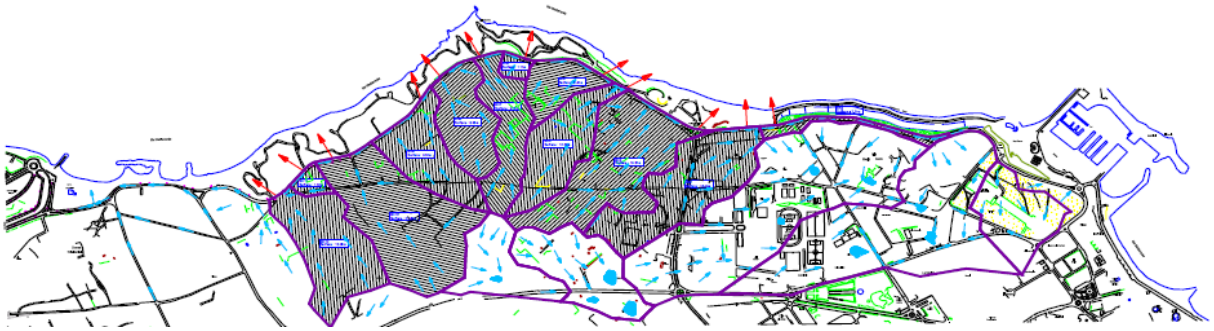


Figure 20: Limite des bassins versants s'étendant vers la côte

Le drainage de l'eau est assuré par des ravins et des ouvertures dans les bordures des trottoirs, permettant une canalisation de l'eau vers les falaises. L'eau est transportée vers la falaise par des canaux et des tuyaux. Cependant, à la falaise elle-même, il n'y a souvent pas de système de drainage adéquat pour canaliser l'eau vers l'océan. Ce manque de développement adéquat en aval des ouvrages de drainage primaire entraîne d'importants emportements et des effondrements subséquents à

[68] APAL (2009)

plusieurs endroits des falaises. En raison de l'absence d'un système secondaire, il n'y a pas de continuité des flux superficiels vers la mer. En conséquence, des ruisseaux et des ravins naturels se sont formés, ce qui a un effet négatif sur la stabilité de la falaise. Cette situation est particulièrement évidente dans la partie 3 de la zone d'étude.

En plus des apports externes susmentionnés, la falaise est également touchée par l'afflux d'eau provenant des systèmes de drainage interne (figure 20). Ils couvrent une superficie totale d'environ 30 hectares et sont subdivisés en 38 bassins élémentaires. Chaque bassin comprend plusieurs petits cours d'eau qui contribuent à des degrés divers à la situation sur le site.

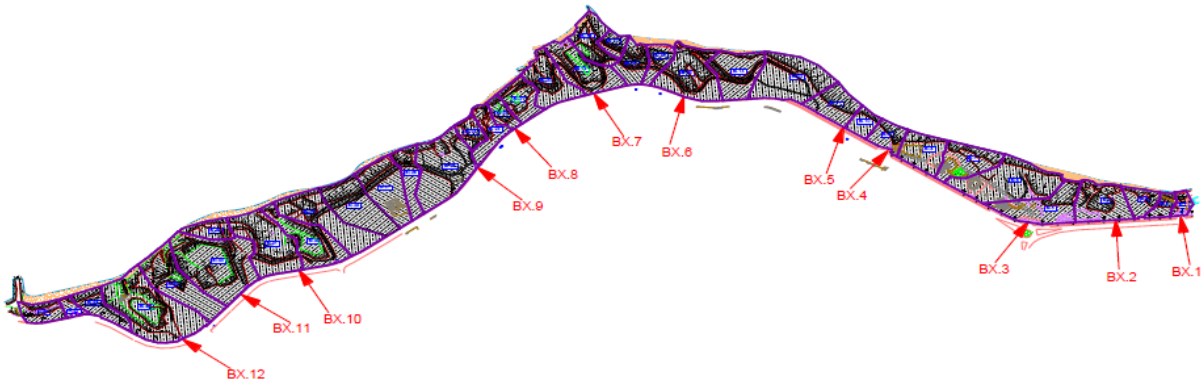


Figure 21: Direction des canaux de drainage internes vers la côte

6. Conclusions et perspectives

Au cours de l'élaboration du rapport, un examen des risques d'érosion côtière à Monastir a été effectué. Une analyse documentaire d'études locales a révélé que le rivage de Monastir est fortement affecté par l'érosion. Les principaux types de processus impliquent l'érosion marine par les vagues et les ondes de tempête, ainsi que le ruissellement de surface lors de précipitations de forte intensité. Les taux d'érosion sont sujets à des variations spatiales et temporelles. Les activités touristiques se sont développées et développées depuis les années 1960 et ont permis d'améliorer les activités de construction dans la région. Avec l'accélération du développement du littoral, de plus en plus de régions sont devenues de plus en plus exposées à l'érosion côtière. Les changements anthropiques ont en outre provoqué une altération des processus naturels.

Ces développements ont fait apparaître la nécessité de mesures d'adaptation. En réponse à l'érosion des plages de sable, aux chutes de pierres dans les falaises et à d'autres processus d'érosion, des mesures de protection ont été mises en place le long de la côte. "Les mesures " dures " comme les enrochements et les épis constituent une barrière contre les forces du vent et des vagues. Les canaux de drainage préviennent l'érosion de surface lors de pluies de forte intensité. En outre, des mesures "douces" comme la plantation de végétation sur les pentes le long de la côte assurent une plus grande stabilité à la zone côtière de Monastir.

Néanmoins, d'autres mesures doivent être prises afin de prévenir les dommages causés par les processus d'érosion. Le littoral a été protégé dans les parties 1 et 2. La partie 3 n'est pas encore élaborée, mais un projet de mise en œuvre de mesures d'adaptation est déjà en cours. En outre, l'APAL

mène actuellement des études pour évaluer l'état actuel des plages de la partie 5 afin de planifier les actions futures.

Les zones actuellement non protégées doivent faire l'objet d'un examen plus approfondi en ce qui concerne leur exposition aux risques d'érosion et leur exposition. En particulier, les parties 5 et 6 doivent faire l'objet d'une inspection plus approfondie afin de s'assurer de l'efficacité des mesures de protection actuelles et d'examiner les zones qui n'ont pas été développées en ce qui concerne leur exposition à l'érosion côtière.

Les infrastructures de protection existantes doivent être surveillées et entretenues pour garantir le bon fonctionnement des mesures mises en œuvre. Même si des mesures de protection ont été prises dans la partie 2, leur efficacité est considérablement réduite, car l'absence de couverture végétale sur les pentes entraîne l'érosion des sols.

Pour la planification future, le changement climatique et ses effets sur l'environnement côtier doivent être pris en compte. Avec l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des tempêtes, les côtes de Tunisie et de Monastir en particulier seront exposées à une nouvelle augmentation de l'érosion côtière.

Références

Anfuso, G., Martinez, J., & Nachite, D. (2010). Coastal vulnerability in the Mediterranean sector between Fnideq and M'diq (North of Morocco).

APAL. (2009). *Etude de protection de la 2ème tranche de la falaise de Monastir*.

APAL. (2010). *Expertise et elaboration des termes de references relative à l'erosion côtière du littoral de Monastir*.

APAL. (2011). *Etude de la frange littorale de Monastir Strategie de Rehabilitation*.

ARCHIPLAN. (2017). *Rapport de presentation du Plan d'Aménagement Urbain de la Commune de Monastir*.

Beatley, T., Brower, D. J., & Schwab, A. K. (2002). *An introduction to coastal zone management* (2nd ed.). Washington, D.C.: Island ; London : Kogan Page.

Bruun, P. (1962). Sea-level rise as a cause of shore erosion. *Journal of the Waterways and Harbors Division, 88*(1), 117-132.

Chadwick, A., Morfett, J., & Borthwick, M. (2013). *Hydraulics in civil and environmental engineering*: Crc Press.

Change, A. D. o. C. (2009). *Climate change risks to Australia's coast: a first pass national assessment*.

Church, J. A., Clark, P. U., Cazenave, A., Gregory, J. M., Jevrejeva, S., Levermann, A., Unnikrishnan, A. S. (2013). *Sea Level Change*. Retrieved from Cambridge, UK, New York, NY:

Dasgupta, S., & Meisner, C. (2009). Climate change and sea level rise: A review of the scientific evidence.

Gutierrez, B. T., Plant, N. G., & Thieler, E. R. (2011). A Bayesian network to predict coastal vulnerability to sea level rise. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 116* (F2), 2156-2202.

Hinkel, J., Vafeidis, A. T., Lincke, D., & Wolff, C. (2015). *Assessment of Costs of Sea-Level Rise in the Republic of Tunisia Including Costs and Benefits of Adaption*.

INM. (2013). Activité sismique. Retrieved from http://www.meteo.tn/htmlfr/donnees/seismes2.php

INM. (2014). Operational Data Services. Retrieved from http://www.meteo.tn/htmlen/donnees/LRF.php

Klein, R. J. T., & Nicholls, R. J. (1998). Coastal Zones. In J. F. Feenstra, I. Burton, J. B. Smith, & R. S. J. Tol (Eds.), *Handbook on Methods on Climate Change Impact Assessment and Adaptment Strategies*.

Lenton, T., Footitt, A., & Dlugolecki, A. (2009). *Major tipping points in the earth's climate system and consequences for the insurance sector*: World Wide Fund for Nature.

Linham, M. M., & Nicholls, R. J. (2010). Technologies for Climate Change Adaptation.

McLaughlin, S., McKenna, J., & Cooper, J. (2002). Socio-economic data in coastal vulnerability indices: constraints and opportunities. *Journal of Coastal Research, 36*(1), 487-497.

Niang, I., Ruppel, O. C., Abdrabo, M. A., Essel, A., Lennard, C., J, P., & Urquhart, P. (2014). *Africa*.

Nicholls, R., Cooper, N., & Townend, I. H. (2007). The management of coastal flooding and erosion, In: Thorne CR, et al (Eds.), Future Flood and Coastal Erosion Risks.

Oueslati, A. (2010). Plages et urbanisation en Tunisie: des avatarsde l'expérience du xxe siècle aux incertitudesde l'avenir. *Méditerranée. Revue géographique des pays méditerranéens*(115), 103-116.

Rhein, M., Rintoul, S. R., Aoki, S., Campos, E., Chambers, D., Feely, R. A., . . . Wang, F. (2013). *Observations: Ocean*. Retrieved from Cambridge, UK , New York, NY:

Snoussi, M., Ouchani, T., Khouakhi, A., & Niang-Diop, I. (2009). Impacts of sea-level rise on the Moroccan coastal zone: Quantifying coastal erosion and flooding in the Tangier Bay. *Geomorphology, 107*(1-2), 32-40.

URAM. (2003). *Plan d'occupation de la plage de Monastir. L'etude du pop de Monastir.*

Van Rijn, L. (2011). Coastal erosion and control. *Ocean & Coastal Management, 54*(12), 867-887.

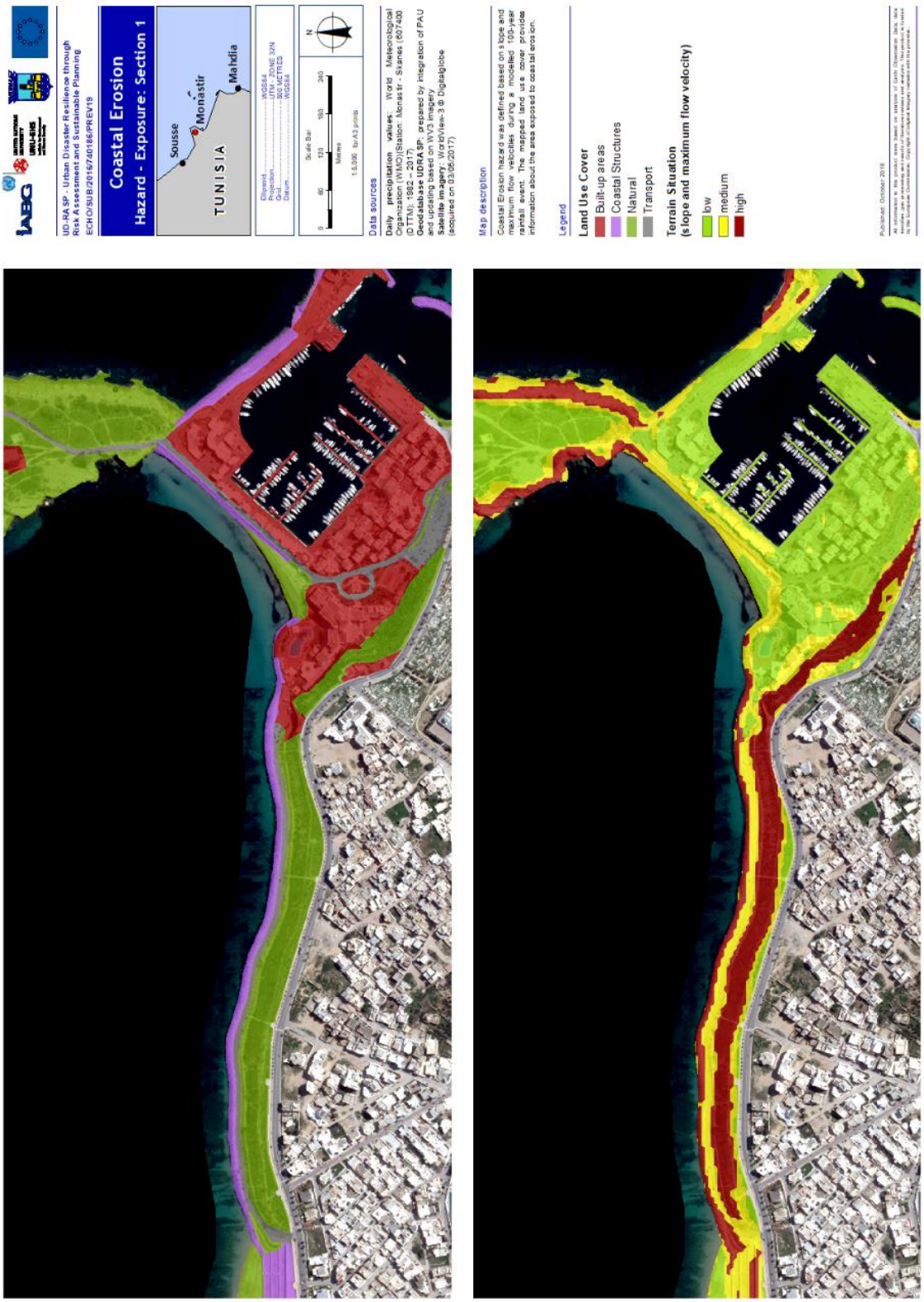
Wong, P. P., Losada, I. J., Gattuso, J.-P., Hinkel, J., Khattabi, A., McInnes, K. L., Sallenger, A. (2014). *Coastal systems and low-lying areas*. Retrieved from Cambridge, UK, New York, NY:

Woolfe, M. (2017). *7. Coastal Erosion Hazard and Risk Assessment*.

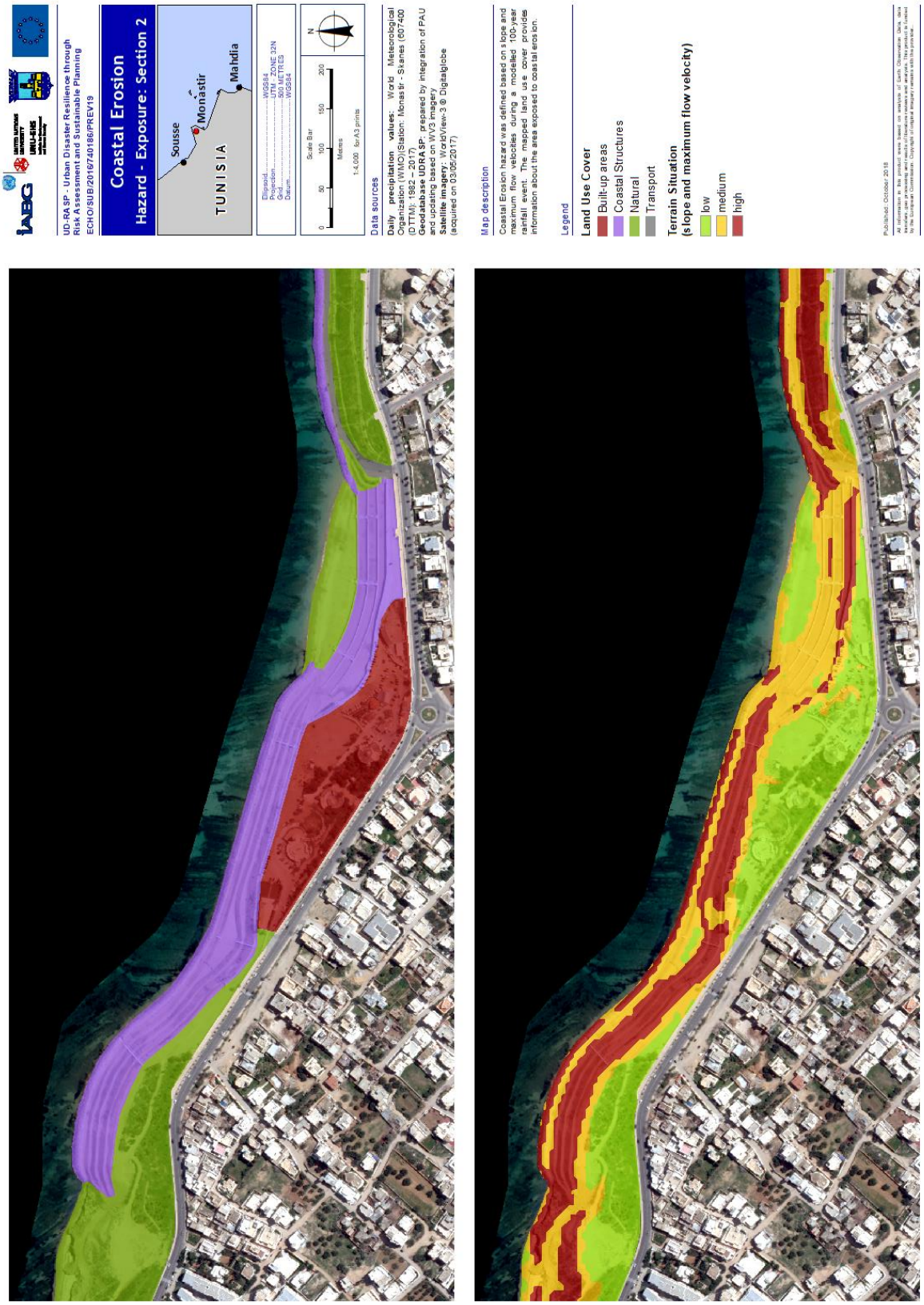
Woth, K., Weisse, R., & Von Storch, H. (2006). Climate change and North Sea storm surge extremes: an ensemble study of storm surge extremes expected in a changed climate projected by four different regional climate models. *Ocean Dynamics, 56*(1), 3-15.

Özyurt, G., & Ergin, A. (2009). Application of sea level rise vulnerability assessment model to selected coastal areas of Turkey. *Journal of Coastal Research*, 248-251.

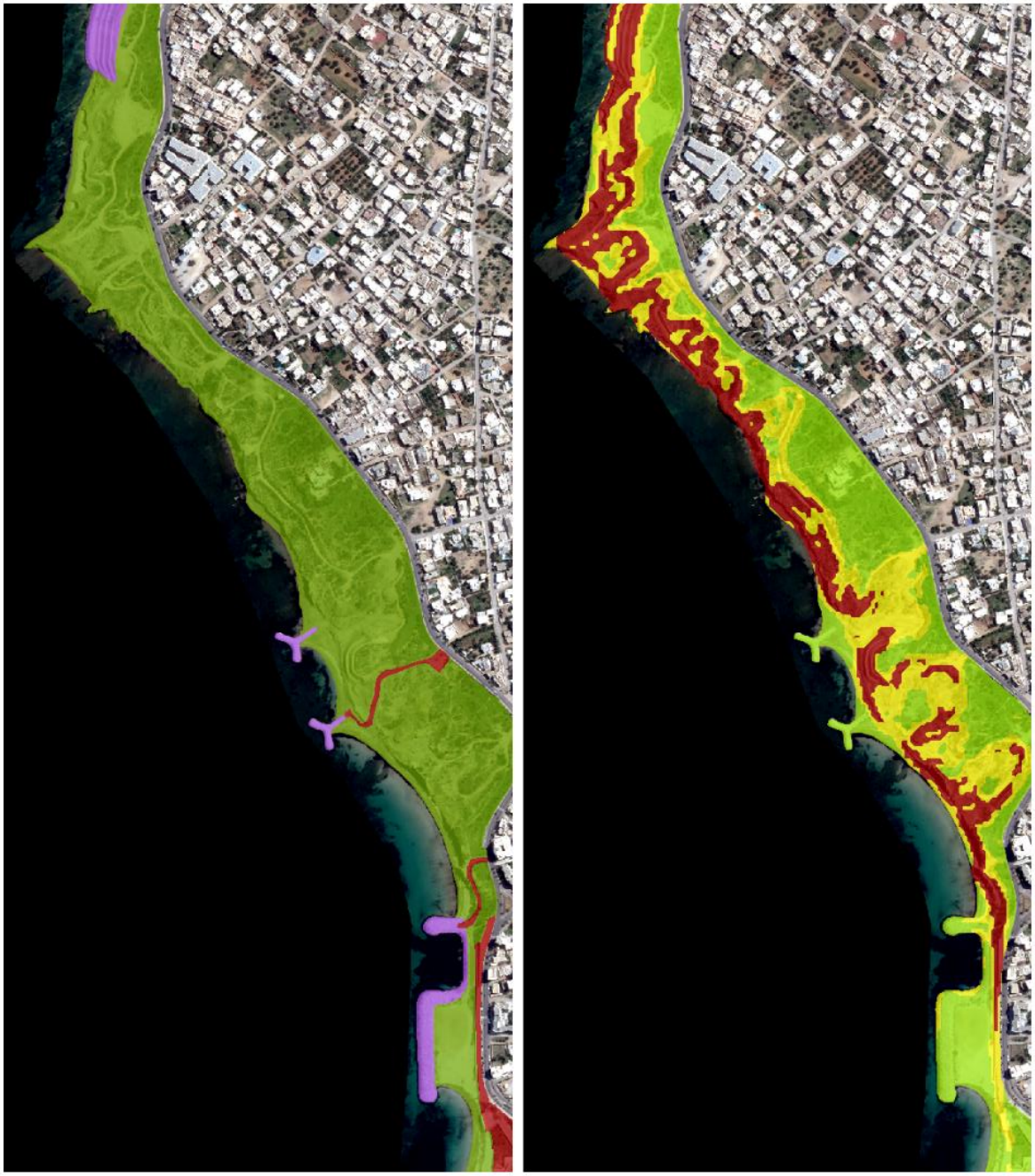
Annex – Cartes “Coastal Erosion”



D2.2/D3.3 – Erosion côtière à Monastir

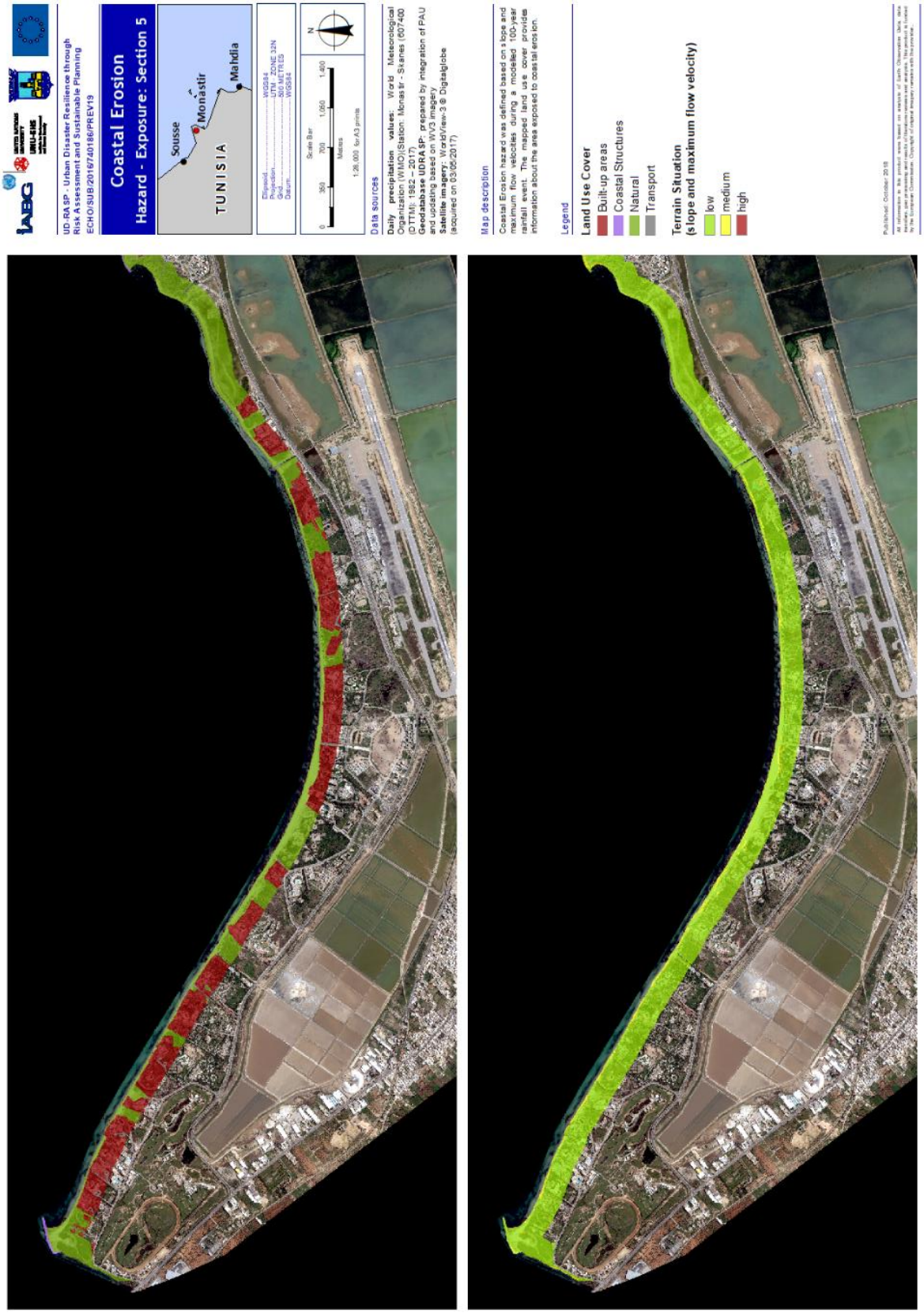
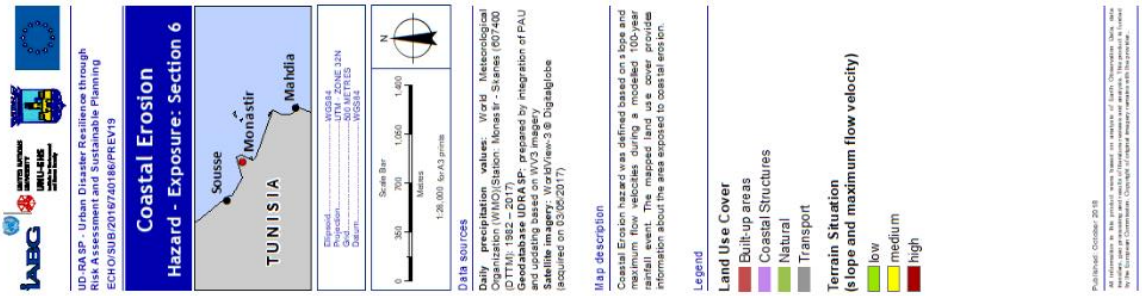


D2.2/D3.3 – Erosion côtière à Monastir



D2.2/D3.3 – Erosion côtière à Monastir

D2.2/D3.3 – Erosion côtière à Monastir



D2.2/D3.3 – Erosion côtière à Monastir