



ides



# Outils et indicateurs croisés multi-Satellites et Socio-économiques pour le suivi des aléas et risques des environnements littoraux et renforcer leur résilience face au changement climatique

*OSS Saint Louis (Sénégal)  
Rapport final*

Septembre 2023

## Introduction

Le Sénégal fait partie des 25 pays qui verront leur population augmenter dans la zone côtière de 50 % d'ici à 2060 (Neumann et al., 2015). Cette augmentation de la population entraînera une pression supplémentaire sur l'environnement côtier en raison des activités économiques et touristiques. Cet impact supplémentaire doit être anticipé en raison (i) des projections actuelles du changement climatique comme l'élévation du niveau de la mer (SLR) qui augmentera probablement de 50cm à 1m d'ici la fin de ce siècle (Nicholls et al., 2014) et (ii) des tempêtes dont l'intensité et la fréquence devraient augmenter (Emanuel, 2005). La combinaison de ces facteurs va augmenter de manière significative le risque d'inondation et d'érosion côtière (Benveniste et al., 2019) en particulier dans les zones de plus faibles altitudes.

Ce sujet est particulièrement prégnant pour la ville de Saint-Louis (Nord du Sénégal, Fig. 1), qui a une importance culturelle et historique unique et qui est inscrite au patrimoine mondial de l'UNESCO. Ce site est situé dans un environnement deltaïque côtier (Fig. 1), ce qui la rend particulièrement vulnérable aux impacts des tempêtes, inondations (Delbour et al., 2019 ; UN, 2017) et à l'érosion du trait de côte (Ndour et al., 2018 ; Bergsma et al., 2020 ; Taveneau et al., 2021). En 2003, une tempête a eu des effets significatifs sur la ville et il a été décidé de créer une brèche artificielle à travers la flèche de sable pour faciliter l'écoulement du fleuve vers la mer et ainsi limiter l'inondation des zones résidentielles. Cet aménagement a eu des effets considérables sur la morphodynamique côtière et fluviale de cette région.

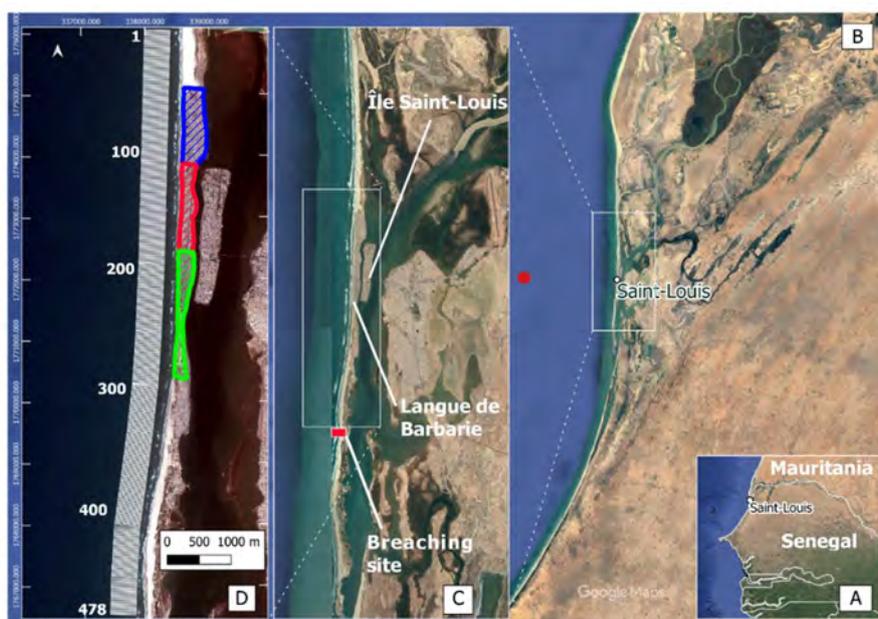


Figure 1 : (A) Localisation de la zone d'étude ; (B) L'île de Saint-Louis est bordée par la Langue de Barbarie. Le point rouge indique le nœud utilisé pour extraire les données modélisées sur les vagues, les marées, les ondes de tempête et l'élévation du niveau de la mer. (C) La zone d'étude est située sur le front côtier de la Langue de Barbarie. Le rectangle rouge indique l'emplacement de la brèche réalisée en octobre 2003. (D) Zone d'étude avec localisation des transects tous les 20 m numérotés du nord au sud (lignes blanches) pour les deux évaluations de vulnérabilité. Les polygones colorés indiquent les quartiers densément peuplés de la zone ; Goxu Mbathie (bleu), N'Dar Toute (rouge), et Guet Ndar (vert).

L'initiative Space for Climate Observatory (SCO) vise à utiliser les données satellitaires et les technologies numériques pour soutenir l'émergence d'outils opérationnels de surveillance, d'atténuation et d'adaptation au climat. Dans ce cadre, le projet OSS Saint Louis a été initié pour obtenir des outils et des variables qui traitent de la vulnérabilité de la région au changement climatique et, de cette manière, aident les décideurs et informent le grand public. Ainsi, cinq principaux groupes de travail (WP) ont été désignés : WP1 Définition des événements extrêmes, WP2 Approche multi-capteurs pour un suivi multi-échelle de l'évolution hydro morpho sédimentaire de la zone côtière, WP3

Simulation cartographique des inondations dans le contexte du changement climatique, WP4 Outils et indicateurs opérationnels et transposables pour la gestion des coûts, WP5 Sensibilisation des acteurs et des décideurs à une vision multirisque du territoire (Fig. 2). L'architecture de ce rapport sera basée sur la structure des WP décrits ci-dessus.

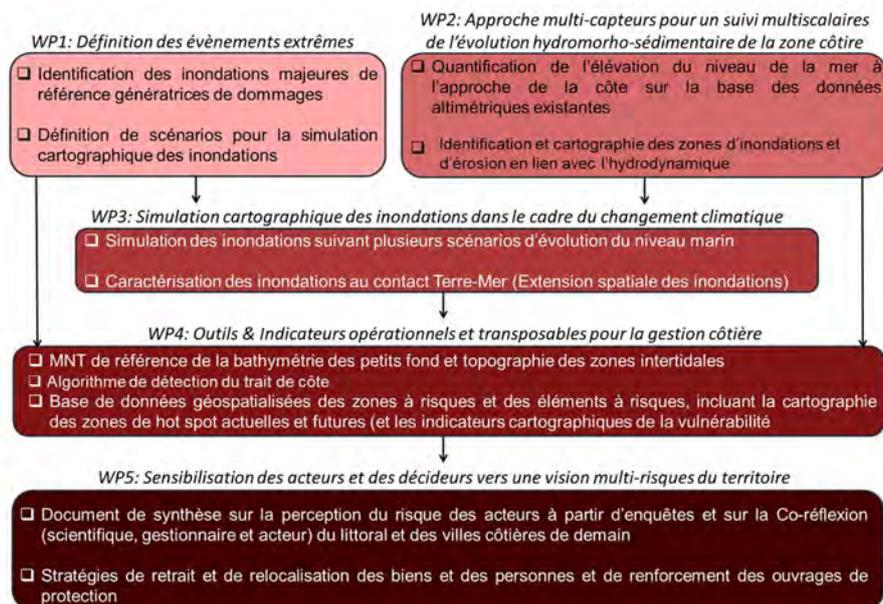


Figure 2 : Structuration du projet OSS Saint-Louis en Work-packages

## 1. WP1 Définition des événements extrêmes

### 1.1. Événements côtiers extrêmes

Les tempêtes comptent parmi les phénomènes naturels les plus puissants de la planète. D'un point de vue météorologique, elles se caractérisent par une violente perturbation atmosphérique, se manifestant par une faible pression barométrique, une couverture nuageuse, des vents forts et des précipitations (Wallace et Hobbs, 2006). D'un point de vue océanique, elles se manifestent par des vagues puissantes (Corbella et Stretch, 2013). Lorsqu'elles atteignent les côtes, elles sont connues sous le nom de tempêtes côtières (Harley, 2017) et peuvent avoir des effets importants sur les environnements côtiers, tels que l'érosion des plages (Jiménez et al., 2012 ; Mendoza et Jiménez, 2006), l'endommagement des infrastructures côtières (Bacopoulos et Clark, 2021 ; Jiménez et al., 2011) et la submersion marine (Rouhaud et Vanderlinden, 2022). En ce qui concerne les rivières, les tempêtes se manifestent par une montée des eaux pouvant être alimentée également par des pluies intenses, des crues et un débordement des berges. Dans le cadre du changement climatique, la plupart des études suggèrent que les tempêtes vont probablement augmenter en termes d'énergie et de fréquence (GIEC, 2022) entraînant ainsi une augmentation de leur impact. De plus, cet impact sera accentué par l'élévation du niveau moyen des mers.

#### 1.1.1. Ensemble de données sur les vagues

Cette étude a utilisé la base de données sur les vagues de l'ERA 5 (Hersbach et al., 2020 ; Dee et al., 2011) pour la période allant de janvier 1979 à décembre 2021, en se basant sur des intervalles horaires pour la région de St. Louis (Figure 1B). La figure 3 représente les conditions hydrodynamiques des vagues : la figure du haut présente la hauteur significative des vagues ( $H_s$ ) où la hauteur significative moyenne est de 1,04 m pour l'ensemble des données; la figure du milieu présente la période de la vague ( $T_p$ ), avec des valeurs de 6 s pour les vagues légères et des périodes > 10s associées

aux vagues hivernales ; la figure du bas présente la direction des vagues où l'on peut constater que les vagues du Nord-Ouest sont dominantes.

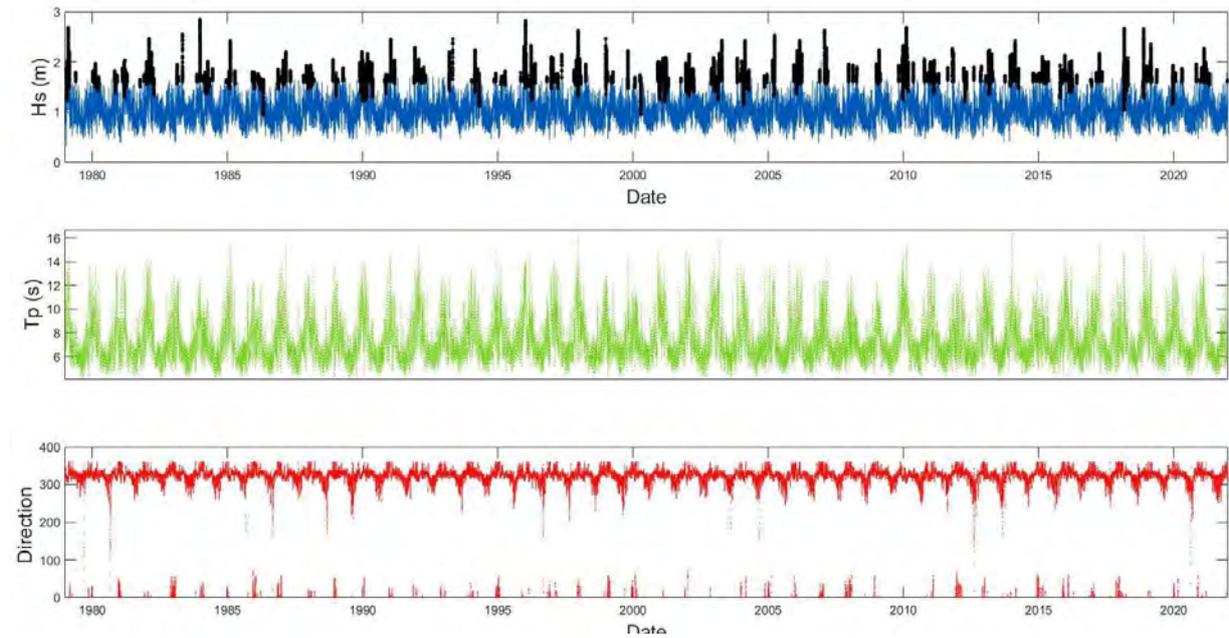


Figure 3 : Conditions hydrodynamiques pour la période 1979 - 2021 à St. Louis : Hauteur significative des vagues (Hs) (les points noirs représentent les tempêtes), période de la vague (Tp) et direction des vagues (en degrés).

### 1.1.2. Caractéristiques des vagues

Le comportement saisonnier des vagues dans la région de St. Louis se caractérise par des vagues de faible énergie au cours des mois de mai à octobre provenant principalement du secteur Nord-Ouest. Ces vagues sont associées aux vagues tropicales d'est qui, bien qu'elles n'aient pas d'impact direct sur la région, influencent le climat des vagues (Figure 4). De novembre à avril, les vagues à haute énergie se manifestent avec des périodes de vagues plus élevées et une grande variabilité dans la direction, provenant du secteur ouest-nord-ouest. Elles sont associées à une forte activité de tempête à des latitudes moyennes à élevées, comme l'indiquent les conclusions de Sadio et al. (2017).

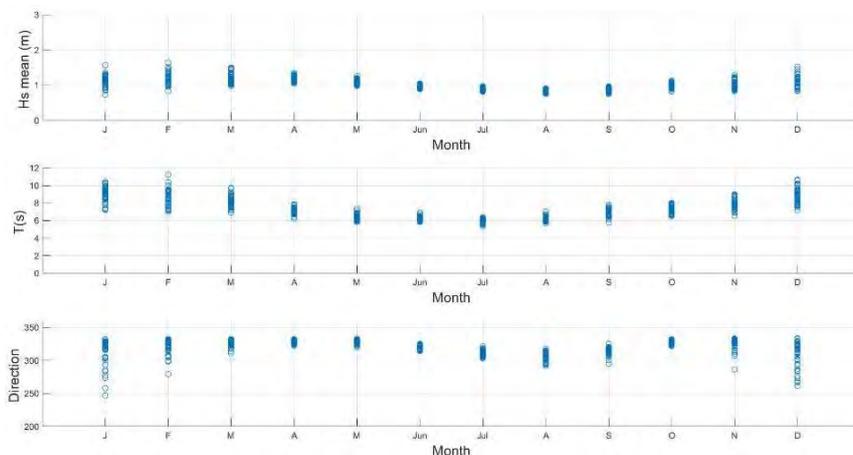


Figure 4 : Caractéristiques moyennes des vagues de 1979 à 2021 (prévisions rétrospectives de l'ERA5) : hauteur significative (Hs), période(T) et direction des vagues (degré).

Les tendances de la hauteur de vague ont été évaluées sur une base annuelle en considérant la hauteur de vague moyenne annuelle et la hauteur de vague maximale annuelle. Dans le premier cas et en utilisant un niveau de confiance de 95%, la moyenne Hs montre une augmentation de 0,0002 m par an et dans le second cas, une diminution de la Hs max annuelle avec une valeur de -0,0006424 m par an. Ces deux tendances ne sont pas significatives (Figure 5).

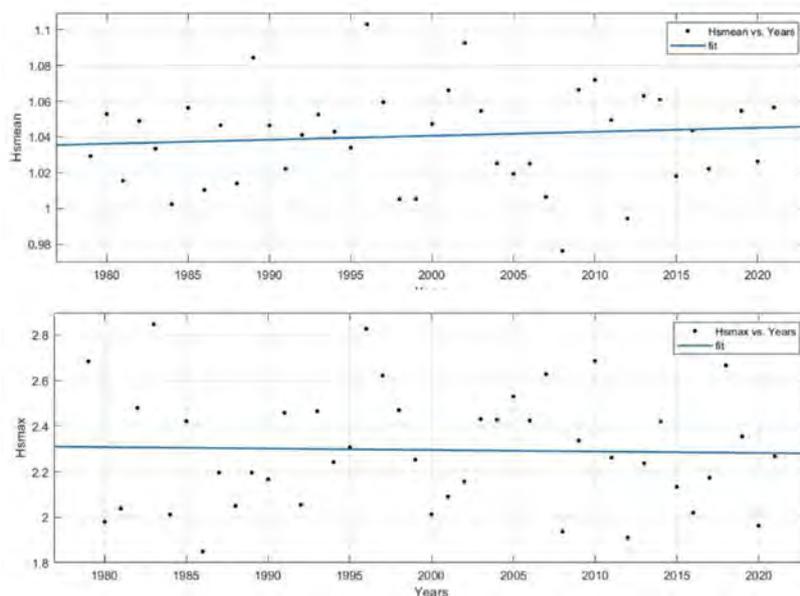


Figure 5 Tendances annuelles de la hauteur de vague moyenne annuelle (en majuscules) et de la hauteur de vague maximale annuelle pour la série de vagues Era5 1979-2021.

### 1.1.3. Définition des tempêtes, classification et tendances

Une façon courante de caractériser les événements extrêmes est d'utiliser l'approche "Peak-Over-Threshold", qui implique qu'un événement de vague extrême (tempête) se produit lorsque la hauteur significative de la vague (Hs) dépasse un seuil donné pendant, au moins, une certaine période de temps (Mendoza et al., 2011).

Conventionnellement, la sélection du seuil de Hs prend en compte les caractéristiques locales du régime des vagues. Dans cette étude, Hs moyenne ( $\widehat{Hs}$ ) était de 1,04 m avec un écart type ( $\sigma$ ) de 0,28 m. À partir de ces valeurs, une tempête extrême est définie comme un événement au cours duquel Hs atteint un seuil  $> 1,6$  m pendant au moins 12 heures. Le seuil est calculé de la manière suivante :

$$H_{threshold} = \widehat{Hs} + 2\sigma$$

Le critère de Hs moyenne est basé sur la méthodologie utilisée par Walker et Basco (2011), tandis que le critère de durée minimale prend en compte la marée semi-diurne dans la zone. En outre, afin de distinguer les événements de tempête consécutifs et de s'assurer que les événements sont statistiquement indépendants, une période inter-événements de 48 heures a été établie (Dorsch et al., 2009). Par conséquent, les événements consécutifs doivent être espacés d'au moins 48 heures pour être considérés comme des événements indépendants. Si Hs est inférieur au seuil pendant moins de 48 heures, les événements consécutifs seront considérés comme un seul événement associé à un événement météorologique unique.

Pour chaque tempête identifiée, nous avons extrait les caractéristiques suivantes : la hauteur moyenne et maximale du vague, la durée de la tempête et le contenu énergétique de la tempête (Es). Le contenu énergétique de la tempête, lié au potentiel d'érosion de la plage lors de la tempête (Mendoza et al., 2011), est calculé à l'aide de l'équation suivante :

$$E_s = \int_{t_1}^{t_2} Hs^2 dt$$

où  $t_1$  et  $t_2$  définissent la durée pendant laquelle  $Hs$  était supérieure à  $Hs_{\text{threshold}}$ . Cette équation permet d'obtenir une valeur plus précise pour  $E_s$  que l'équation traditionnelle de l'énergie de la vague, qui utilise une seule valeur de  $Hs$  (généralement  $Hs$  maximale) pour caractériser l'ensemble de l'événement.

Les 337 tempêtes identifiées sur la période 1979-2021 ont été classées en 5 niveaux, basés sur leur contenu énergétique. 189 événements ont été classés comme des tempêtes faibles ( $E_s < 115 \text{ m}^2 \cdot \text{h}$ ), 96 tempêtes comme des événements modérés ( $116 \text{ m}^2 \cdot \text{h} > E_s < 250 \text{ m}^2 \cdot \text{h}$ ), 40 tempêtes comme des événements forts ( $251 \text{ m}^2 \cdot \text{h} > E_s < 500 \text{ m}^2 \cdot \text{h}$ ), 9 tempêtes comme des événements sévères ( $501 \text{ m}^2 \cdot \text{h} > E_s < 1000 \text{ m}^2 \cdot \text{h}$ ) et 3 comme événements extrêmes ( $E_s > 1000 \text{ m}^2 \cdot \text{h}$ ) - (Tableau 1). La tempête la moins énergétique a eu lieu en novembre 1980 avec une  $Hs$  maximale de 1,6 m, une durée de 12 heures et  $E_s$  de  $32 \text{ m}^2 \cdot \text{h}$ . En revanche, l'événement le plus énergétique s'est produit en février 2018 avec une  $Hs$  maximale de 2,7 m, une durée de 442 heures et un  $E_s$  de  $1361 \text{ m}^2 \cdot \text{h}$ .

Tableau 1 : Classification des tempêtes en utilisant les données Era5 pour la période 1979-2021.

Classe	Contenu énergétique ( $\text{m}^2 \cdot \text{h}$ )	Nombre de tempêtes	$\widehat{Hs}$ max	Durée moyenne (heure)
Faible	$E_s < 115$	189	1.8	24
Modéré	$116 > E_s < 250$	96	2	54
Forte	$251 > E_s < 500$	40	2.1	105
Sévère	$501 > E_s < 1000$	9	2.3	181
Extrême	$E_s > 1000$	3	2.7	353

En termes de tendances décennales, le contenu énergétique annuel moyen et maximal a présenté une tendance négative (figure 6) avec des valeurs de  $-0,42 \text{ m}^2 \cdot \text{h} / \text{an}$  et de  $-1,32 \text{ m}^2 \cdot \text{h} / \text{an}$  respectivement et non significatives.

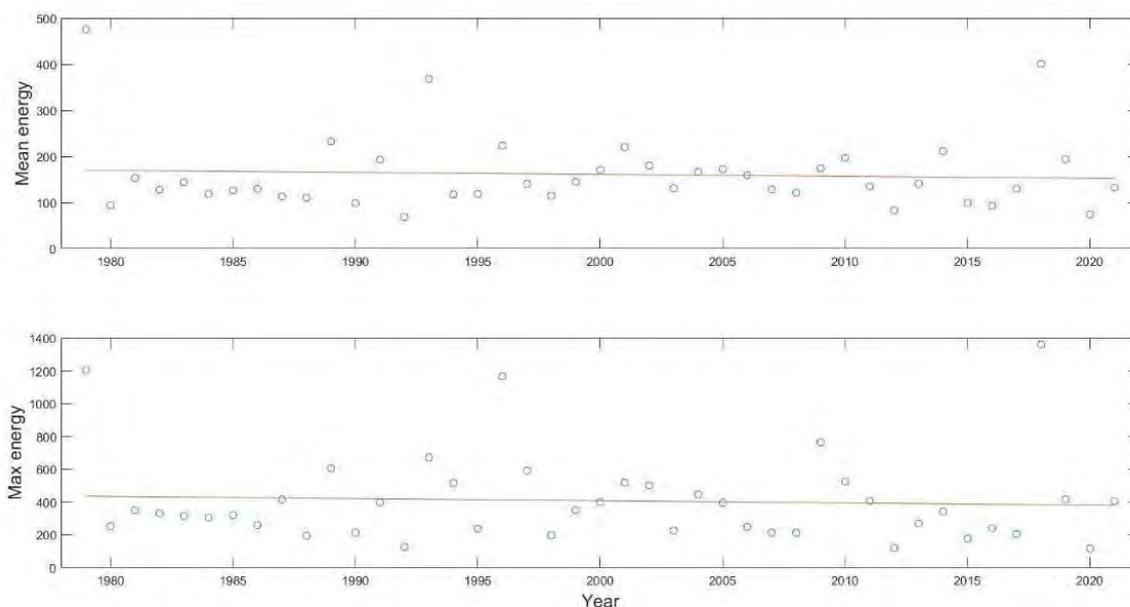


Figure 6 : Séries temporelles du contenu énergétique annuel moyen (en haut) et du contenu énergétique annuel maximal (en bas) pour la période 1979-2021, avec les tendances correspondantes.

## 1.2. Événements fluviaux extrêmes

En ce qui concerne les inondations fluviales, cette étude a utilisé l'ensemble des données historiques des inondations qui se sont produites dans la région depuis 1965. Parmi celles-ci, seules quelques-unes ont été documentées, comme les événements survenus en 1998 et en 2000, qui ont inondé la quasi-totalité des quartiers de la ville. En 2003, de fortes pluies ont fait déborder le fleuve Sénégal, avec un niveau d'eau de 1,93 m, entraînant des inondations généralisées à Saint-Louis, qui ont conduit à la rupture de la flèche de sable, ce qui a entraîné un changement complet de la dynamique du fleuve et de la géomorphologie de la flèche de sable. En 2012, la ville a connu une nouvelle inondation avec une hauteur d'eau de 1,5 m, entraînant le déplacement de plus de 30 000 personnes, des dommages aux habitations et aux infrastructures, ainsi que des pertes de récoltes et de bétail.

La figure 7 illustre la série chronologique quotidienne des mesures du niveau d'eau obtenues à partir d'une station située à Saint-Louis, couvrant la période de 1964 à 2018. Les données présentent un schéma saisonnier distinct, caractérisé par une tendance à la hausse du niveau de l'eau de juin à octobre, s'alignant sur la saison des pluies, et une baisse subséquente au cours des mois restants (saison sèche). Notamment, dans la série chronologique, des augmentations significatives du niveau de l'eau se sont produites au cours des années 1969, 1970 et 1971, avec une élévation maximale enregistrée de 2,3 mètres. Cette valeur particulière a été utilisée dans l'analyse des événements extrêmes.

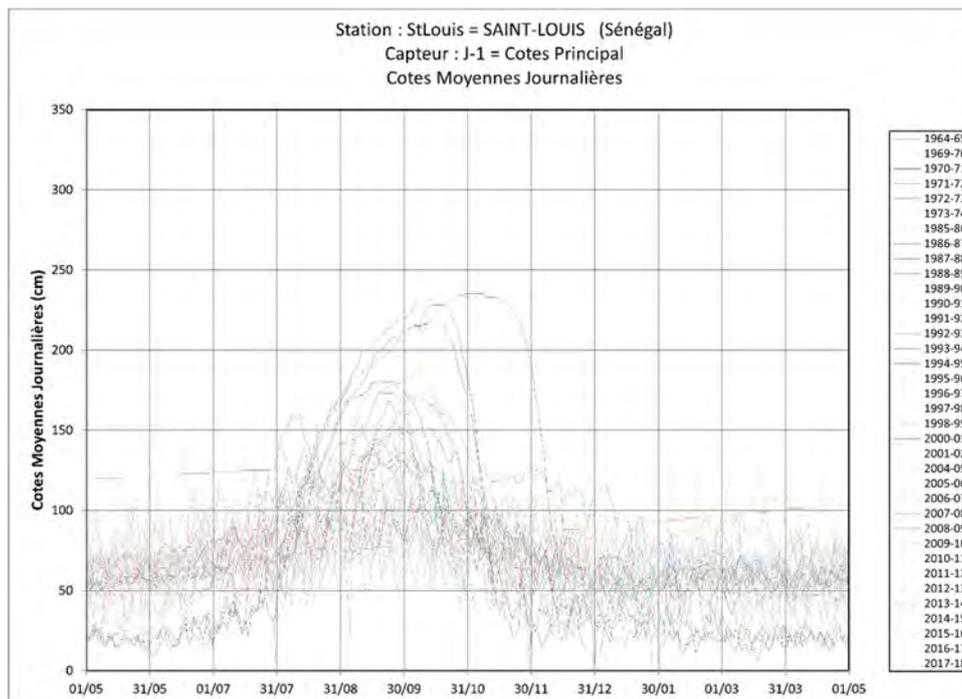


Figure 7. Niveaux d'eau historiques dans la station de Saint-Louis (1964 - 2018).

## 2. WP2 Approche multi-capteurs pour un suivi multi-échelle de l'évolution hydro morpho sédimentaire de la zone côtière

Pour ce WP, nous avons proposé deux indices de vulnérabilité. Un indice de vulnérabilité côtière (CVI) qui permet d'identifier les zones les plus vulnérables à l'élévation du niveau marin et un indice de vulnérabilité aux inondations (FVI), liées à des tempêtes extrêmes spécifiques, qui permet d'identifier les zones les plus susceptibles d'être inondés en fonction des caractéristiques spécifiques d'une tempête. La section 3.1 décrit les différents jeux de données utilisés pour obtenir les deux indices. Les sections 3.2 et 3.3 présentent en détail chaque élément utilisé pour obtenir le CVI et le FVI. Les résultats de chaque indice sont présentés dans le WP4.

### 2.1. Données

#### 2.1.1. Données satellitaires

##### 2.1.1.1. Imagerie satellitaire pour la géomorphologie et l'extraction du trait de côte

Les positions du littoral ont été extraites des images Landsat et Sentinel-2. Le programme Landsat fournit des données répétitives d'observation de la Terre depuis le lancement du premier Landsat-1 en 1972. Dans cette étude, les images acquises par Landsat-5 (1984-2013), Landsat-7 (1999-2022) et Landsat-8 (2013-présent) ont été utilisées pour extraire les positions des lignes de rivage.

Ces satellites ont été lancés sur des orbites quasi circulaires, héliosynchrones et quasi polaires, avec un cycle de répétition de 16 jours pour chacun d'entre eux. Leur altitude orbitale moyenne est de 705 km avec une inclinaison de 98,2° par rapport à l'équateur. Elles traversent l'équateur à 10h00 (+/- 15 minutes) heure locale moyenne sur un nœud descendant. Les trois missions fournissent des données d'observation continues depuis le lancement de Landsat-5 le 1er mars 1984 jusqu'à aujourd'hui. Elles ont également des périodes d'acquisition communes qui améliorent leur résolution temporelle (du 15 avril 1999 au 5 juin 2013 entre Landsat-5 et Landsat-7 et du 11 février 2013 au 6 avril 2022 entre Landsat-7 et Landsat-8). Il convient de noter que le correcteur de ligne de balayage du

système Landsat-7 est tombé en panne le 31 mai 2003, ce qui a entraîné des lacunes dans les images brutes. Néanmoins, les images Landsat-7 disponibles avec des lacunes ont été utilisées pour éviter autant que possible la discontinuité dans les lignes de côte extraites annuellement.

La mission Sentinel-2 est une constellation de deux satellites (Sentinel-2A et Sentinel-2B) qui fait partie du programme Copernicus développé par l'ESA pour la surveillance à long terme de la surface de la Terre à des résolutions spatiales et temporelles élevées (Malenovský et al., 2012 ; Showstack, 2014). Sentinel-2A et 2B ont été lancés en juin 2015 et mars 2017 (périodes d'acquisition communes avec Landsat-7 et Landsat-8) avec un décalage de 180° qui améliore le temps de revisite de la mission. Chacun des satellites Sentinel-2 orbite à une altitude moyenne de 786 km sur une orbite quasi polaire héliosynchrone avec un cycle de répétition de 10 jours chacun (5 jours pour la constellation à l'équateur qui peut atteindre 2-3 jours aux latitudes moyennes), un angle d'inclinaison de 98,62° et un nœud descendant de 10h30. (Drusch et al., 2012).

### 2.1.1.2. Imagerie stéréoscopique par satellite pour obtenir le modèle numérique d'élévation

La constellation Pléiades a été utilisée pour obtenir le modèle numérique d'élévation (MNE). Pléiades est une constellation de deux satellites, Pléiades 1A et Pléiades 1B, avec un décalage de 180°, lancés respectivement le 17 décembre 2011 et le 2 décembre 2012. Les satellites Pléiades sont en orbite à une altitude moyenne de 694 km sur une orbite héliosynchrone avec un angle d'inclinaison de 98,2° et un nœud descendant de 10h30. Le principal instrument à bord de Pléiades 1A et 1B est l'imageur à haute résolution qui fournit des images à très haute résolution dans 4 bandes multispectrales (bandes XS : bleu, vert, rouge et NIR) avec une résolution de 2 m et une bande panchromatique (bande PA) de 0,5 m de résolution. La principale caractéristique de Pléiades est sa capacité d'acquisition stéréo et tristéréo qui permet de générer des MNE. Les images Pléiades sont disponibles via le programme DINAMIS (<https://dinamis.data-terra.org>).

### 2.1.1.3. L'altimétrie radar par satellite pour obtenir les tendances du niveau de la mer

Les tendances du niveau de la mer utilisées dans cette étude ont été extraites du produit Sea Level Ocean Monitoring Variable (<https://doi.org/10.48670/moi-00238>) fourni par le Copernicus Climate Change Service et le Copernicus Marine Environment Monitoring Service (von Schuckmann et al., 2018). Ce produit fournit des tendances régionales maillées du niveau de la mer (résolution spatiale de 0,25°x0,25°) dérivées du système d'unification des données et de combinaison altimétrique (DUACS) en temps différé -2021 version (Faugère et al., 2022) des cartes altimétriques maillées des anomalies de hauteur de mer. DUACS est le produit altimétrique multimission développé par le Centre National d'Etudes Spatiales (CNES) et la Collecte Localisation Satellites qui traite les données altimétriques de toutes les missions altimétriques (Jason-3, Sentinel-3A, Saral, Cryosat-2, Jason-1&2, T/P, Envisat, GFO, ERS-1 & 2 et même Geosat). Les données sont distribuées par le programme AVISO (Archiving, Validation, and Interpretation of Satellite Oceanographic data).

## 2.1.2. Données de réanalyse

Les données sur les marées ont été obtenues à partir du modèle FES2014 (Carrere et al., 2016) basé sur la modélisation hydrodynamique des marées couplée à un code d'assimilation de données d'ensemble (Lyard et al., 2021). Le jeu de données est produit par le Laboratoire d'Etudes en Géophysique et Océanographie Spatiales (LEGOS) et distribué par AVISO, avec le soutien du CNES (<http://www.aviso.altimetry.fr/>).

Les données sur les vagues ont été obtenues à partir de la base de données mondiale de réanalyse ERA 5, qui utilise un modèle couplé vent-vagues et atmosphère qui a été largement utilisé et validé (Hersbach et al., 2020 ; Dee et al., 2011). Les données sont produites par le Centre européen

pour les prévisions météorologiques à moyen terme (<https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era-interim>).

Les données de corrections atmosphériques dynamiques ont été utilisées pour obtenir les valeurs des ondes de tempête. Les données sont produites par la Division Collecte Localisation Satellites Océanographie Spatiale au moyen du modèle MOG2D LEGOS et distribuées par AVISO avec le soutien du CNES (<http://www.aviso.altimetry.fr/>).

## 2.2. Indice de vulnérabilité côtière à l'élévation du niveau de la mer (CVI)

Cette étude applique le CVI dû à l'élévation du niveau de la mer proposé par Thieler et Hammar-Klose (2000) qui considère trois indicateurs géologiques (géomorphologie, pente côtière et taux de variation du rivage) et trois indicateurs de processus physiques (élévation du niveau de la mer, hauteur moyenne des vagues et le marnage). La géomorphologie est directement liée aux taux d'érosion possibles donnés par les différentes formes de relief. La pente de la plage contrôle la manière dont l'énergie des vagues se dissipe et se réfléchit sur la plage, et donc son impact sur le front de mer. Dans des conditions d'élévation du niveau de la mer, on considère que les plages à faible pente reculent plus rapidement que celles à forte pente (Pilkey et al., 1987). Le taux de changement du trait de côte est un indicateur de l'impact potentiel du changement climatique et peut être considéré comme une capacité de résilience de la côte. Pour ce site spécifique, l'élévation maximale du profil de la plage a été ajoutée en tant qu'indicateur géologique supplémentaire, tel qu'il a été inclus dans le CVI proposé par Gornitz (1991). Cet indicateur a été incorporé en raison de la basse altitude du site étudié (*low-lying areas*). Les indicateurs de processus physiques sont considérés comme les principaux moteurs des processus d'érosion et de submersion. L'évolution du niveau de la mer est un facteur important, en particulier dans les zones de basse altitude qui seront gravement impactées par le changement climatique. Les vagues sont l'une des forces motrices les plus importantes qui modulent le transport des sédiments sur la côte et lorsqu'elles sont combinées à l'amplitude des marées, elles peuvent provoquer des inondations.

Les indicateurs ont été caractérisés et leur niveau de vulnérabilité a été classé selon la méthodologie de Thieler et Hammar-Klose (2000) (tableau 2). Concernant l'indicateur d'élévation et pour ce cas d'étude spécifique de Saint Louis, les valeurs inférieures à 1 m ont été classées comme étant de vulnérabilité très élevée, étant donné que l'élévation du premier mètre aura de graves conséquences dans les futurs scénarios de changement climatique (GIEC, 2022). Les valeurs comprises entre 1 et 6 ont été classées comme élevées, modérées et faibles, car les cinq premiers mètres pourraient être affectés par des vagues extrêmes et des ondes de tempête (Koroglu et al., 2019). Les valeurs supérieures à 6 m ont été classées comme très faibles compte tenu de l'altitude maximale du site, qui est d'environ 7 m (Seck, 2010 ; Taveneau et al., 2021).

Chaque variable obtenue a été incorporée dans un système d'information géographique (SIG) en utilisant le système de coordonnées projetées WGS84, zone UTM 28 N. Dans le SIG, une série de transects perpendiculaires à la ligne de côte a été placée tous les 20 m le long des 9,5 km de la côte. Les transects ont été numérotés du nord au sud, pour un total de 478 transects (figure 1D).

*Tableau 2 : Indicateurs utilisés dans l'indice de vulnérabilité côtière à l'élévation du niveau de la mer avec la classification de vulnérabilité établie telle qu'utilisée par Thieler et Hammar-Klose (2000) et la valeur d'élévation pré-classifiée ajoutée, classée pour ce site spécifique.*

Indicateur	Source	Lettre de l'indicateur désigné	Valeur de l'indice				
			Très faible	Faible	Modéré	Élevé	Très élevé
Géomorphologie	Cartes géologiques / Imagerie satellitaire	G	Falaises rocheuses	Embankments	Falaises érosives Rivages	Plage de roches douces	Plages de sable Îles

					végétalisés	Barrières	
Pente de la plage (degrés)	Imagerie satellitaire	BS	>2	1.3- 1.9	0.9 - 1.3	0.6 - 0.9	<0.6
Taux d'évolution du trait de côte (m/an)	Imagerie satellitaire	SCR	> +2	1 à 2	1 à -1	-1 à -2	<-2
Élévation (m)	Stéréo-imagerie satellitaire	E	>6	3 à 5,9	2 à 2,9	1 à 1,9	< 1.0
Élévation du niveau de la mer (mm/an)	Altimétrie satellitaire	SLR	< -1.21	-1,21 à 0,1	0,1 à 1,24	1,24 à 1,36	>1.36
Hauteur significative moyenne des vagues (m)	Modélisé	Hs	<1.1	1.1 à 2.0	2.1 à 2.25	2,25 à 2,60	>2.70
Marnage (m)	Modélisé	TR	>6.0	4.1 à 6.0	De 4,0 à 2,0	1,0 à 1,9	<1.0

### 2.2.1. Géomorphologie

La géomorphologie a été obtenue à l'aide des images satellitaires à haute résolution (Figure 8). Compte tenu de l'étendue de 9,5 km, dans le cas précis de cette étude, toute la zone d'étude est située sur une flèche de sable île-barrière.



Figure 8 : Vue rapprochée de l'image (pan-sharpened) Pléiades acquise en mars 2021 de la Langue de Barbarie utilisée pour obtenir les caractéristiques géomorphologiques du site d'étude.

### 2.2.2. Pente de la plage

L'un des éléments clés de l'évaluation de la vulnérabilité côtière est la pente de la plage. En effet, la pente contrôle la manière dont l'énergie des vagues est dissipée ou réfléchi. La pente de la

plage a été obtenue en suivant la méthodologie présentée par Vos et al. (2020). Cette méthode utilise le trait de côte et applique une analyse du domaine des fréquences pour trouver les pentes optimales qui minimisent les fluctuations de marée à haute fréquence (en utilisant les informations sur les marées du site d'étude) par rapport aux changements morphologiques à basse fréquence. Les valeurs de la pente de la plage varient de 0,01 % à 0,2 %. Les valeurs VH (très élevées) sont donc dominantes sur l'ensemble de la zone d'étude (Figure 9C). Deux zones distinctes ayant de valeurs VL sont présentes dans la région : une section de 160 m entre les transects 113 à 121 dans la partie nord du quartier N'Dar Toute, et une seconde section d'environ 620 m entre les transects 151 à 182, couvrant la partie sud du même quartier et la partie nord du quartier Guet Ndar. Nous avons obtenu la pente tous les 20 m à l'aide des images satellitaires. Cette détermination spatiale fine a été validée par la pente obtenue grâce à un MNE acquis par un drone-photogrammétrique (avec 9 points de contrôle au sol) en novembre 2021 (Figure98A). 21 transects ont été comparés (transects 176 -197) avec une valeur R de 0,89 (Figure 9B).

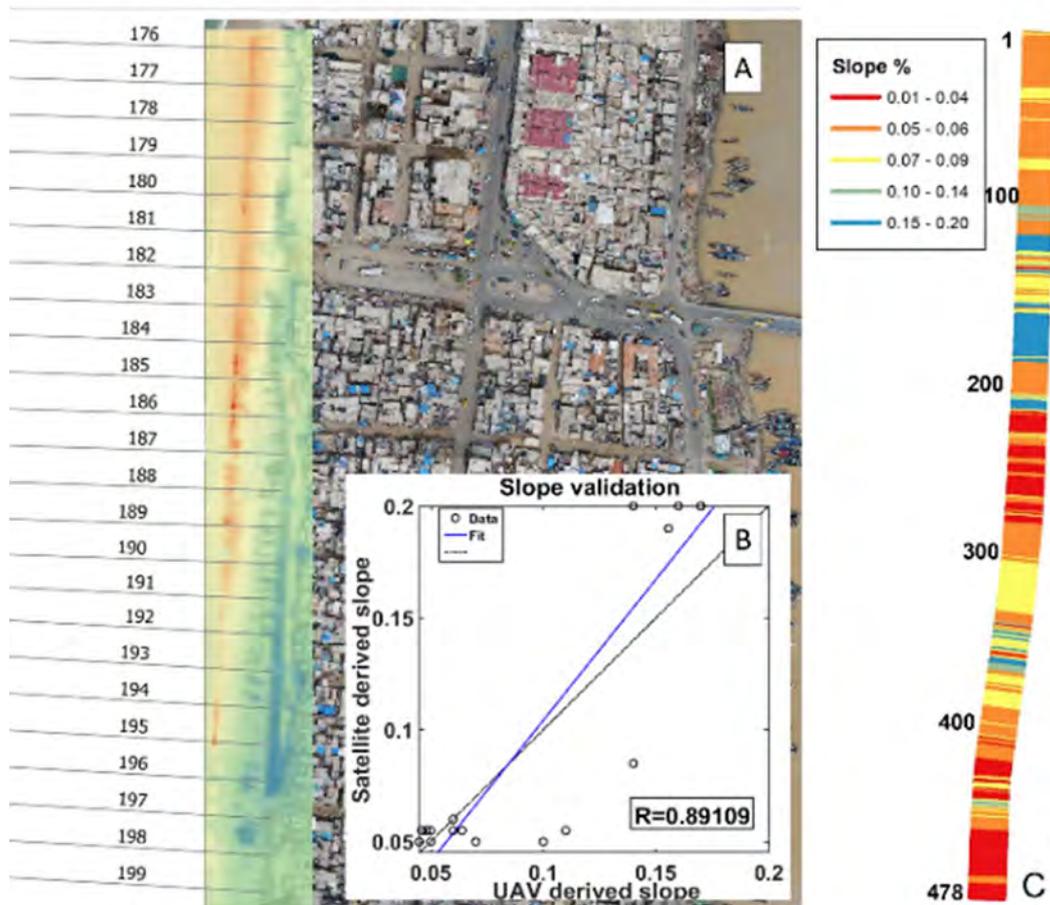


Figure 9 : (A) MNE obtenu par photogrammétrique et transects utilisés pour valider la pente de la plage. (B) Ajustement linéaire à partir des valeurs de 19 transects. (C) Valeurs de la pente de la plage (degrés) pour la région de la Langue de Barbarie.

### 2.2.3. Taux de changement de trait de côte

La position du trait de côte a été extraite chaque année à l'aide de la boîte à outils Coastsat (Vos et al., 2019) en utilisant les images Landsat et Sentinel-2 accessibles au public pour la période 1984 - 2021, à l'exception des années 1991, 1992, 1993, 1996 et 1997 pour lesquelles aucune donnée n'était disponible. La méthode utilise les images provenant des missions Landsat-5 (Thematic Mapper), Landsat-7 (Enhanced Thematic Mapper Plus) et Landsat-8 (Operational Land Imager). Les deux bandes utilisées dans cette étude sont la bande infrarouge rouge à ondes courtes 1 (SWIR1) et la bande verte (G). Ces deux bandes sont utilisées pour calculer l'indice modifié de l'eau par différence normalisé (Modified Normalized Difference Water Index - MNDWI) à partir duquel la boîte à outils Coastsat

extrait les lignes d'eau en appliquant le seuil par défaut qui maximise la variance interclasse entre les classes de sable et d'eau. La résolution des bandes SWIR1 et G pour Landsat-5, 7 et 8 est de 30 m. Les résolutions de Landsat-7 et 8 sont améliorées en utilisant la bande panchromatique d'une résolution de 15 m. Landsat-5 n'a pas de bande panchromatique, mais les bandes SWIR1 et G ont été sous-échantillonnées à 15 m à l'aide d'une interpolation bilinéaire. Quant à Sentinel-2, la bande G a une résolution de 10 m, tandis que la bande SWIR1 a une résolution de 20 m qui a été réduite à 10 m.

Le taux de changement du trait de côte (SCR) a été obtenu en appliquant le système d'analyse numérique du trait de côte (DSAS toolkit) proposé par Thieler et al. (2009) en utilisant le calcul de régression linéaire pour les positions du trait de côte précédemment extraites qui ont été corrigées en fonction de la marée en utilisant une pente de 0,05 (valeur moyenne de la pente du site d'étude) et les données de marée correspondantes.

Les valeurs du taux de changement de trait de côte varient considérablement le long de la côte en fonction de la période d'étude considérée. La figure 10A présente les valeurs du taux de changement du trait de côte pour trois périodes différentes : l'ensemble de la période d'étude (1984 - 2021), la période de pré-ouverture de la brèche (1984 - 2002) et la période post-ouverture de la brèche (2003 - 2021). Bien que le site d'étude soit situé en amont de la brèche, les résultats des valeurs du taux de changement du trait de côte varient de manière significative si on considère l'ensemble des périodes antérieures et postérieures à la brèche. L'évaluation des taux de changement du trait de côte au moyen de la série chronologique complète (1984 - 2021) a donné des valeurs plus faibles et plus homogènes d'environ -1 à 1 m/an. Si l'on considère la période pré-brèche, les valeurs étaient principalement celles d'une avancée de la position du littoral, atteignant des valeurs allant jusqu'à 4 m/an dans la partie centrale, avec des valeurs de recul aux extrémités (nord et sud) du site d'étude. Cette condition diffère de la période post-brèche, où les taux de changement du trait de côte présentent des valeurs de recul du littoral atteignant jusqu'à -5 m/an dans la partie centrale. Cette tendance générale et les valeurs de la période pré et post-brèche sont en accord avec les tendances trouvées par Ndour et al. (2018). Compte tenu de ce qui précède, cette étude a utilisé les valeurs post-brèche pour le calcul de CVI étant donné qu'elles correspondent à la dynamique actuelle dans le site d'étude. De cette manière, l'indicateur du taux de changement côtier dérivé de la période 2003 -2021 allait de M à H dans la section nord de l'étude (transects 1-120), tandis que dans la section centrale (transects 150-410), les valeurs VH étaient dominantes, et les valeurs VL étaient prédominantes dans la section sud (transects 420-478) (Figure 10B).

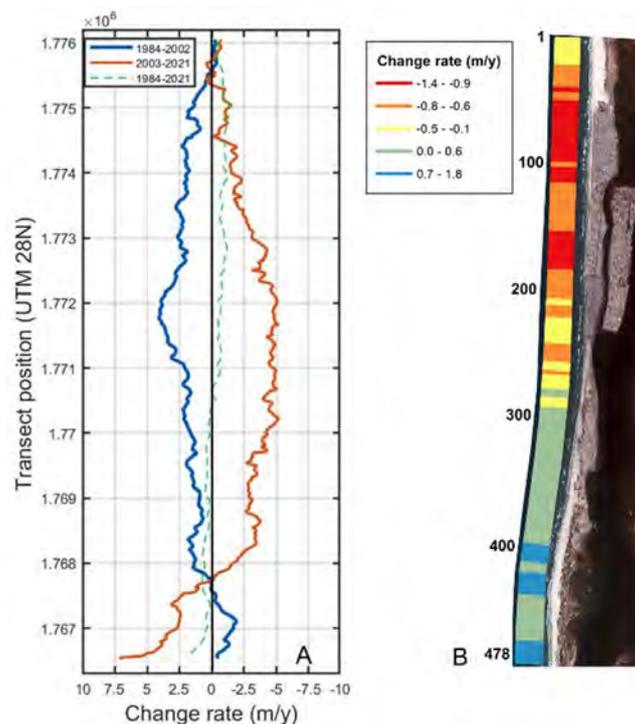


Figure 10 : A) Différents taux de changement du trait de côte (SCR) pour la région de la Langue de Barbarie à l'aide d'images satellitaires. En bleu, la série temporelle 1984-2002, en marron la série

temporelle 2003-2021 et en vert pointillé la série temporelle 1984-2021. B) la distribution spatiale du SCR pour la série temporelle 1984-2021.

#### 2.2.4. Élévation maximale de la plage

Les images stéréoscopiques acquises par Pléiades le 31 mars 2021 ont été utilisées pour obtenir le modèle numérique d'élévation (MNE) du site d'étude. Pléiades est une constellation de deux satellites, Pléiades 1A et Pléiades 1B, avec un décalage de 180°, lancés respectivement le 17 décembre 2011 et le 2 décembre 2012. Les satellites Pléiades sont en orbite à une altitude moyenne de 694 km sur une orbite héliosynchrone avec un angle d'inclinaison de 98,2° et un nœud descendant de 10h30. Le principal instrument de la charge utile à bord de Pléiades 1A et 1B est l'imageur à haute résolution qui fournit des images à très haute résolution dans 4 bandes multispectrales (bandes XS : bleu, vert, rouge et NIR) avec une résolution de 2 m et une bande panchromatique (bande PA) d'une résolution de 0,5 m (figure 11A). La principale caractéristique de Pléiades est sa capacité d'acquisition stéréoscopique et tristéréoscopique, qui permet de générer des MNEs. Les images Pléiades utilisées sont disponibles via le programme DINAMIS (<https://dinamis.data-terra.org>).

Les valeurs d'altitude varient de 0,9 m à 6,2 m (figure 11B). Les valeurs L et H étaient également présentes. Alors que les valeurs L étaient dispersées dans les parties nord et sud du site d'étude, les valeurs H étaient concentrées dans les trois quartiers les plus densément peuplés. La validation de l'indicateur d'élévation à l'aide de ces types d'images stéréoscopiques dans le site d'étude a été réalisée par Taveneau et al. (2021). Cependant, les valeurs d'élévation extraites dans les zones densément peuplées doivent être prises avec précaution, car il y a un espace étroit entre l'extrémité de la plage et les maisons ou les infrastructures de l'arrière-plage, parfois avec des valeurs inférieures à 5 m, ce qui conduit à des valeurs d'élévation erronées. Un autre point à considérer pour les images utilisées pour extraire les valeurs minimales d'élévation -mars 2021- est la présence de grands groupes de bateaux empilés sur la plage (environ 200 m de long) et de structures d'enrochement protégeant la plage qui peuvent également produire du bruit dans les valeurs d'élévation obtenues à partir d'images satellites.

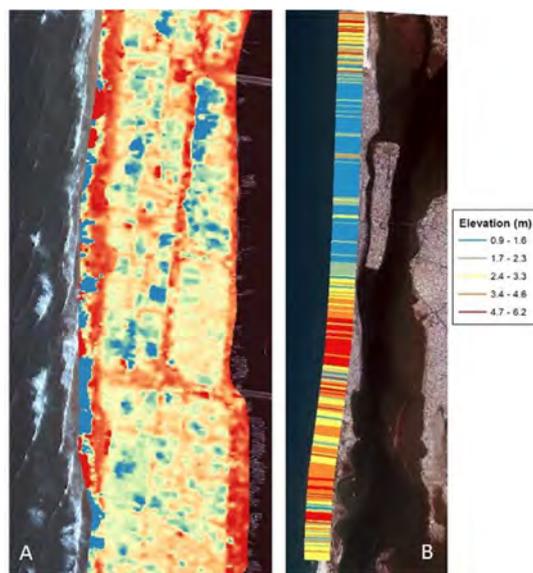


Figure 11 : A) Gros plan de la région de la Langue de Barbarie avec le modèle numérique d'élévation obtenu grâce à l'imagerie satellite Pléiades. B) Valeurs maximales d'élévation obtenues pour chaque transect dans le site d'étude.

#### 2.2.5. L'élévation du niveau de la mer

Les données sur l'élévation du niveau de la mer ont été obtenues en utilisant le produit altimétrique DUACS à partir du nœud le plus proche de la Langue de Barbarie (figure 1B) pour la période 1993-2021. L'élévation du niveau de la mer avait une valeur de 3,2 mm/an pour cette région (figure 12).

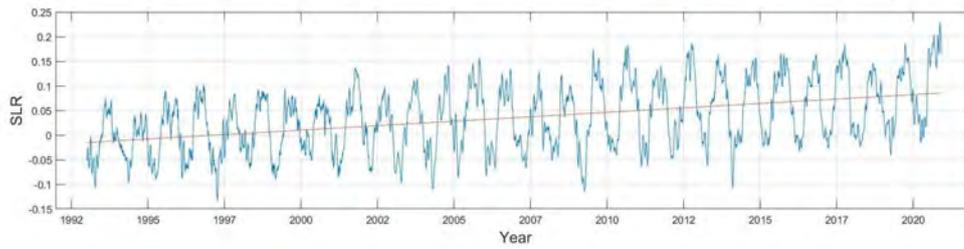


Figure 12: Elévation du niveau de la mer dans la région de Saint-Louis entre 1993 et 2001 obtenue à partir du produit altimétrique DUACS.

### 2.2.6. Hauteur moyenne significative des vagues.

Comme mentionné précédemment, les conditions hydrodynamiques des vagues obtenues à partir de la réanalyse ERA-interim 5 (Hersbach et al., 2020). Pour le nœud le plus proche de la région de St. Louis, la hauteur significative moyenne des vagues était de 1,04 m et la hauteur significative maximale de 2,84 m.

### 2.2.7. Marée

Les données d'élévation de la marée astronomique ont été obtenues en un point proche de la côte en utilisant le modèle global de marée Fes2014 (Carrere et al., 2016). La figure 12 présente une marée semi-diurne avec une amplitude de 1,5 m.

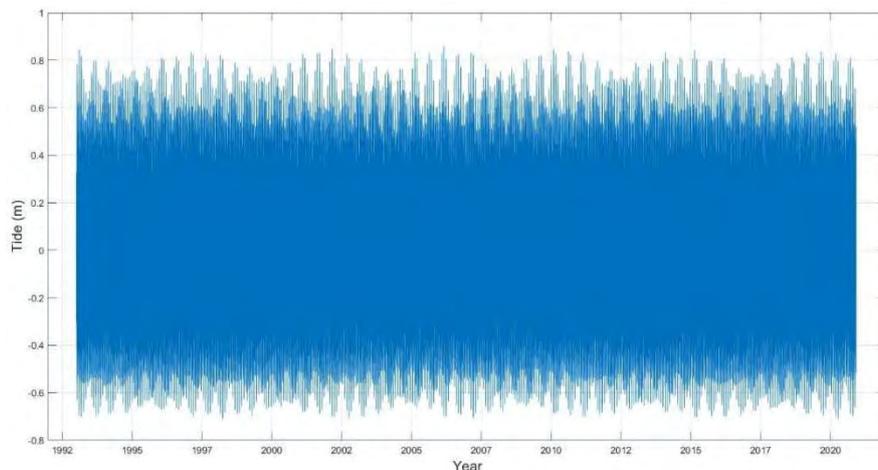


Figure 12. La variation de niveau d'eau correspondant à la marée dans la région de St. Louis pour la période 1992-2021.

### 2.2.8. Évaluation de CVI

Le CVI a été obtenu en tenant compte de la relation entre les 7 indicateurs présentés précédemment. Pour chaque transect, les différents indicateurs sont quantifiés. La quantification est basée sur la définition des scores selon une échelle de 1 à 5 (tableau 1) Ensuite, les variables clés sont agrégées dans un seul indice, au moyen de la formule de normalisation suivante :

$$CVI = \sqrt{\frac{G+SCR+BS+s+TR}{7}}$$

Enfin, les résultats du CVI sur le site ont été classés en cinq catégories : Très faible (VL), Faible (L), Modéré (M), Élevé (H) et Très élevé (VH) selon les quantiles 20, 40, 60 et 80 du pourcentage cumulé résultant. Les résultats obtenus sont discutés dans la section 5.1.

## 2.3. Indice de vulnérabilité aux inondations en cas de tempêtes extrêmes (FVI)

L'évaluation de l'indice de vulnérabilité aux inondations (FVI) due aux tempêtes extrêmes proposée dans cette étude se compose en quatre étapes : i) Analyse de la série temporelle des vagues pour identifier les événements de tempête les plus violents qui se sont produits au cours de la période étudiée, en fonction de leur contenu énergétique ; ii) Détermination du niveau extrême de l'eau côtière (ECWL) lié à la tempête extrême sélectionnée : l'ECWL est composé de l'anomalie du niveau de la mer (SLA), de la marée astronomique (T), de l'onde de tempête (SS) et du runup (Ru), lors du pic de chaque tempête, pour prendre en compte les conditions les plus extrêmes. Le Ru a été obtenu à l'aide de la méthode Stockdon et al. (2006) qui prend en compte la pente de la plage et les caractéristiques des vagues (hauteur maximale et période) ; iii) Classification des valeurs ECWL obtenues en fonction de l'élévation maximale correspondante obtenue pour chaque transect, pour regrouper les résultats en un FVI à 3 classes (Figure 13).

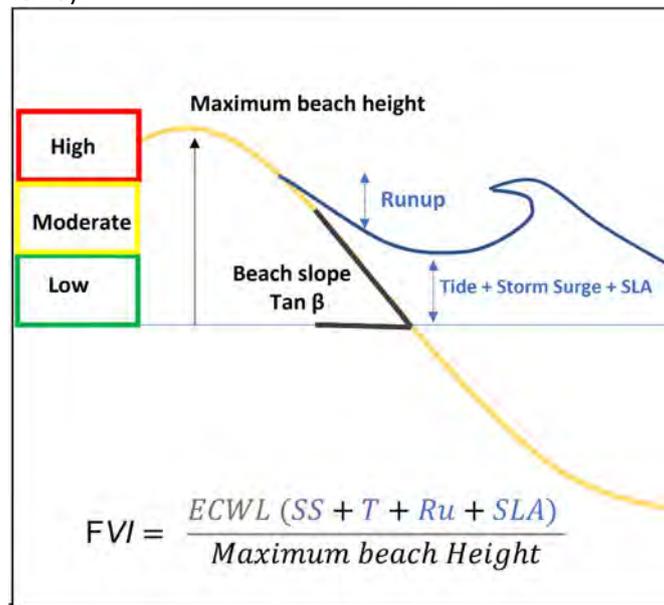


Figure 13 : L'indice de vulnérabilité aux inondations FVI et la relation entre le niveau extrême des eaux côtières (ECWL) et la hauteur maximale de la plage.

### 2.3.1. Identification, classification et sélection des tempêtes pour l'FVI

Parmi les tempêtes identifiées (voir tableau 1), nous avons sélectionné celle présentant le contenu énergétique le plus élevé pour déterminer le ECWL. Nous avons opté pour une tempête majeure survenue en novembre 2018 qui avait suscité l'attention des médias (<https://observers.france24.com/fr/20181119-houle-inonde-langue-barbarie-saint-louis-senegal-menacee-changement-climatique>) et pour laquelle des images satellitaires haute résolution sont disponibles. Cette tempête avait atteint une hauteur de vague maximale de 2,7 m et un niveau d'eau (marée, onde de tempête et anomalie d'élévation du niveau de la mer) de 0,44 m (figure 14). Il est important de souligner que le pic de la tempête a coïncidé avec la marée haute, ce qui a augmenté la vulnérabilité de la zone aux inondations.

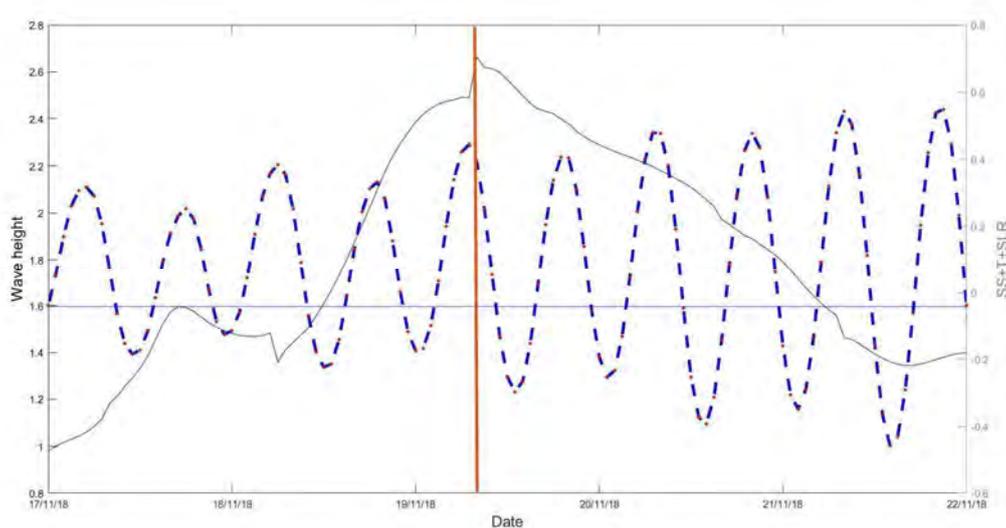


Figure 14 : Tempête de novembre 2018, avec le niveau extrême des eaux côtières (runup, marée, onde de tempête et élévation du niveau de la mer) en bleu et la hauteur maximale des vagues (en noir).

### 2.3.2. Niveau d'eau côtier extrême pour l'FVI

L'ECWL est l'une des principales composantes de l'inondation côtière qui résulte de l'effet combiné de la SS, du SLR, du T et du Ru. Toutes ces variables sont indépendantes de la morphologie de la plage, à l'exception du Ru. Pour cette raison, l'ensemble de la série temporelle de l'ECWL a été calculée pour la période 1993 - 2021 sans prendre en compte le Ru. Après avoir atteint les valeurs extrêmes, il a été confirmé que l'événement de tempête extrême sélectionné avait provoqué l'un des plus hauts niveaux d'eau. Ensuite, la méthode Stockdon et al. (2006) a été utilisée pour calculer le Ru pour chacun des profils de plage espacés de 20 m le long de la zone étudiée, en se basant sur l'événement de tempête extrême de février 2018 et en tenant compte de la configuration de la plage de mars 2021. Après l'ajout de l'indicateur Ru, l'ECWL a été déterminé (voir Figure 13).

### 2.3.3. Évaluation de FVI

FVI a été évalué en divisant l'ECWL obtenu par l'élévation maximale de chaque transect. Les valeurs obtenues ont été classées dans 3 catégories : faibles (L) pour  $FVI \leq 0,3$ , modérées (M) pour  $0,3 < FVI < 0,7$  et élevées (H) pour  $FVI > 0,7$  (Figure 13). Les résultats obtenus sont discutés dans la section 5.2.

## 3. WP3 Simulations cartographiques d'inondations tenant compte du changement climatique.

### 3.1. Scénario RCP 8.5 en considérant les niveaux de confiance inférieur (0,6 m) et supérieur (1,1 m).

Afin d'évaluer l'impact de changement climatique sur les inondations marines et fluviales en 2100, deux simulations cartographiques ont été créées en prenant en compte le scénario RCP 8.5. La première simulation utilise le niveau de confiance inférieur (0,6 m), tandis que la seconde utilise le niveau de confiance supérieur (1,1 m) au MNE dérivé des images satellite stéréoscopiques. (Figure 15 et Figure 16).

Sur la figure 15, les zones sujettes aux inondations sont mises en évidence, englobant une superficie totale de 1,9 km<sup>2</sup>. L'impact aura principalement concentré le long des marges de l'île Saint-Louis. Cependant, d'après le modèle d'élévation, l'île de Sor devrait subir un degré d'impact plus important, en particulier dans les quartiers HLM et Leona.

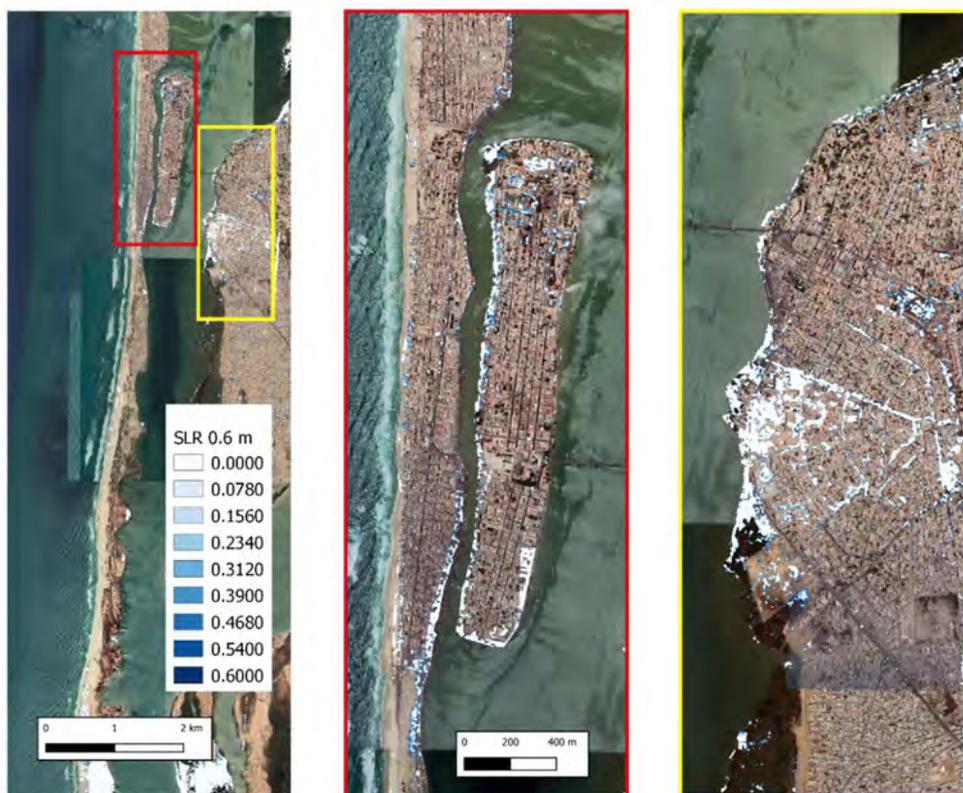


Figure 15 : Simulation cartographique des inondations en considérant le niveau de confiance le plus bas (0,6 m) pour le scénario RCP 8.5.

Dans la figure 16, qui représente un scénario d'élévation du niveau de la mer de 1,1 mètre, la région côtière est confrontée à des répercussions importantes, en particulier avec des zones sujettes aux inondations qui s'étendent tout le long de la flèche de sable. Notamment, la partie nord de l'île Saint-Louis subira un degré d'impact plus élevé. Dans ce scénario, l'île de Sor devrait affecter une plus grande zone, notamment dans les quartiers HLM et Leon, ainsi que dans le quartier des Balacoss. La zone inondée totale est égale à 5 kilomètres carrés.

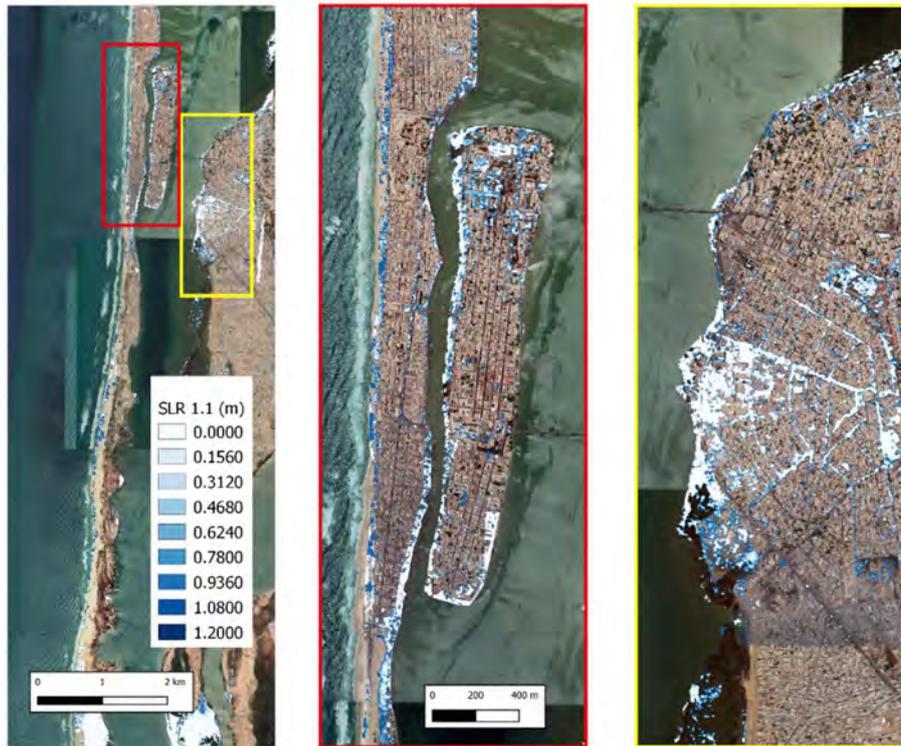


Figure 16 : Simulation cartographique d'inondation considérant le niveau de confiance supérieur (1,1 m) pour le scénario RCP 8.5.

### 3.1.1. Impact des tempêtes côtières extrêmes dans un scénario de 1,1 m de SLR

Considérant la tempête qui s'est produite en novembre 2018 avec une hauteur de vague maximale de 2,7 m et un niveau d'eau (marée, onde de tempête et anomalie d'élévation du niveau de la mer) de 0,44 m (figure 14). Ce scénario a utilisé une valeur de pente moyenne pour le littoral de St. Louis pour calculer le runup qui a engendré un niveau d'eau de 2,1 m. L'étendue de la zone inondable est présentée dans la figure 17. Les zones les plus touchées sont les quartier Goxu et Mbathe et N'Dar Toute avec une surface inondée de 2,1 km<sup>2</sup>.

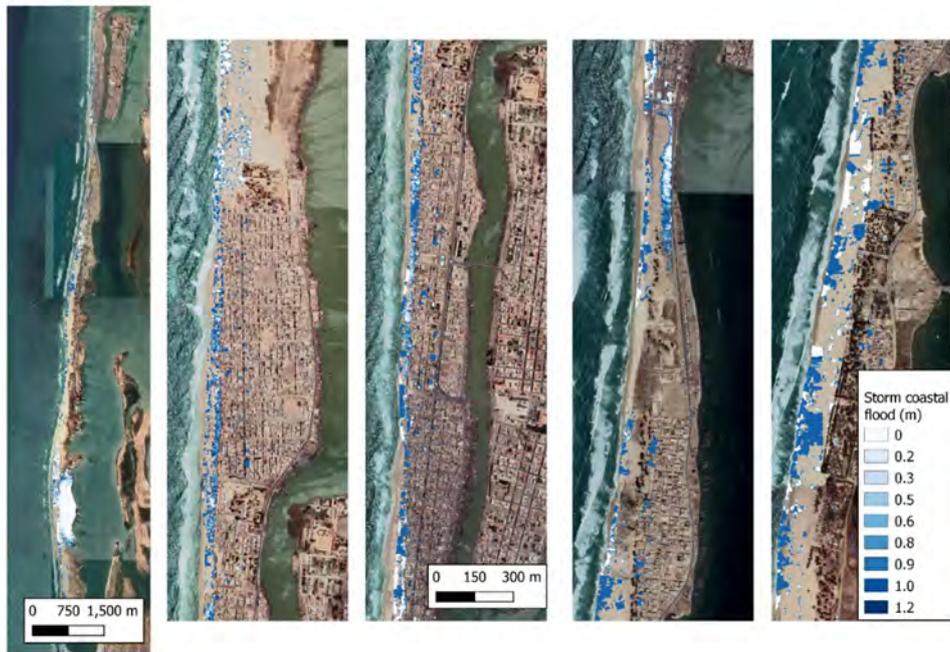


Figure 17 : Zone inondable compte tenu d'un SLR de 1,2 m plus le niveau d'eau maximum causé par une tempête côtière.

### 3.2. Modèle hydraulique fluvial.

Pour déterminer les zones inondables avec les différents scénarios dans le système fluvial, cette étude a utilisé le logiciel hydrologique HEC-RAS 2D. La figure 18 présente (a) les données topo-bathymétriques obtenues à partir du MNE Pléiades en combinaison avec des mesures bathymétriques in situ et des lignes iso numérisées manuellement. (b) Le modèle HEC-RAS 2D utilise un schéma de solution à volume fini qui utilise un maillage de calcul avec des conditions aux limites dans les zones de dérive et d'aval. (c) Les résultats obtenus ont été transformés en images matricielles.

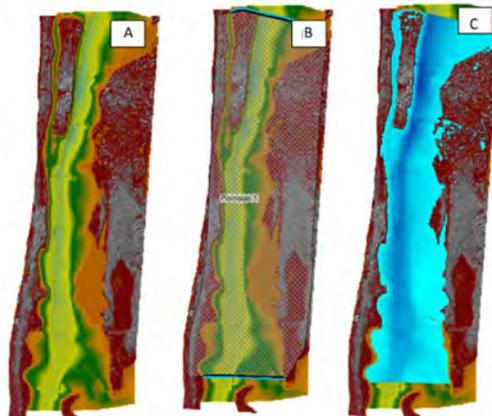


Figure 18 : Configuration du modèle 2D HEC-RAS qui contient (a) les données topo-bathymétriques (b) le maillage de calcul et les lignes de démarcation et (c) les résultats obtenus.

### 3.2.1. Résultats

Cette section présente les résultats des zones d'inondation potentielles en tenant compte de trois scénarios différents concernant l'élévation future du niveau de la mer (SLR). La figure 19 présente l'augmentation de 0,6 m avec un événement d'inondation extrême de la rivière avec une élévation de l'eau de 2,3 m. Dans ce scénario, les zones inondées se situeront principalement le long des rives de la Langue de Barbarie et à la périphérie du quartier nord de l'île de Saint Louis. L'île de Sor, où les quartiers de la Corniche et de Bayal seront significativement affectés le long des rives du fleuve. Particulièrement remarquable, les quartiers HLM, Leona et Cite Niakh subiront également l'impact des inondations. Dans l'ensemble, la zone affectée dans ce scénario est estimée à 2,3 km<sup>2</sup>

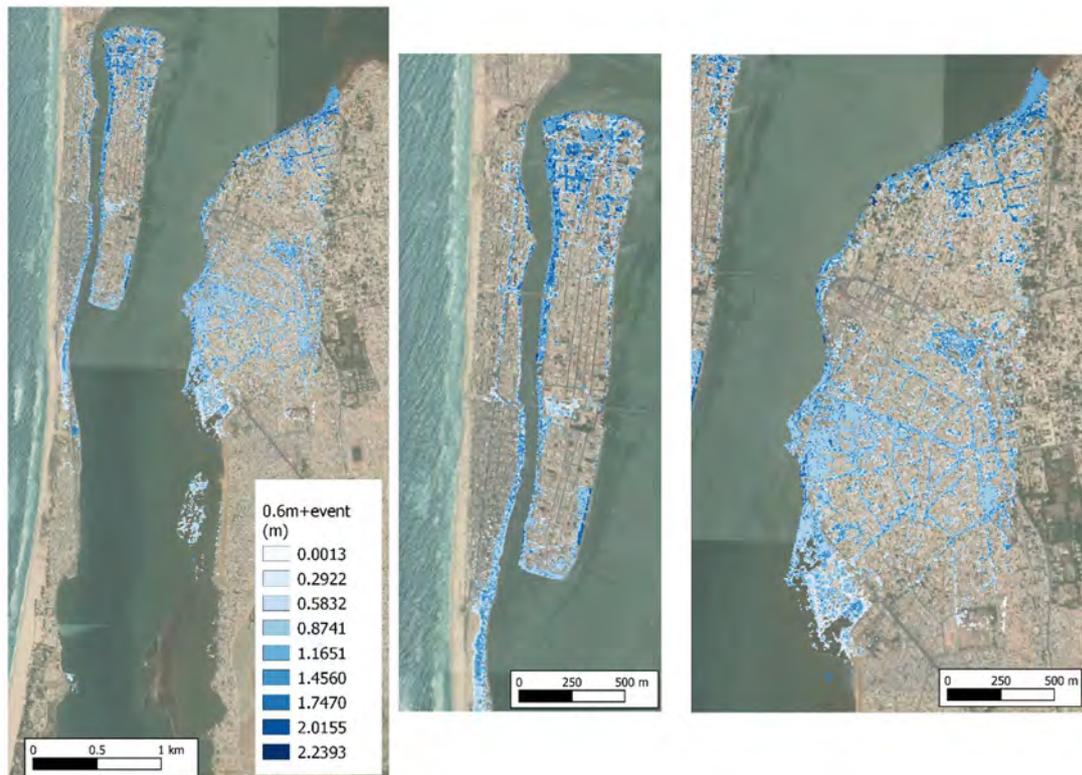


Figure 19 : Zone inondable riveraine considérant un SLR de 0,6 m avec un événement de niveau d'eau extrême de la rivière.

La figure 20 présente une augmentation de 1,2 m du SLR avec le même événement d'inondation extrême de la rivière. Dans ce scénario, les mêmes quartiers sont pratiquement couverts, mais avec des valeurs d'inondation plus élevées et une zone élargie totalisant désormais 3,5km<sup>2</sup>.

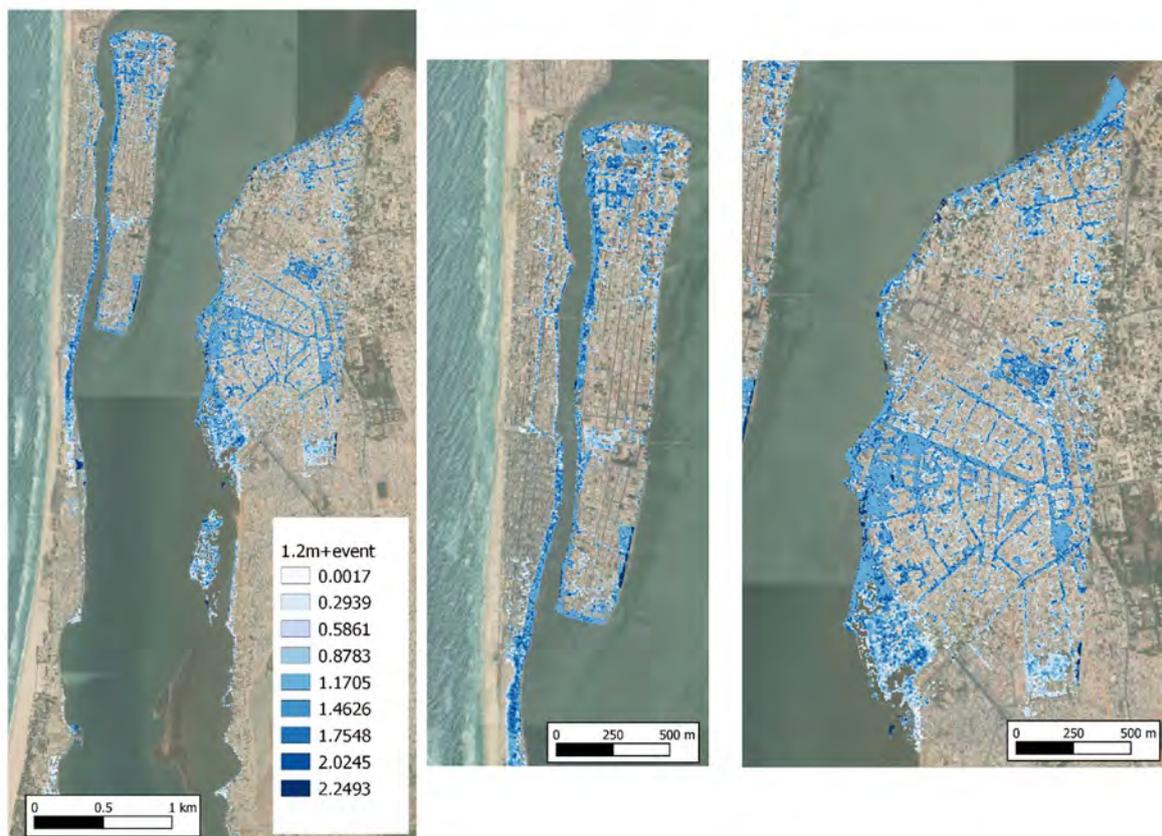


Figure 20 : Zone inondable en fonction d'un SLR de 1,2 m et d'un événement de niveau d'eau fluvial extrême.

La figure 21 présente le scénario le plus pessimiste. Ce scénario englobe trois facteurs clés : l'élévation du niveau de la mer, l'impact d'une tempête côtière et l'influence d'un niveau d'eau extrême causé par le fleuve. La section sud du quartier de Guet N'Dar dans la Langue de Barbarie connaîtra de graves inondations, en particulier là où l'étroite flèche de sable manque d'élévation significative. Sur l'île de Saint Louis, le quartier nord sera fortement touché, ainsi que certaines parties du quartier sud. Cependant, la zone la plus sévèrement touchée sera l'île de Sor, où pratiquement tous les quartiers seront affectés. En particulier, les quartiers HLM, Leona et Cité Niakh seront confrontés à des valeurs d'inondation plus élevées, atteignant jusqu'à 3 mètres. Dans ce scénario, on estime qu'environ 8,2 km<sup>2</sup> seront touchés.

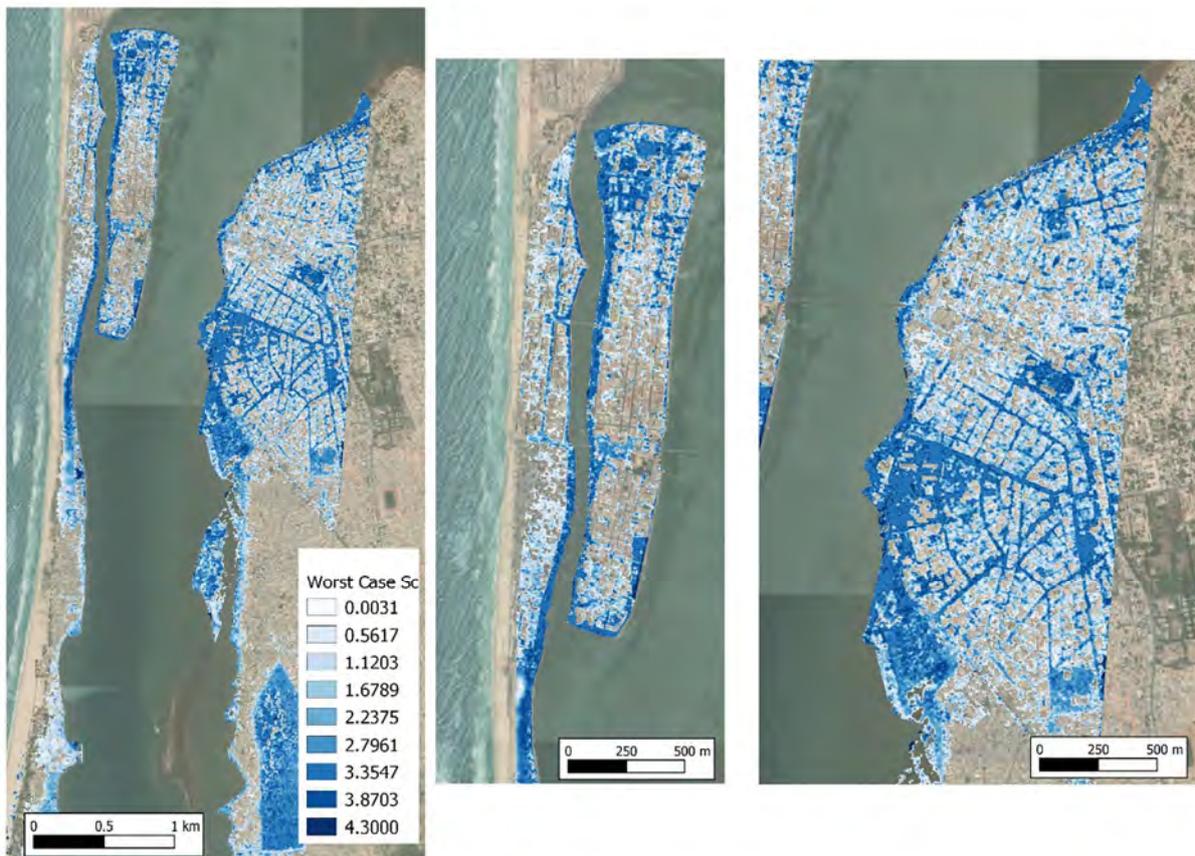


Figure 21 : Scénario le plus pessimiste envisageant une augmentation de 1,2 SLR avec la combinaison d'un événement de niveau d'eau fluvial extrême et d'une tempête côtière extrême.

#### 4. WP4 Outils et indicateurs opérationnels et transposables pour la gestion côtière

##### 4.1. Indice de vulnérabilité côtière à l'élévation du niveau de la mer (CVI)

L'indice de vulnérabilité côtière (CVI) considère les côtes micro-tidales comme étant très vulnérables à l'élévation du niveau de la mer. Cette hypothèse repose sur le fait que sur ces côtes, tel que le littoral sénégalais, le niveau de la mer est toujours proche de la marée haute. Par conséquent, en cas de déferlement, l'inondation est plus susceptible de se produire que sur les côtes macro-tidales, où l'inondation dépend davantage des conditions de marée pendant le déferlement (Pendleton et al., 2004).

La pente de la plage, le taux de changement du trait de côte et l'élévation présentent une variabilité spatiale le long de la côte et ont donc fortement influencé les résultats du CVI (Figure 22). L'indicateur géomorphologique, ainsi que les trois indicateurs liés à l'hydrodynamique ont donné des valeurs constantes sur l'ensemble de la zone d'étude. Pour l'indicateur Géomorphologie, la région entière faisant partie d'une flèche de sable, la valeur correspondante est VH. Pour l'indicateur taux d'élévation du niveau de la mer, le taux de 3,3 mm/an correspond à une valeur VH. L'indicateur hauteur moyenne des vagues correspond à une valeur VL avec  $H_s$  moyenne = 1,04 m, tandis que la valeur pour l'indicateur marnage est H, avec une valeur de 1,5 m (Tableau 2 et Figure 22).

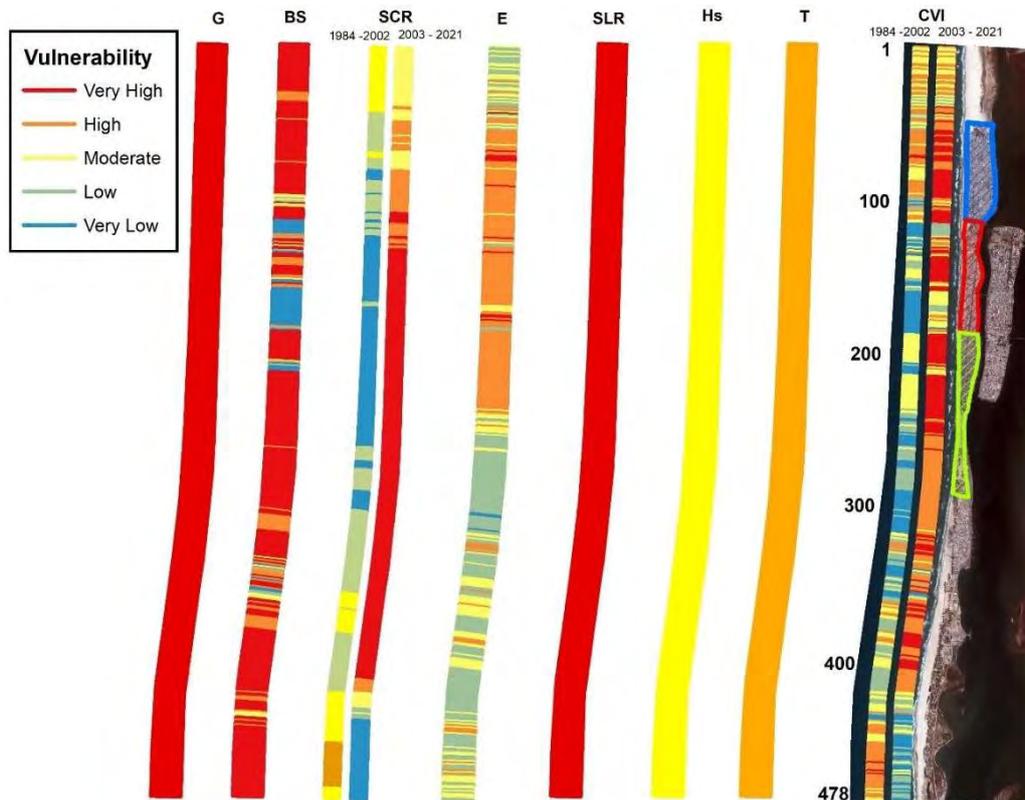


Figure 22 : Distribution spatiale des sept indicateurs pré-classifiés (G : indicateur géomorphologique, BS : indicateur de pente de plage, SCR : indicateur de taux de changement du trait de côte, E : indicateur d'élévation, SLR : Indicateur de taux d'élévation de niveau de la mer, Hs : Indicateur de la hauteur moyenne des vagues, T : Indicateur de l'amplitude de la marée et le CVI résultant pour la région de la Langue de Barbarie pour les périodes 1984-2002 et 2003-2021.

L'évaluation du CVI a été réalisée sur la période post-brèche qui correspond aux conditions actuelles de la dynamique sédimentaire du site d'étude. Près de 7 km (70 % des transects) de la bande côtière se situent dans les valeurs de vulnérabilité H et VH (Figure 12). Les quartiers de Goxu Mbathie (transects 44 - 111) et de Guet Ndar (transects 180 -244) présentent de grands étendus ayant des valeurs de vulnérabilité VH. Les valeurs des indices L et VL dans le sud correspondent à une zone marquée par d'importants dépôts de sédiments dus à la dérive littorale vers le sud (Figure 23).

A des fins de comparaison, l'évaluation du CVI pour la période pré-brèche (1984-2002) est également présentée dans la Figure 22. En revanche, la majorité des transects ont été classés dans les catégories de vulnérabilité M, L et VL, avec un nombre significatif de transects ayant des valeurs VL et L dans la partie centrale du site d'étude, tandis que les valeurs H se trouvent principalement sur les extrémités nord/sud de la flèche. Les valeurs de vulnérabilité VH ne représentent que 1% des transects (Figure 22).

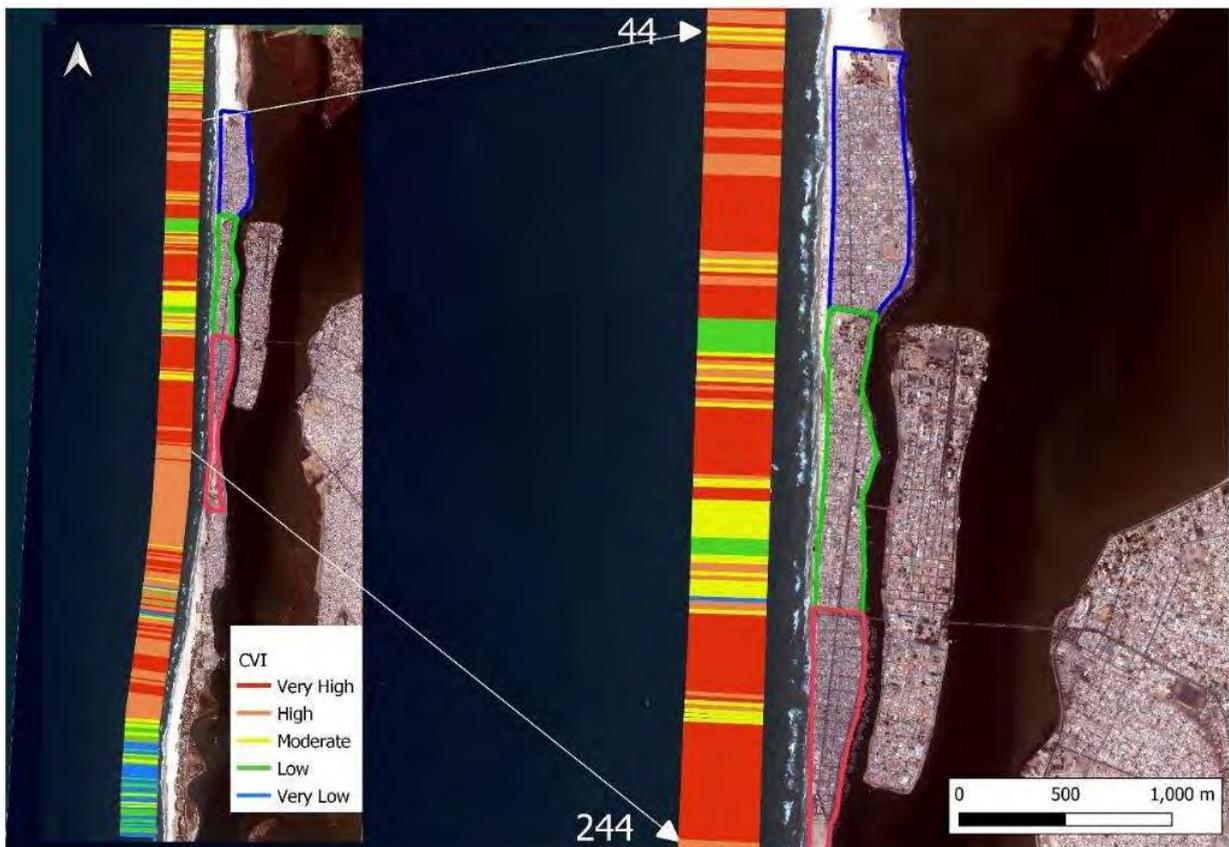


Figure 23. Distribution spatiale de l'évaluation de l'CVI pour la Langue de Barbarie, et gros plan de la section de la côte faisant face aux districts de Goxu Mbathie (bleu), N'Dar Toute (rouge), et Guet Ndar (vert).

#### 4.2. Indice de vulnérabilité aux inondations dues aux tempêtes extrêmes

Les résultats obtenus pour le FVI ont été obtenus en utilisant la tempête de novembre 2018 avec la configuration de la plage de mars 2021. Pour cet indice, une valeur H implique une atteinte proche du point le plus élevé du profil de la plage où un débordement est susceptible de se produire, une valeur M implique que l'ECWL atteindra jusqu'à 70% et la valeur L implique que l'ECWL atteindra jusqu'à 30% de l'élévation du profil de la plage, de sorte que le débordement est moins probable. Dans ces conditions, les résultats montrent que plus de la moitié de la plage (55%) ne sera probablement pas inondée (valeur d'inondation L) par l'impact de ce type de tempête extrême. Un pourcentage de 16% de la plage sera proche d'atteindre la valeur de vulnérabilité M et 29% atteindra les valeurs de vulnérabilité à l'inondation H (Figure 8). En ce qui concerne la distribution de la vulnérabilité aux inondations, les valeurs M étaient majoritaires dans la zone, tandis que les valeurs H étaient présentes principalement sur un tronçon de 2 km de la plage couvrant N'Dar Toute et les sections la section la plus au nord du quartier Get N'dar. Ceci est principalement dû aux valeurs de pente plus élevées, ou à la combinaison de valeurs de faible pente et de faible élévation (transects 112-208 dans la Figure 24). L'avantage de la méthodologie présentée est sa capacité à être mise à jour en utilisant les nouvelles configurations de plages disponibles (grâce à la haute résolution temporelle des images satellites) et en utilisant différentes tempêtes et leurs caractéristiques hydrodynamiques associées.

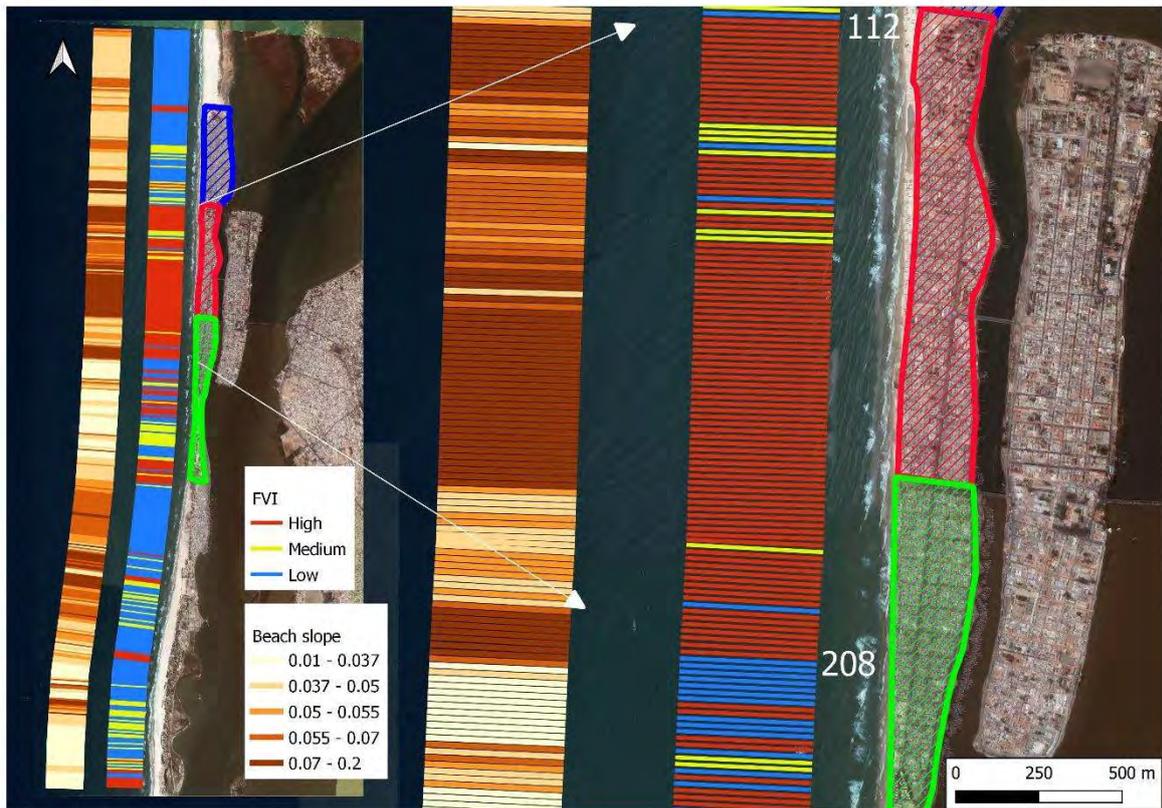


Figure 24 : Distribution spatiale de la pente de la plage et de l'indice de vulnérabilité aux inondations qui en résulte, évaluée pour la tempête de février 2018, en tenant compte de l'élévation de la plage en mars 2021, et d'un gros plan de la section de la côte qui fait face au quartier N'Dar Toute.

### 4.3. Cartographie de l'occupation des sols.

L'occupation des sols a été obtenue à partir de la même image multispectrale acquise par Pléiades en mars 2021 en utilisant une approche de segmentation orienté objet. Ces objets constituent des groupes de pixels adjacents qui présentent des caractéristiques spectrales similaires et qui sont regroupés dans un segment. Cette méthode de classification utilise une série d'étapes dont le résultat final est une carte d'occupation des sols (figure 25 et Annexe 1).

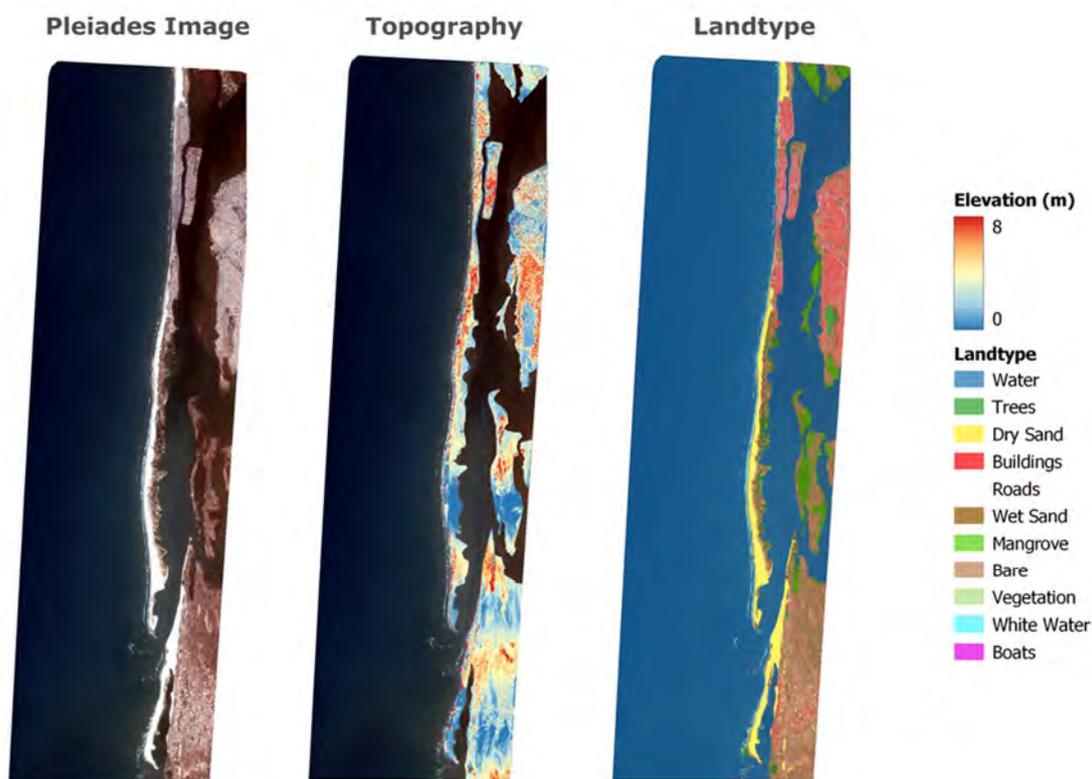


Figure 25 : Classification de types des sols.

Cette cartographie d'occupation de sol a été effectuée afin d'explorer à quel degré nous sommes capables de pousser cette analyse en n'utilisant que des images Pléiades. L'objectif principal est de combiner la carte d'occupation de sol avec le CVI et le FVI, mais aussi avec les simulations cartographiques d'inondations. Pour le CVI et le FVI, un polygone (buffer) de 20 m a été créé depuis la côte vers l'intérieur des terres. Le pourcentage de chaque type de sol à l'intérieur de ce polygone a été estimé (Figure 26). Pour chaque type de couverture de sol, nous avons calculé le pourcentage de sa surface correspondant à chacune des valeurs d'indicateurs : VL, L, M, H et VH pour le CVI et L, M et H pour le FVI.

La combinaison de l'occupation de sol aux simulations d'inondations a montré pour les zones urbanisées (Roads and Buildings), plus de 40 % appartiennent à un CVI de VH et à un FVI de H (Figure 26), ce qui montre que la partie de la côte qui est à risque est principalement constituée de zones urbaines (probablement peuplées). Pour les routes (figure 27) (qui sont un indicateur des zones urbaines peuplées), entre 5% et 10 % seraient inondées en cas d'élévation du niveau de la mer de 60 à 110 cm (en considérant que la zone de Saint-Louis conserve la même configuration topographique et d'occupation de sol qu'en 2021). Cependant, en cas d'événement extrême tel que la tempête de 2018, plus de 40 % des routes pourraient être inondées, ce qui est très alarmant.

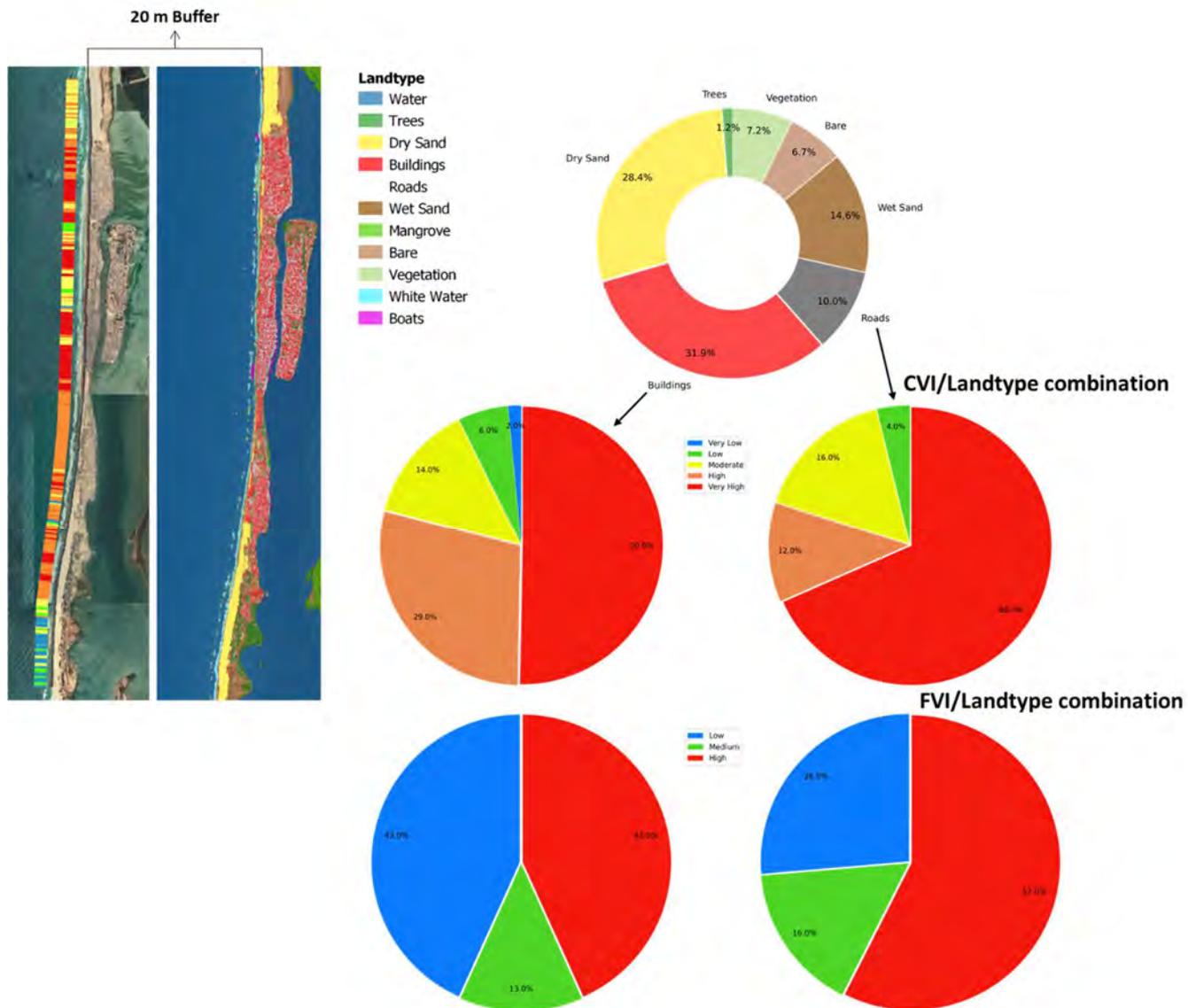


Figure 26 : Classification de types de sols et combinaison avec le CVI et le FVI.

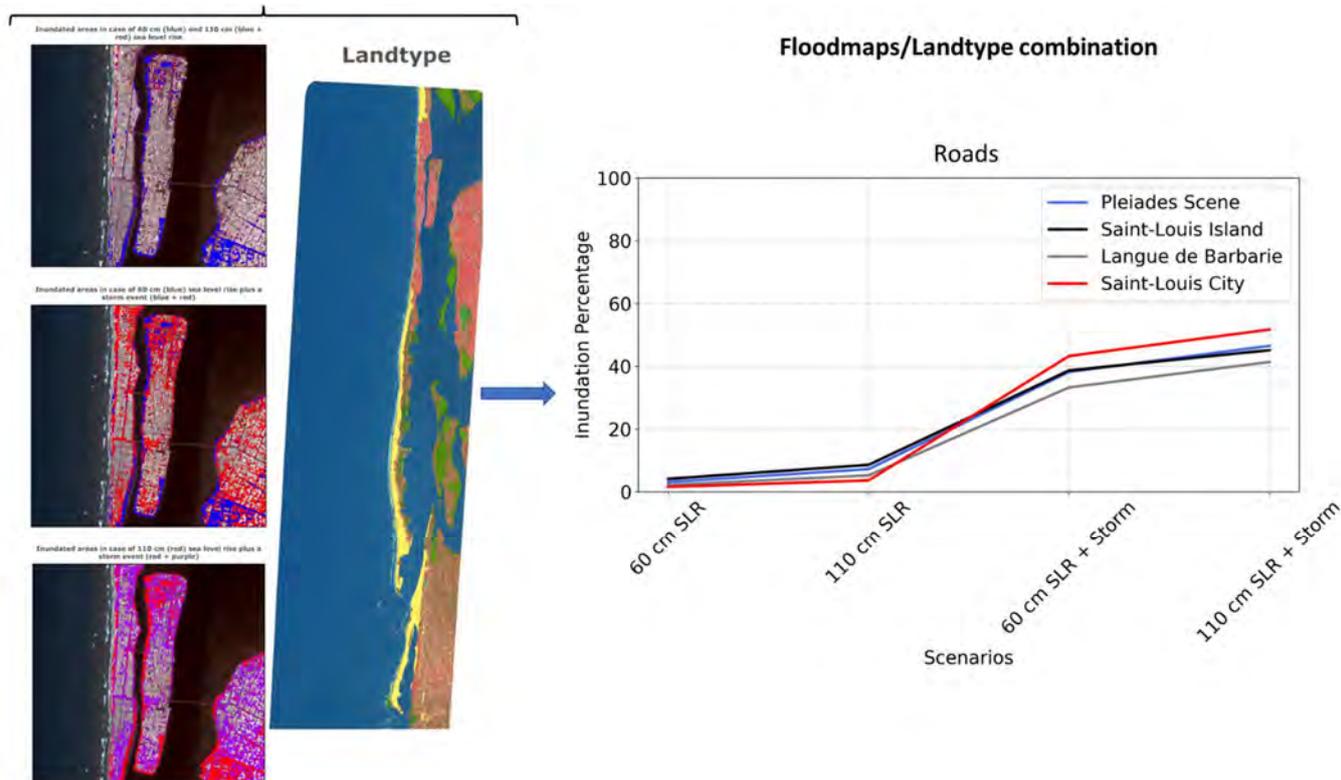


Figure 27 : Combinaison des scénarios d'inondation avec la carte d'occupation de sol et le pourcentage des routes qui seront probablement inondées pour chacun des scénarios.

#### 4.4. Activités économiques et infrastructures

Cette section présente l'analyse effectuée afin d'identifier les principaux enjeux du territoire. Cette analyse est basée des analyses de données ouvertes et des visites de terrain.

##### *Infrastructures essentielles et critiques*

Les classifications des sols à partir des données OpenStreetMap (OSM) uniquement ou du projet EO4SD-St Louis (EO4SD Urban Project, 2019), ne sont pas forcément adaptées pour une analyse de vulnérabilité urbaine, car cette dernière vise à identifier les éléments essentiels au fonctionnement d'un territoire ainsi que leur sensibilité aux différents aléas. Les composants physiques du système urbain sont les bâtiments, les rues, les parcs, le réseau de distribution d'eau, les magasins, les bâtiments industriels, le réseau électrique, les zones religieuses, etc. Certains d'entre eux représentent les actifs dont la ville a besoin pour fonctionner, tandis que d'autres fournissent des connexions entre les différents composants du système. Ainsi, les analyses de vulnérabilité urbaine et côtière (Batica, Hu, and Gourbesville, 2012; Gargiulo, C., Battarra, R., et Tremiterra, M., 2020) définissent des classes d'occupation du sol et indicateurs adaptés au contexte et à l'exercice. Par exemple, Batica, Hu, et Gourbesville (2012) définissent neuf fonctions urbaines principales que le système urbain doit posséder afin de répondre aux besoins fondamentaux des résidents. Il s'agit :

- du logement (individuel ou collectif),
- de l'éducation (pour les services d'éducation locaux et non locaux),
- de l'approvisionnement en nourriture (zone de stockage et de fourniture de nourriture),
- du travail (zones pour l'industrie et zones pour les activités non-industrielles),
- de la sécurité (police, pompiers et services de secours au niveau local),
- de la santé (hôpitaux au niveau local)
- de la gouvernance (organes administratifs),
- des loisirs et tourisme (au niveau local et non local) et

- des zones pour les activités religieuses (églises et cimetières).

Les approches décrites ci-dessus ont été adaptées par l'équipe projet pour développer une classification adaptée au contexte du territoire de Saint-Louis et aux données disponibles. Les cartes d'occupation de sol présentées ci-dessous ont été obtenues à partir des données OpenStreetMap 2022 et des images hautes résolutions de Google Maps 2023 (Landsat 8) qui ont été transcrites manuellement sur QGIS par un expert de RESALLIANCE.

Données Google maps : Les données Google s'appuient sur les images du satellite Landsat 8 (2022) et les données sur les différents lieux du territoire fournis par Google combinent des informations de différentes sources contenu Web exploré, données sous licence provenant de tiers, contribution des utilisateurs, informations basées sur les interactions de Google avec un lieu à proximité ou un établissement local.

La comparaison des données OSM et Google maps, qui localisent des infrastructures à partir des informations de contributeurs volontaires et des images satellitaires a montré que les données étaient parfois incorrectes ou plus valides (e.g. un hôpital localisé sur un terrain vague d'après les images satellitaires de 2022). Nous avons donc sélectionné les infrastructures présent dans les jeux de données de OSM et Google (notamment visibles sur les images de caméra Google Street view 2022) et sur les images satellites.

Pour créer une classification des infrastructures de Saint-Louis, l'équipe projet s'est servi de son expertise en diagnostic de vulnérabilité des infrastructures (bâtiments, équipement industriels, routes, etc.) et de sa compréhension des spécificités de territoire (notamment acquises lors de la visite de terrain d'octobre 2022). Les figures suivantes présentent quelques photos de cette visite de terrain (voir l'Annexe pour plus de photos).

Pont Ousmane Masseck Ndiaye



Figure 28 : Photos du pont Ousmane Masseck Ndiaye, prises lors de la visite de terrain d'octobre 2022

Bâtiments en bordure du fleuve Sénégal sur l'île de St Louis potentiellement exposés aux risques d'inondation, Poste électrique (à gauche) et habitation avec monde constructif visible (béton armé et parpaings)



Figure 29 : Photos d'infrastructures, prises lors de la visite de terrain d'octobre 2022

La classification proposée est décrite ci-après. Elle distingue les infrastructures liées aux fonctions urbaines essentielles et les infrastructures de gestion de crises (ou première urgence). Les infrastructures liées aux fonctions urbaines principales ont été classées en cinq catégories :

- Secteur tertiaire (banque et assurances)
- Loisirs et tourisme
- Éducation (local)
- Religion
- Nourriture (point de vente, filière de pêche)

Les infrastructures de gestion de crise ont-elles été classées en trois catégories :

- Sécurité (Police, armée, pompiers)
- Santé (hôpital)
- Transport

Il est à noter que les loisirs et le tourisme ont été inclus dans les fonctions urbaines principales car il s'agit d'une des sources de revenu principal de la ville avec la pêche. De même il aurait été également possible d'inclure la fonction nourriture dans la gestion de crise. Dans le cas présent, nous avons considéré la filière nourriture en général, mais pas forcément les vivres en cas de tempêtes qui pourront transiter par les pompiers et policiers.

Les différentes fonctions ont ensuite été renseignées selon leur niveau d'élévation dans le bâtiment (RDC ou R+), qui a été lui-même évalué à partir de la visite de terrain et des informations Google (photos et Google Street View). Cette information sera ensuite utilisée pour déterminer la sensibilité de l'infrastructure aux inondations. Les cartes ci-dessous présentent le résultat de cette analyse.

D'après l'analyse de la carte des différents enjeux urbains, on peut y observer le large nombre de fonctions se trouvant en rez-de-chaussée notamment sur la langue de Barbarie. De la même manière, sur la partie continentale de la ville (Sor), les fonctions sont en grande partie présentes en RDC avec quelques exceptions admettant des niveaux plus élevés. Étant donné son architecture datant de l'époque coloniale l'île de Saint-Louis abrite de nombreux bâtiments en R+1 ou R+2 avec un rez-de-chaussée occupant une fonction commerciale (comme le montre la Figure suivante).



Figure 30 : Exemple de bâtiment de l'île Saint-Louis (Source : Bureau du Patrimoine, 2015)

Les instances de premières urgences (ou gestion de crise) sont présentes sur l'île de Saint-Louis ainsi que sur sa partie continentale mais on remarque un manque d'instance de santé ainsi que de sécurité sur la langue de Barbarie. Cette répartition géographique des infrastructures est sûrement dû au développement historique de la ville, qui était centré sur l'île.

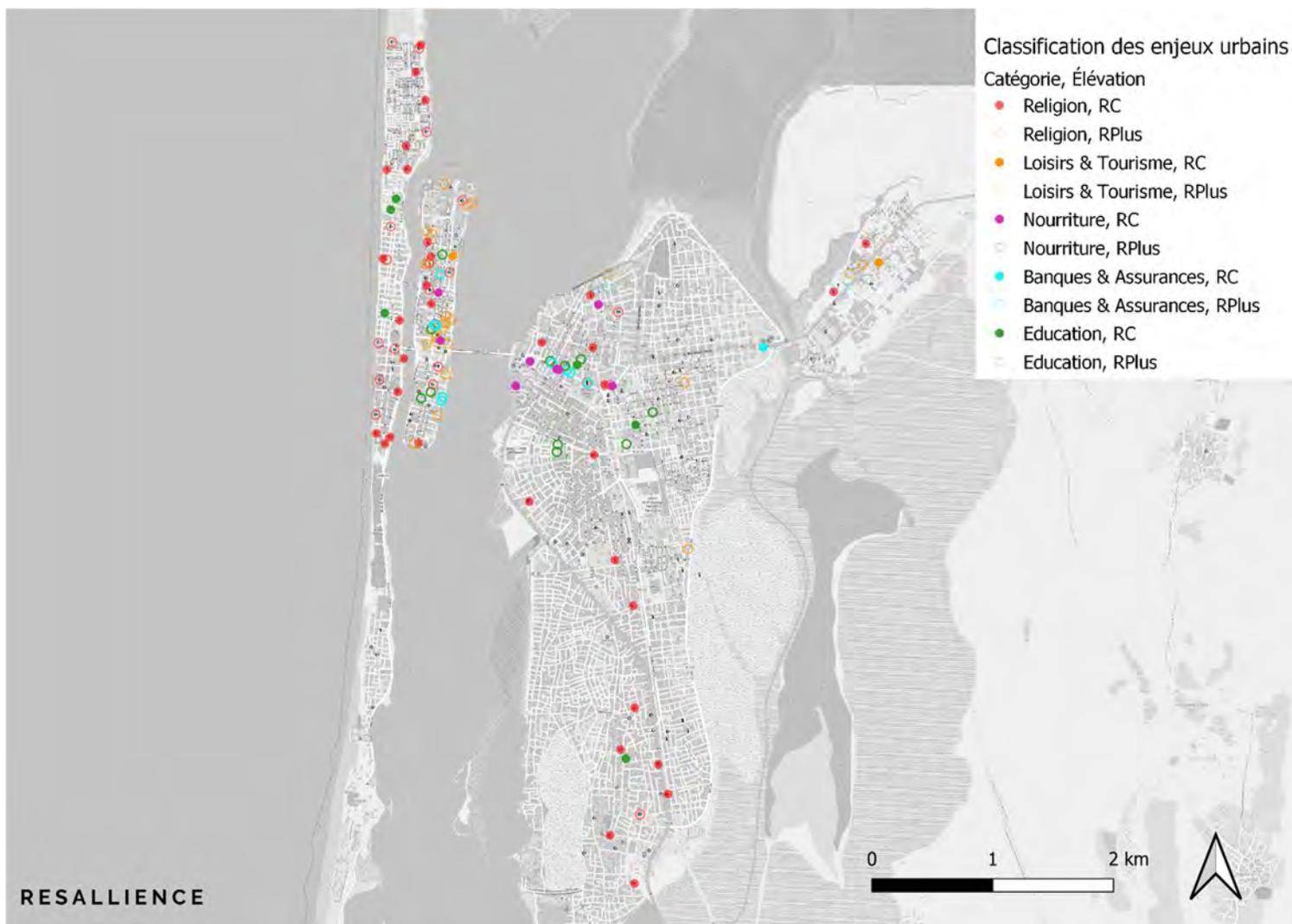


Figure 31 : Classification des bâtiments supportant les fonctions urbaines essentielles de Saint-Louis (Fond de carte : OSM, 2022) ; RPlus = bâtiments ayant un étage ou plus

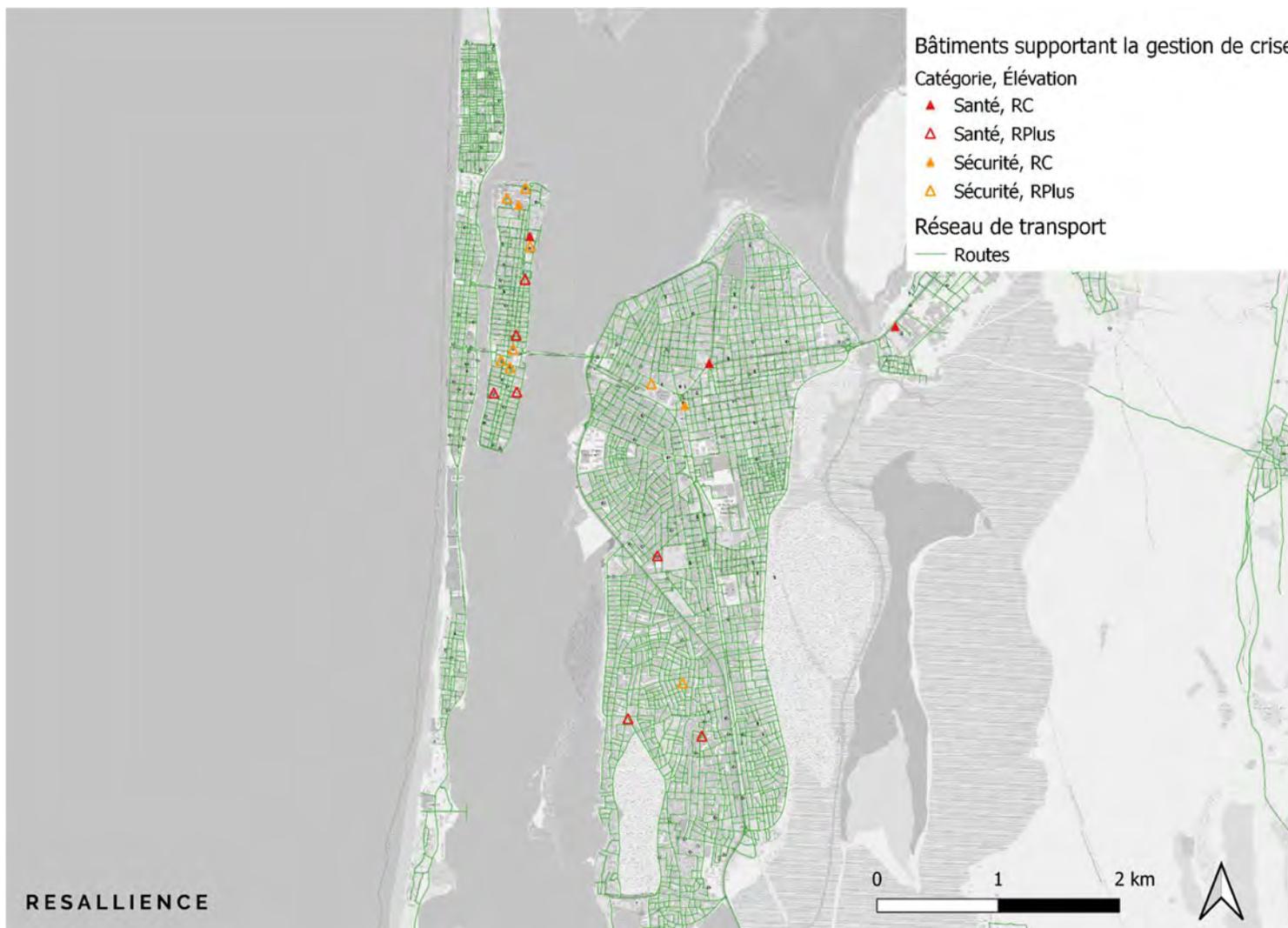


Figure 32 : Classification des infrastructures de gestion de crise de Saint-Louis (Fond de carte : OSM, 2022)

## Quartiers de Saint-Louis

Un découpage géographique du territoire de Saint-Louis en quartiers (Figure suivante) a été considéré et implémenté dans un SIG afin d'identifier les quartiers les plus vulnérables dans un contexte de changement climatique.

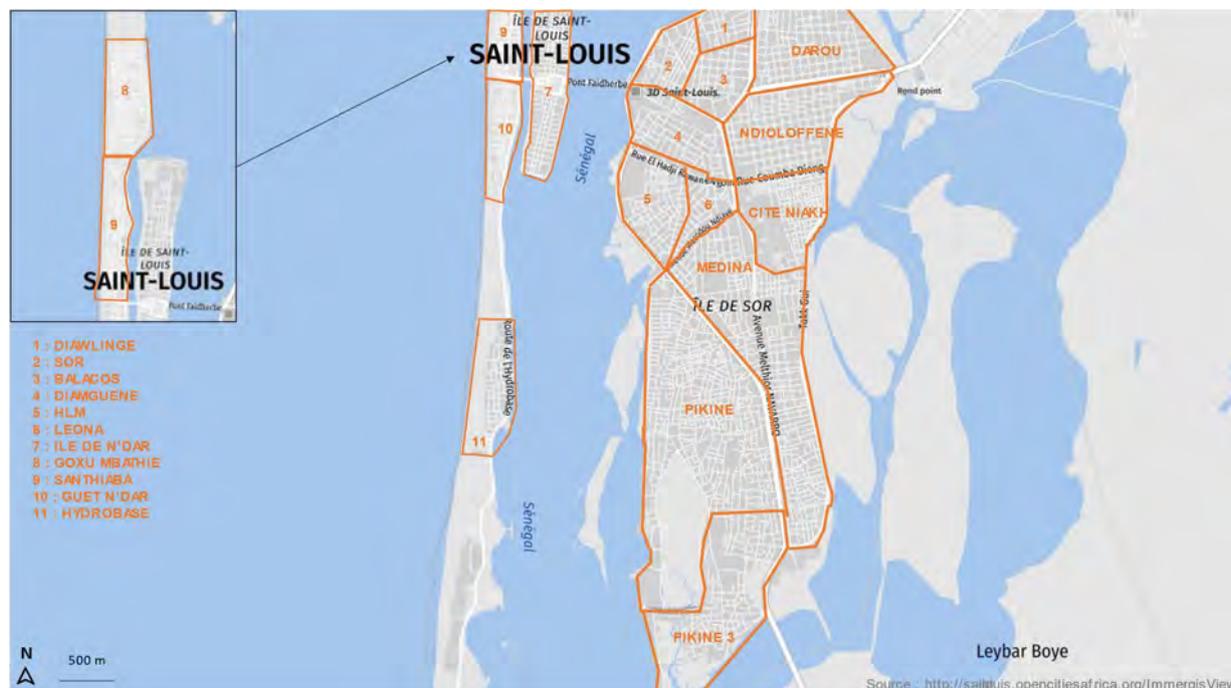


Figure 33 : Découpage de la zone d'étude qui sera utilisé pour produire les indicateurs de vulnérabilité des quartiers, Open Cities Saint-Louis (2019).

### 4.5. Exposition des enjeux à partir de données satellitaires dans un contexte de changement climatique

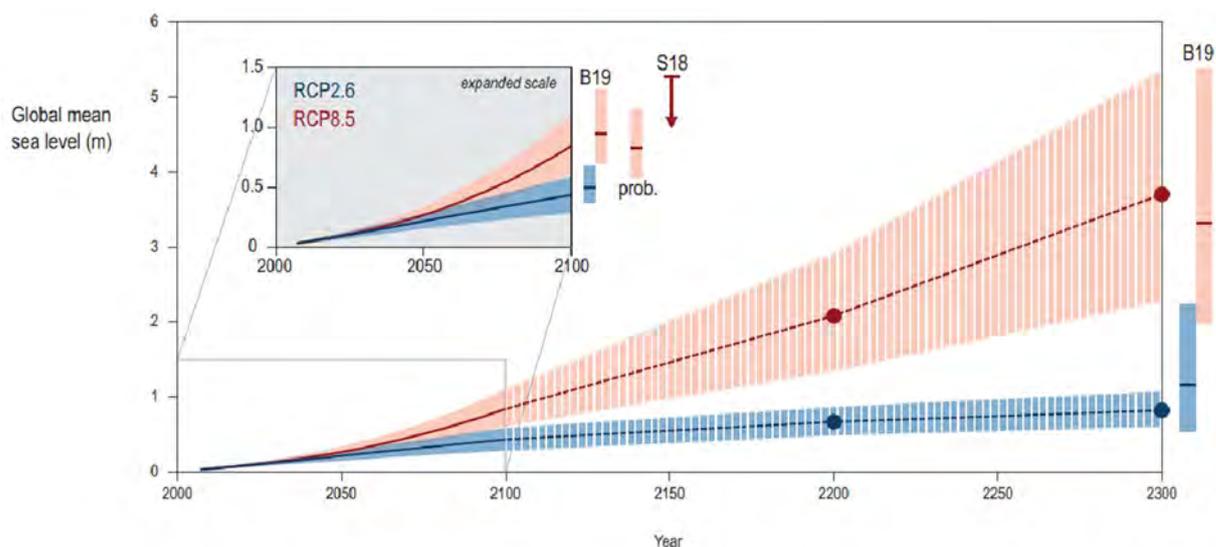
Cette section présente l'exposition des enjeux principaux du territoire à l'aléa inondation dans un contexte de changement climatique. Les quatre scénarii d'inondation par submersion marine et tempêtes sont issus des Work Package 1 à 3. Ces scénarii sont les suivants :

- Scénario d'élévation de niveau marin de 60 cm (GIEC : scénario optimiste d'élévation de la moyenne de niveau marin en 2100)
- Scénario d'élévation de niveau marin de 110 cm (GIEC : scénario pessimiste)
- Scénario d'élévation de niveau marin de 60 cm + 210 cm dû à une tempête similaire à la tempête de 2018 (Nov/2018 pour une durée de 2.1 jours)
- Scénario d'élévation de niveau marin de 110 cm + 210 cm dû à une tempête similaire à la tempête de 2018

Ces valeurs d'élévation du niveau de la mer prennent en compte le scénario RCP8.5 (ou Representative Concentration Pathway 8.5) du cinquième rapport d'évaluation du GIEC—Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (2013). Pour rappel ce scénario RCP est issue des modèles prédictifs du GIEC sur l'évolution du climat. Il représente une valeur de forçage radiatif possible en 2100 (8,5 W/m<sup>2</sup>). Le scénario RCP8.5 est basé sur une augmentation continue des émissions de GES tout au long du 21e siècle. Il est admis dans la communauté scientifique que les simulations CMIP5 forcées par le scénario intermédiaire (RCP4.5) sous-estiment l'augmentation

moyenne de la température mondiale mesurée au cours de la dernière décennie : les températures moyennes observées sont plus élevées que celles prévues par le scénario intermédiaire. Le réchauffement moyen observé au cours de la dernière décennie correspondrait davantage aux simulations CMIP5 forcées par le scénario RCP 8.5. La prise en compte de ce scénario est donc essentielle pour une évaluation complète de l'exposition.

Les valeurs de 0.6 et 1.1 m sont les deux valeurs extrêmes (min et max) d'élévation globale de la mer du scénario RCP8.5 et sont issues du Rapport spécial sur l'océan et la cryosphère dans un climat en évolution du GIEC (2019). Il convient d'indiquer que la connectivité hydraulique n'a pas été prise en considération. Les résultats de la simulation cartographique sont donc à interpréter avec prudence.



**Figure 4.2 |** Projected sea level rise (SLR) until 2300. The inset shows an assessment of the *likely* range of the projections for RCP2.6 and RCP8.5 up to 2100 (*medium confidence*). Projections for longer time scales are highly uncertain but a range is provided (4.2.3.6; *low confidence*). For context, results are shown from other estimation approaches in 2100 and 2300. The two sets of two bars labelled B19 are from an expert elicitation for the Antarctic component (Bamber et al., 2019), and reflect the *likely* range for a 2°C and 5°C temperature warming (*low confidence*; details section 4.2.3.3.1). The bar labelled “prob.” indicates the *likely* range of a set of probabilistic projections (4.2.3.2). The arrow indicated by S18 shows the result of an extensive sensitivity experiment with a numerical model for the Antarctic Ice Sheet (AIS) combined, like the results from B19 and “prob.”, with results from Church et al. (2013) for the other components of SLR. S18 also shows the *likely* range.

Figure 34 : Élévation globale du niveau de la mer selon les scénarios RCP2.6 et RCP8.5, figure extraite du Rapport spécial sur l'océan et la cryosphère dans un climat en évolution du GIEC (2019).

Les cartes issues des quatre scénarios (ci-dessus) sont présentées ci-dessous.

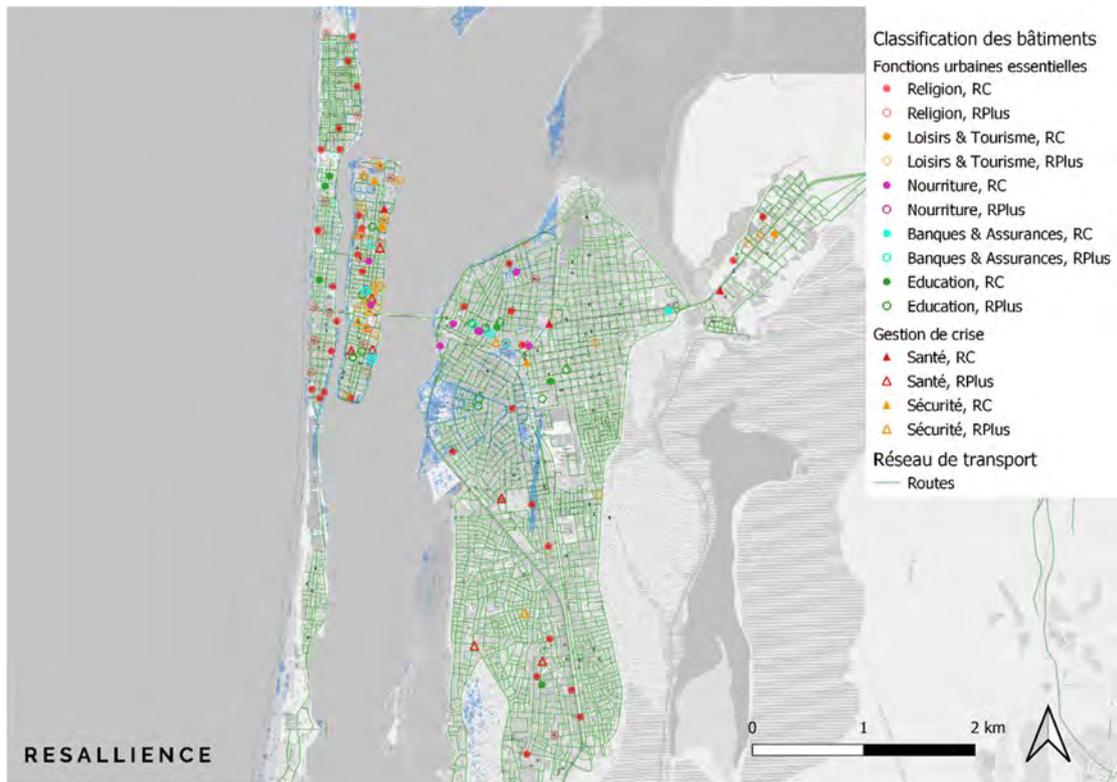


Figure 35 : Submersion marine à Saint-Louis par élévation de la mer selon le scénario d'élévation de niveau marin de 60 cm -scénario optimiste d'élévation de la moyenne de niveau marin en 2100 du GIEC

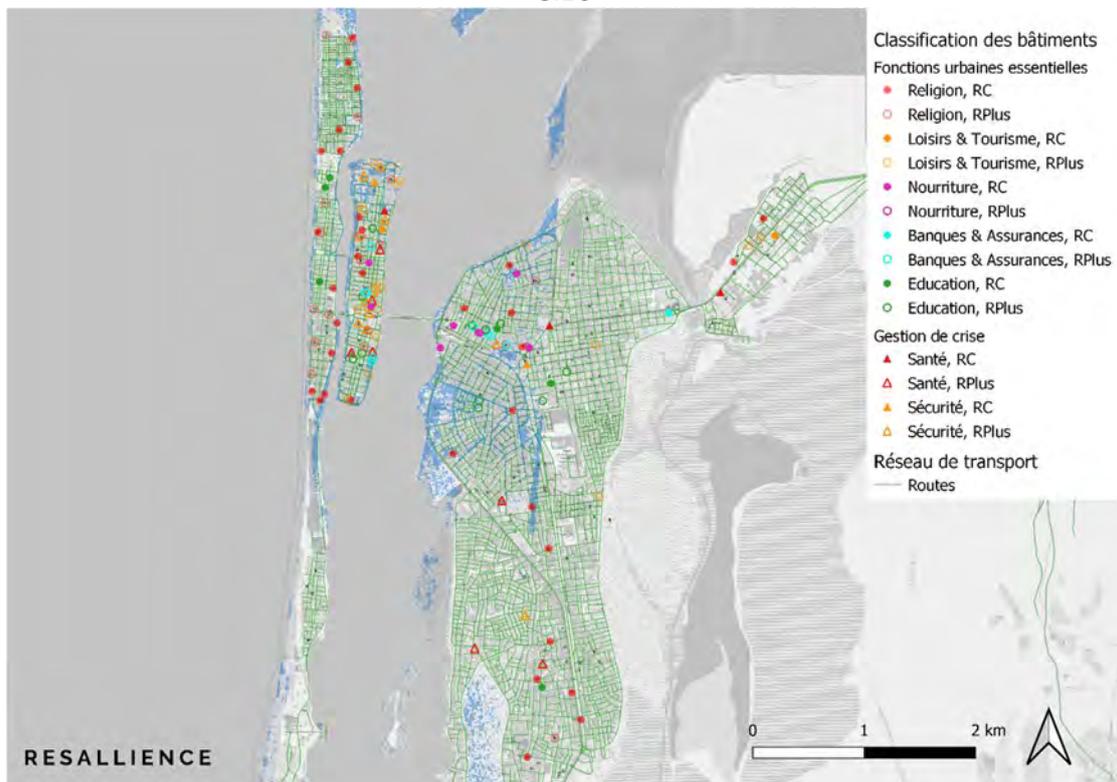


Figure 36 : Submersion marine à Saint-Louis par élévation de la mer selon le scénario d'élévation de niveau marin de 110 cm - scénario pessimiste d'élévation de la moyenne de niveau marin en 2100 du GIEC

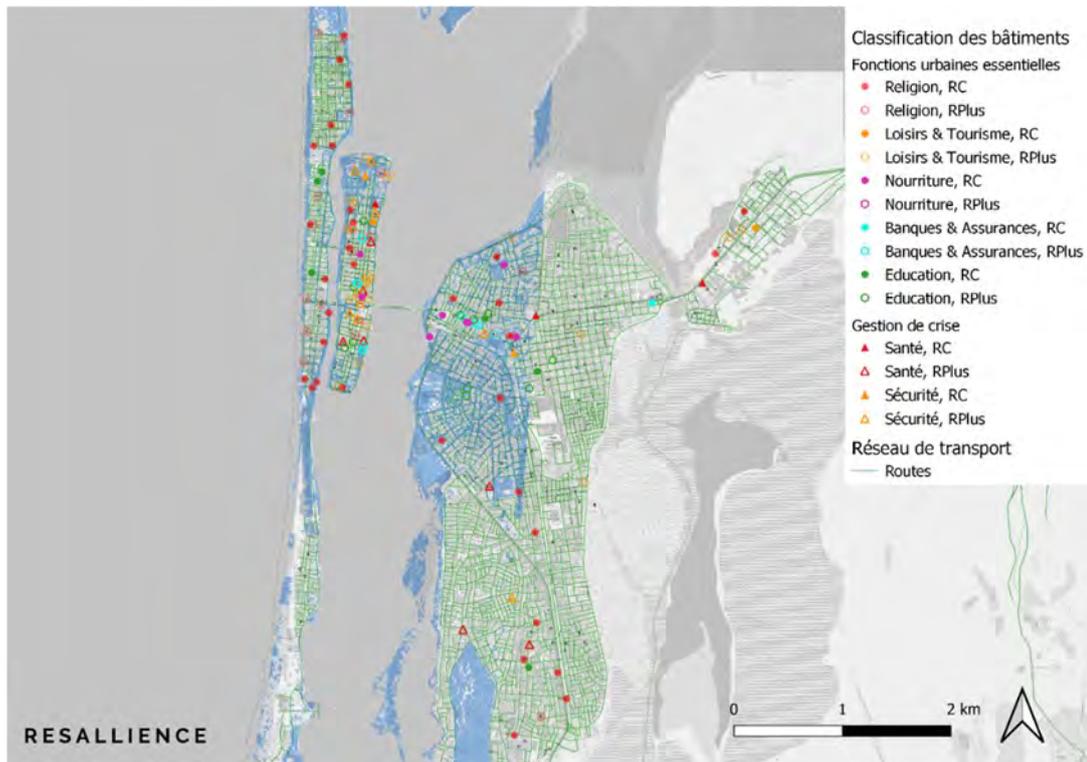


Figure 37 : Submersion marine à Saint-Louis par élévation de la mer selon le scénario d'élévation de niveau marin de 60 cm + 210 cm dû à une tempête similaire à la tempête de 2018

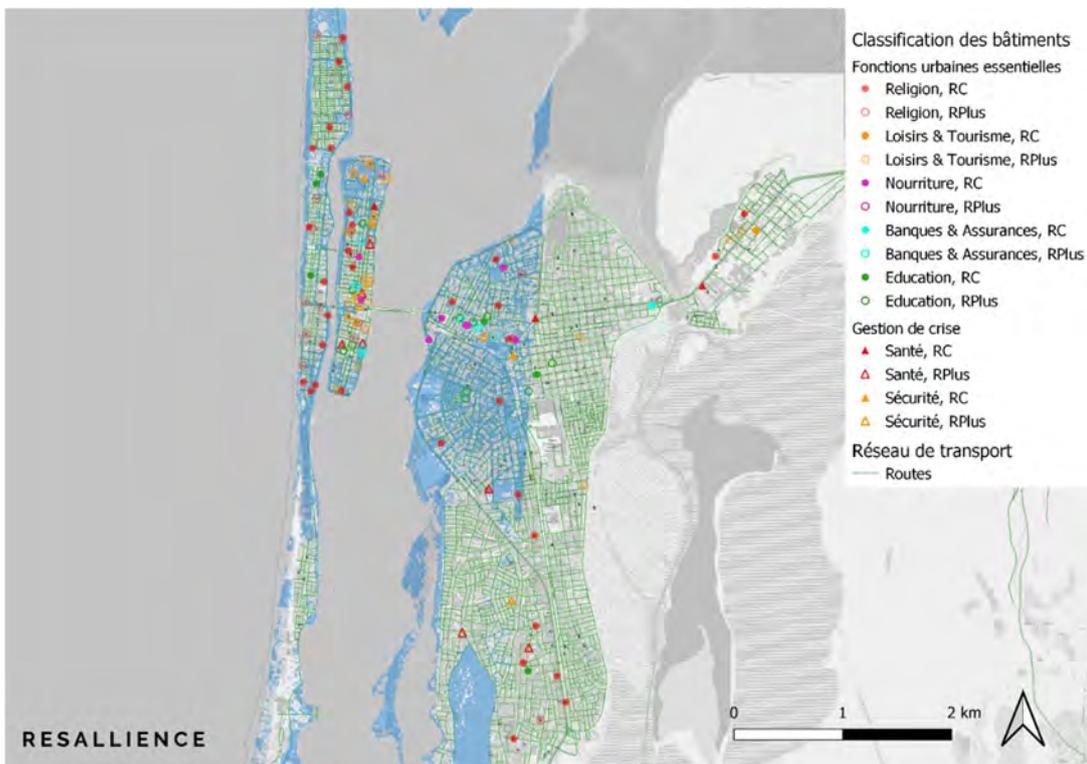


Figure 38 : Submersion marine à Saint-Louis par élévation de la mer selon le scénario d'élévation de niveau marin de 110 cm + 210 cm dû à une tempête similaire à la tempête de 2018

En analysant les différentes cartes, en particulier celle basée sur le scénario d'élévation de niveau marin de 110 cm + 210 cm on remarque la vulnérabilité des différentes entités de premières urgences telles que les hôpitaux, la caserne de pompiers ou encore les commissariats de police qui sont directement impactés par la montée des eaux. De la même manière, les enjeux urbains localisés en

rez-de-chaussée sont presque tous impactés sur la langue de Barbarie, l'île de Saint- Louis et la partie continentale de la ville. A contrario, seuls les bâtiments admettant des niveaux plus élevés (R+1, R+2) présents sur l'île de Saint-Louis paraissent éviter les zones d'inondations présentés. En effet, étant donné son architecture datant de l'époque coloniale l'île de Saint-Louis abrite de nombreux bâtiments en R+1 ou R+2 avec un rez-de-chaussée occupant une fonction commerciale.

D'après les quatre différentes cartes présentées ci-dessus, on observe une différence significative entre les cartes représentant uniquement les scénarios d'élévation du niveau marin et ceux incluant aussi une tempête similaire à celle de 2018. En effet, en considérant uniquement le niveau d'élévation marin de 60 cm on distingue des zones inondées le long de la côte ouest de l'île de Saint-Louis mais aussi le long de la côte Sud. De manière similaire, la partie continentale de la ville est exposée au phénomène de submersion marine mais de manière assez ciblée sur la route de la Corniche au Nord dans le quartier HLM sur la côte ouest. En considérant le scénario d'élévation marin de 110 cm cette fois ci, les mêmes zones que celles identifiées dans le scénario d'élévation marin de 60 cm sont affectés avec en plus des zones sur les parties Est et Ouest de la langue de Barbarie et la large zone inondable du Sud de la partie continentale de la ville. Lorsque nous analysons maintenant les cartes combinant les phénomènes d'élévation du niveau marin, les 3 composantes de la ville que sont la langue de Barbarie, l'île de Saint-Louis et la partie continentale sont plus largement affectés. En effet, en observant la figure présentant la situation d'élévation du niveau marin de 60 cm compilé à la simulation de tempête de 210 cm, on voit que les zones d'inondations s'étalent sur toute la partie Nord de l'île de Saint-Louis mais aussi sur toute la partie Nord-Est de la partie continentale de la ville alors que la langue de Barbarie se retrouve encore plus largement touchée sur ses deux côtes. Enfin, dans le scénario d'élévation du niveau marin de 110 cm compilé à la simulation de tempête de 210 cm, les mêmes zones semblent atteintes mais de manière plus dense i.e. toutes plus des rues sont inondées par rapport au scénario précédent.

Concernant les enjeux, on remarque notamment dans le scénario 110+210cm que les différentes entités de premières urgences telles que les hôpitaux, la caserne de pompiers ou encore les commissariats de police sont directement impactés par la montée des eaux car en zone submergées. De la même manière, les enjeux urbains localisés en rez-de-chaussée sont presque tous impactés sur la langue de Barbarie, l'île de Saint-Louis et la partie continentale de la ville. A contrario, seuls les bâtiments admettant des niveaux plus élevés (R+1, R+2) présents sur l'île de Saint-Louis paraissent éviter les zones d'inondations présentées.

Dans la suite de l'analyse, nous nous concentrons sur les scénarii pessimistes (hypothèse conservatrice) d'élévation de 110 cm et 110cm + 210cm. Le tableau suivant présente des statistiques sur l'exposition des différentes infrastructures essentielles et de gestion de crise dans ces deux scénarii. On remarque que l'exposition est limitée dans le scénario de 110 cm (Figure 35) pour la plupart des fonctions urbaines et de gestion de crise sauf pour le secteur tertiaire (>20%) et le transport (23,12% des routes exposées. Dans le scénario de 110cm +210 cm (Figure 37), l'exposition progresse dans toutes les catégories pour atteindre un pourcentage entre 10 et 70%. Les fonctions de gestion de crise (Santé et Sécurité) qui sont les plus critiques dans un tel scénario (i.e. tempête similaire à celle de novembre 2018 en plus de l'élévation de la mer de 110cm à horizon 2100) sont exposées de manière très différente avec 10% pour la Santé et 70% pour la sécurité.

*Tableau 3 : Nombre et pourcentages des infrastructures essentielles et de gestion de crise exposées à l'aléa inondation*

<b>Fonctions urbaines essentielles et</b>	<b>Nombre d'infrastructures exposées à la submersion marine par élévation de la mer de 110 cm</b>	<b>Nombre d'infrastructures exposées à la submersion marine par élévation de la mer de 110 cm</b>

gestion de crise	(longueur des routes pour le transport)	+ 210 cm dû à une tempête (longueur des routes pour le transport)
Secteur tertiaire	2 (20%)	3 (30%)
Loisirs et tourisme	1 (3,7%)	9 (33,33%)
Éducation	2 (11,76%)	5 (29,41%)
Religion	4 (7,55%)	25 (41,17%)
Nourriture	0 (0,00%)	3 (33,33%)
Santé	1 (10,00%)	1 (10%)
Sécurité	2 (20,00%)	7 (70%)
Transport	131,83 km (23,12%)	181,36 km (31,81%)

#### 4.6. Indicateurs de vulnérabilité des infrastructures et du territoire à partir de données satellitaires dans un contexte de changement climatique

Pour évaluer la vulnérabilité du territoire de Saint-Louis aux inondations, nous avons développé plusieurs approches et indicateurs qui croisent la cartographie des infrastructures essentiels et de gestion de crise du territoire et les aléas. Les indicateurs proposés ont été spécialement développés par RESALLIANCE dans le cadre de ce projet en fonction des objectifs et données disponibles. Des approches similaires ont été développées dans la littérature par exemple dans (Ibrahim et al. 2017) ou (Batica, J. Hu, F. et Gourbesville., P., 2012).

##### 4.6.1. Vulnérabilité des infrastructures aux aléas submersion marine et tempête dans un contexte de changement climatique

###### Indicateur de vulnérabilités des bâtiments supportant les fonctions essentielles du territoire et la gestion de crise

La vulnérabilité d'une infrastructure mesure le degré auquel l'infrastructure (et sa fonction) est susceptible de subir des dommages en raison de son exposition à un aléa. La vulnérabilité de l'infrastructure est la combinaison de son exposition (c'est-à-dire la nature et le degré d'exposition d'un système à des variations climatiques importantes) et de sa sensibilité (c'est-à-dire l'amplitude des dommages potentiels qui pourraient être causés par un aléa climatique donné). L'évaluation de la vulnérabilité des infrastructures nécessite des données sur l'aléa climatique (emplacement, intensité,

fréquence et durée) ainsi que sur l'emplacement des infrastructures et leur sensibilité à un aléa donné (qui dépend des caractéristiques physiques des infrastructures, par exemple l'élévation de la route par rapport au terrain naturel). Dans le cas des bâtiments liés aux fonctions urbaines principales et à la gestion de crise, l'exposition et la sensibilité de l'infrastructure aux inondations ont été considérées et combinées de la manière suivante :

*Vulnérabilité = Sensibilité (élévation du bâtiment) \* Exposition (localisation en dehors ou à l'intérieur des zones inondées)*

*Tableau 4 : Critères utilisés pour le calcul de l'indicateur de vulnérabilité physique des infrastructures liées au fonctions urbaines principales de Saint-Louis du Sénégal*

Vulnérabilité	Exposition = 0 (Bâtiments en dehors des zones inondées)	Exposition = 1 (Bâtiments à l'intérieur d'une zone inondée)
Sensibilité =1 (Bâtiments ayant un étage ou plus)	0	1
Sensibilité = 2 (Bâtiments en RC uniquement)	0	2

Cet indicateur varie de 0 à 2 et permet de distinguer les bâtiments capables de fonctionner en mode dégradé (ayant un étage pouvant abriter des personnes et du matériel en cas d'inondation) des autres. Dans le cas de l'indicateur inondation par débordement, on calcule également la vulnérabilité des infrastructures en multipliant exposition et sensibilité.

Dans un cas général, la sensibilité peut être complexifiée et prendre par exemple en compte la présence ou non de fenêtres sur les toits (permettant de secourir les populations lorsque les portes et fenêtres sont bloquées par les eaux, Tableau suivant). Par manque d'informations, dans le cas de Saint-Louis, nous avons utilisé l'indicateur du Tableau 4. D'autres critères peuvent être pris en compte dans le modèle (groupe emplacement des groupes électrogènes, système de gestion des eaux de la parcelle, etc.). Cependant, cela nécessite des données ou des visites de chaque bâtiment.

*Tableau 5 : Critères utilisés pour le calcul de l'indicateur de vulnérabilité physique des infrastructures liées au fonctions urbaines principales*

Vulnérabilité	Exposition = 0 (Bâtiments en dehors des zones inondées)	Exposition = 1 (Bâtiments à l'intérieur d'une zone inondée)
Sensibilité =1 (Bâtiments ayant un étage ou plus)	0	1
Sensibilité =1 (Bâtiments en RC avec un toit ouvert)	0	2

Sensibilité = 2 (Bâtiments en RC uniquement)	0	3
--	---	---

Les cartes ci-dessous présentent le résultat de l'analyse de vulnérabilité pour les scénarii pessimistes du GIEC. Des cartes différentes ont été produites pour les bâtiments supportant les fonctions urbaines essentielles et pour les infrastructures de gestion de crise.

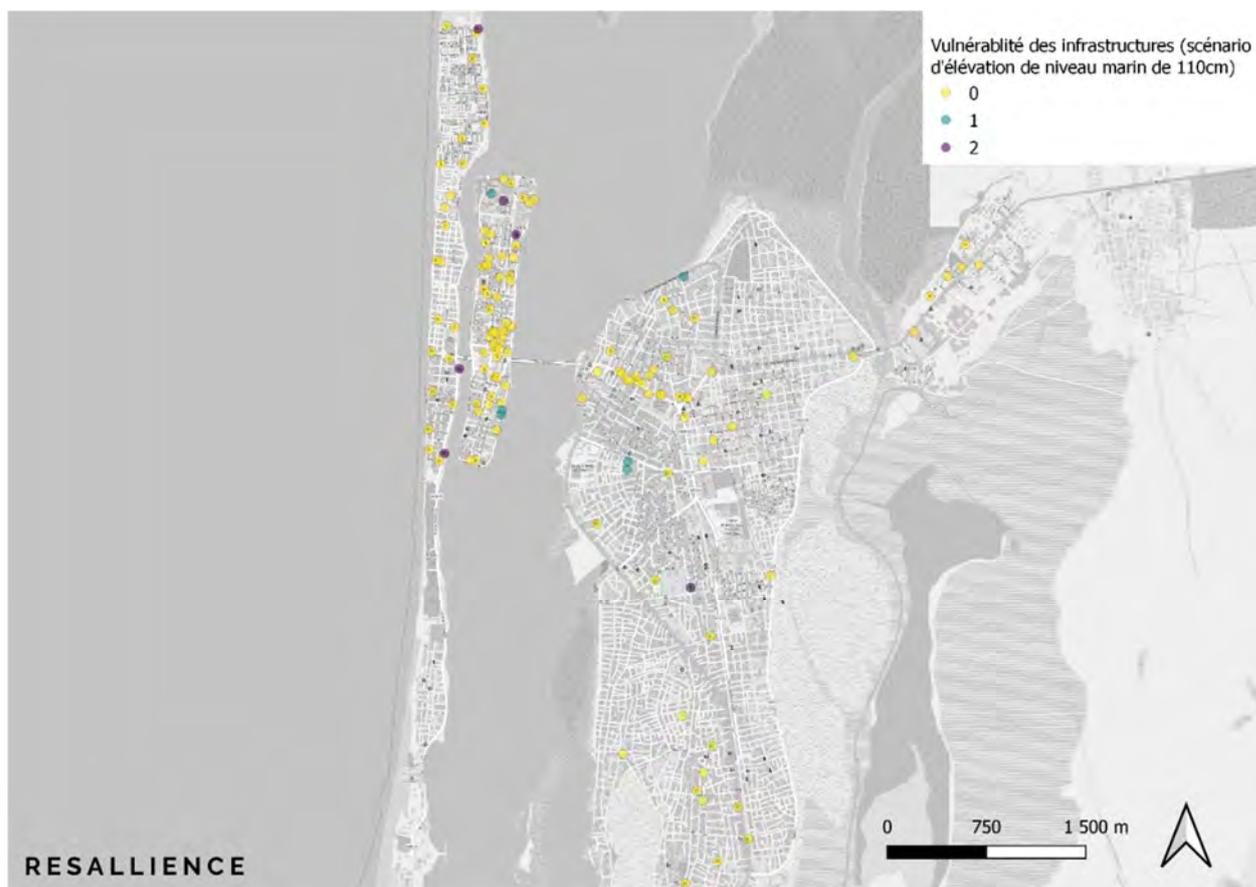


Figure 39 : Vulnérabilité des infrastructures liées aux fonctions urbaines principales à la submersion marine par élévation de la mer selon le scénario d'élévation de niveau marin de 110 cm)

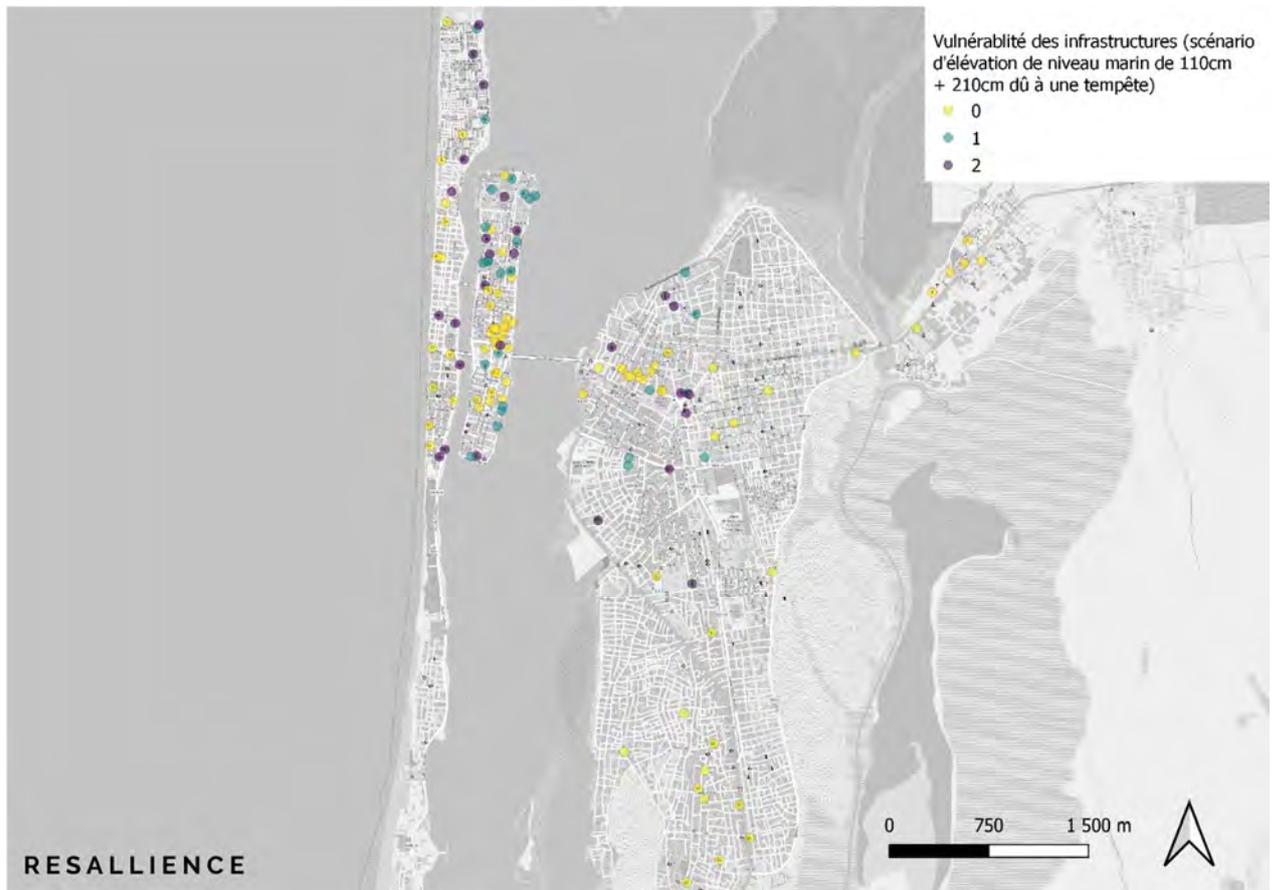


Figure 40 : Vulnérabilité des infrastructures liées aux fonctions urbaines principales à la submersion marine par élévation de la mer selon le scénario d'élévation de niveau marin de 110 cm + 210 cm dû à une tempête similaire à celle de 2018

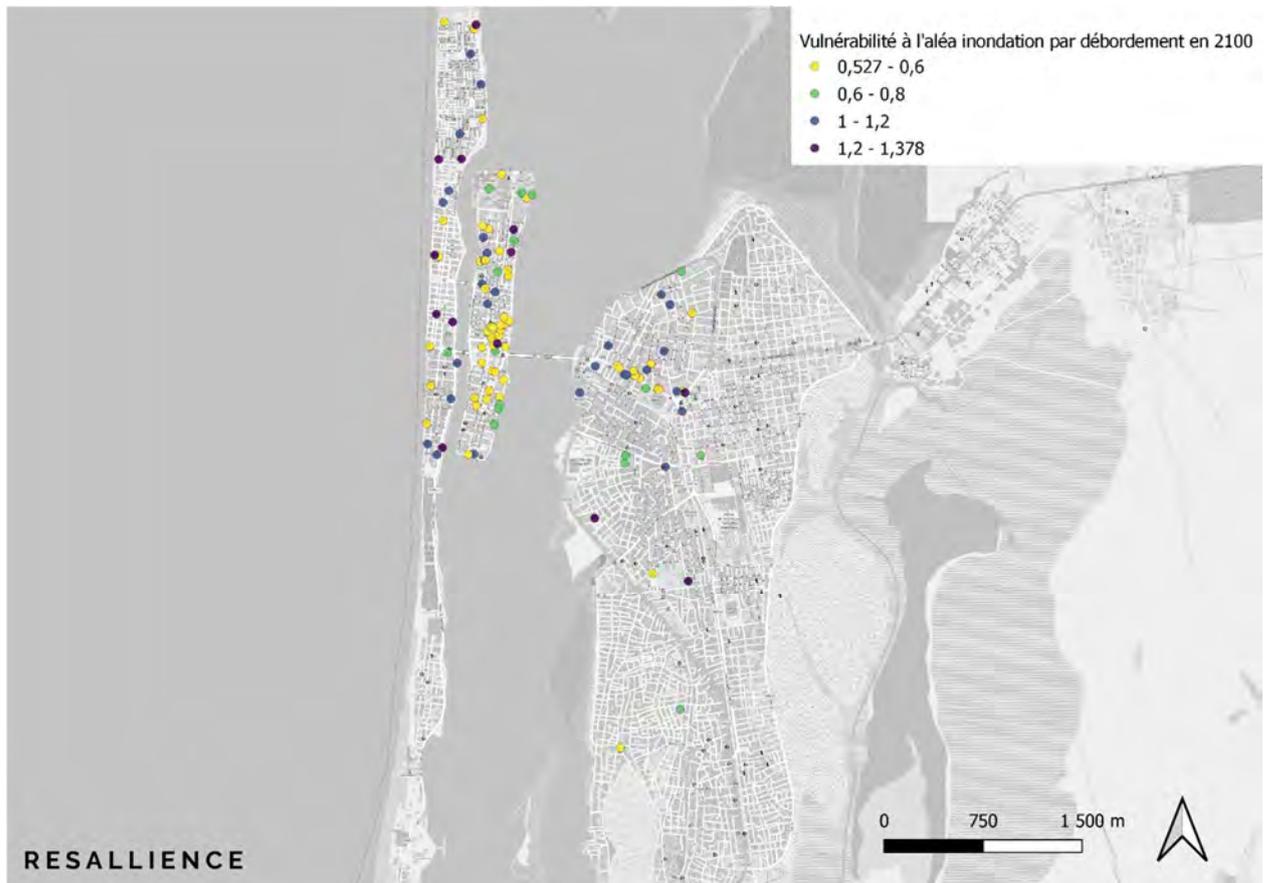


Figure 41 : Vulnérabilité des infrastructures liées aux fonctions urbaines principales à l'inondation par débordement selon le scénario SSP5-8.5 en 2100 (GIEC)

A horizon 2100 selon le scénario pessimiste du GIEC, on constate que très peu d'infrastructures sont vulnérables. Les infrastructures les plus vulnérables (score de vulnérabilité de 2) se trouvent sur la rive Est de la langue de Barbarie et incluent surtout des mosquées en rez-de-chaussée. On retrouve deux infrastructures avec une faible vulnérabilité (score de 1) sur la rive Sud Est de l'île de Saint-Louis. Il s'agit de bâtiments de Banques et assurances. Enfin deux écoles élémentaires à l'intérieur du continent (Sor) présentent également une faible vulnérabilité (score de 1).

A horizon 2100 selon le scénario pessimiste du GIEC couplé à une tempête similaire à celle de 2018, on constate qu'un nombre plus important d'infrastructures présentent un score de vulnérabilité fort (de 2) sur la rive Est de la langue de Barbarie et incluent surtout des mosquées en rez-de-chaussée. La situation est la même sur l'île de Saint-Louis, où cette fois des bâtiments liés à la fonction « Tourisme & Loisirs » se retrouvent avec une vulnérabilité de 2 en plus des sites religieux. Enfin la zone Nord-Ouest de l'île de Sor est inondée à plusieurs endroits mais là encore la majorité des infrastructures touchées sont liées à la fonction Religion.

#### Indicateur de vulnérabilité des infrastructures routières

La vulnérabilité des infrastructures de transport mesure l'impact de l'indisponibilité de celles-ci sur la mobilité. Pour la mesure nous comparons la taille du réseau inondé et la taille du réseau initial :

$$V_{Transport} = 1 - \frac{L_p}{L_i}$$

Où  $L_p$  et  $L_i$  désignent respectivement la longueur du réseau perturbé et la longueur du réseau initial. Cet indicateur varie de 0 (réseau non impacté) à 1 (réseau totalement inutilisable).

#### Vulnérabilité du territoire par catégorie d'infrastructures

Les différents indicateurs ci-dessus nous ont permis d'établir des statiques sur la vulnérabilité du territoire en fonction des différents aléas considérés. L'aléa inondation par débordement n'a pas été considéré car il ne couvre pas tout le territoire.

Tableau 6 : Vulnérabilité des infrastructures essentielles et de gestion de crise par catégorie

<b>Fonctions urbaines essentielles et gestion de crise</b>	<b>Vulnérabilité moyenne à la submersion marine par élévation de la mer de 110 cm (notée sur 2 sauf pour le transport noté sur 1)</b>	<b>Vulnérabilité moyenne à la submersion marine par élévation de la mer de 110 cm + 210 cm dû à une tempête (notée sur 2 sauf pour le transport noté sur 1)</b>
Secteur tertiaire	0,2	0,3
Loisirs et tourisme	0,04	0,37
Éducation	0,64	0,69
Religion	0,15	0,81
Nourriture	0	0,67
Santé	0,2	0,2
Sécurité	0,3	1
Transport	0,23	0,32

#### 4.6.2. Vulnérabilité territoriale des quartiers aux aléas submersion marine et tempêtes dans un contexte de changement climatique

Pour analyser et localiser les vulnérabilités du territoire, nous avons développé un indicateur composite de vulnérabilité territoriale d'une zone géographique donnée ( $x$ ) :

$$VT_x = \frac{VP_{enjeux}^x + VP_{Sécurité}^x + VP_{Santé}^x + VP_{Transport}^x}{7}$$

où  $VP_{enjeux}^x$ ,  $VP_{Sécurité}^x$  et  $VP_{Santé}^x$  désignent respectivement les vulnérabilités moyennes des enjeux (i.e. bâtiments liés aux fonctions urbaines essentielles), des infrastructures de sécurité et des infrastructures de santé de la zone  $x$ .  $VP_{Transport}^x$  est la vulnérabilité des infrastructures de transport de la zone  $x$ . La division par 7 permet de normaliser l'indicateur de vulnérabilité obtenu. Cette

équation donne plus d'importance aux infrastructures de santé et sécurité (notées respectivement sur 2 points) qu'aux enjeux (rassemblé dans un seul indicateur noté sur 2 points) et au transport (noté sur 1 point).

Cet indicateur a été calculé dans un SIG pour les différents quartiers de Saint-Louis. Les résultats de l'analyse sont montrés dans les figures suivantes.

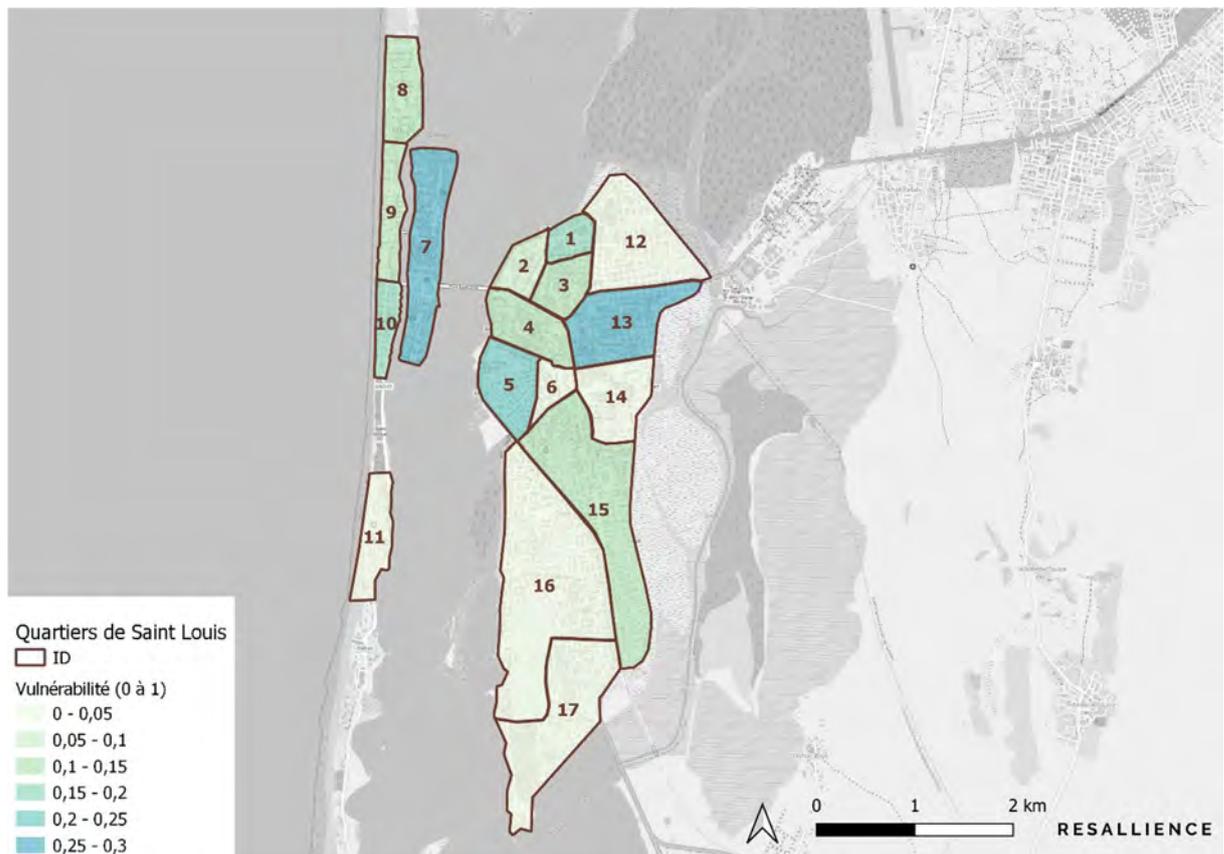


Figure 42 : Vulnérabilité territoriale des quartiers de Saint-Louis à la submersion marine par élévation de la mer selon le scénario d'élévation du niveau marin de 110 cm



Figure 43 : Vulnérabilité territoriale des quartiers de Saint-Louis à la submersion marine par élévation de la mer selon le scénario d'élévation de niveau marin de 110 cm + 210 cm dû à une tempête similaire à la tempête de 2018

D'après les cartes de vulnérabilités présentés ci-dessus, l'île de Saint-Louis apparaît comme le territoire le plus vulnérable de la zone d'étude avec une vulnérabilité estimée entre 0,25 et 0,3 pour un scénario d'élévation marin de 110 cm et une vulnérabilité estimée entre 0,4 et 0,42 pour un scénario d'élévation marin de 110 cm + 210 cm dû à une tempête. En effet, l'île est exposée au risque de submersion marine sur l'ensemble de sa côte et regroupe un grand nombre d'enjeux territoriaux. Son ancien statut de capitale durant l'époque coloniale en a fait le lieu de nombreuses infrastructures clés donc critiques comme les bâtiments de police, de l'armée mais aussi l'Hôpital de Saint-Louis situé à l'Ouest de l'île. Enfin sa liaison au reste de la ville par les deux ponts qui l'entourent rend cette zone complètement dépendante de ces deux infrastructures et donc extrêmement vulnérable dans le cas où elles seraient submergées par les eaux.

Sur la partie continentale, les territoires qui ressortent comme les plus vulnérables sont les zones 4, 5 et 6. En plus de leur exposition aux aléas d'inondations par submersion marine ou par débordement du fleuve, ces zones abritent un grand nombre d'infrastructures identifiés au sein de ces zones comparées à d'autres comme les zones 16 et 17. Ensuite, on remarque que la zone 13 ressort comme une des zones les plus vulnérables de la zone d'étude. Cette zone abritant une infrastructure de santé vulnérable car exposé et sensible (uniquement en rez-de-chaussée), l'entièreté de la zone a été marqué comme vulnérable étant donné le poids de l'infrastructure qu'elle contient en son sein.

A contrario, les zones 8, 9 et 10 apparaissent comme vulnérables non pas pour le poids des infrastructures qu'elles contiennent mais par leur nombre. Ces zones sont majoritairement résidentielles avec des habitations et des lieux religieux en rez-de-chaussée uniquement. De plus, ces zones sont exposées aux risques de submersion dans les deux scénarios faisant ainsi d'elles des zones vulnérables.

## 5. WP5 Sensibilisation des acteurs et des décideurs à une vision multirisque du territoire.

### 5.1. Perception du risque des acteurs locaux

Ce chapitre présente l'analyse menée pour évaluer la perception des aléas et de la vulnérabilité climatique des acteurs locaux. Cette analyse est basée sur une étude bibliographique et des enquêtes de terrain.

#### 5.1.1. Résumé de la littérature

La perception des risques climatiques par la population de Saint-Louis a été étudiée par Sambou (2020), Sambou et al. (2020) et par le projet CLUVA-Climate Change and Urban Vulnerability in Africa (2013). D'après Sambou (2020), la perception du changement climatique et de l'érosion côtière par la population de Saint-Louis porte principalement sur les conséquences économiques, sociales, sanitaires et résidentielles. Cette conclusion s'appuie sur une enquête de terrain réalisée en 2018, qui montre que la part des individus préoccupés par les différents types de risques et effets du changement climatiques est la suivante :

- Risques liés à l'avancée de la mer : 96,9 %
- Risques liés à la raréfaction de certaines espèces : 41,3%
- Risques liés aux inondations fluviales et à l'érosion le long de la côte : 0,8%
- Risques liés aux habitations : 79,3%
- Risques liés aux côtes : 77,5%
- Risques liés aux récifs : 1,7%
- Risques liés à la pêche : 99,4%
- Risques liés au commerce : 77%
- Risques liés au maraîchage : 1,2%
- Risques liés aux infrastructures hydrauliques : 84,5 %
- Risques liés aux infrastructures de télécommunication : 41,8 %

Sambou et al. (2020) ont également réalisé un nuage de mots (Figure 1), qui montre lui aussi que la population est principalement préoccupée par les impacts négatifs du changement climatique sur l'avancée de la mer et la pêche. La pêche étant l'activité économique principale du territoire, sa vulnérabilité face au changement climatique apparaît d'autant plus cruciale pour les populations de Saint-Louis.



les aborder alors qu'une résilience faible indique une prise de conscience du problème et une volonté de les aborder, mais une capacité d'action limitée. A l'étape intermédiaire, le niveau de résilience moyen met en avant le développement et la mise en œuvre de solutions permettant l'amélioration de la capacité d'action. Le niveau résilient signifie que les interventions mises en place sont cohérentes et permettent de recouvrir l'ensemble des aspects principaux du défi identifié en s'inscrivant dans une stratégie sur le long terme. Enfin, le niveau de résilience élevée correspond à une situation où l'ensemble des acteurs impliqués ont une culture de la sécurité comprenant les volets climatiques, politiques, de planification des solutions, de leurs mises en œuvre, mais aussi d'attitudes et de comportements alignés avec la culture de sécurité adoptée.

Ensuite, ARC-D mesure la résilience des populations à partir de cinq domaines :

- La gouvernance
- L'évaluation des risques
- La connaissance et l'éducation
- La gestion des risques et réduction de la vulnérabilité
- La préparation et réponse

Chaque catégorie est subdivisée en sous-composant (Figure 3) auquel un score est attribué. Ces scores sont ensuite combinés par une moyenne pour quantifier le niveau de résilience des catégories.

Thèmes	Composantes de la résilience	Score	Niveau de résilience
<b>Gouvernance</b>	Leadership communautaire	4	<b>2</b>
	Prise de conscience des droits et plaidoyer	2	
	Intégration avec la planification de développement	2	
	Accès aux Financements et aux partenariats	1	
	Inclusion de groupes vulnérables	2	
	Participation des femmes	4	
<b>Évaluation des Risques</b>	Analyse/Évaluation d'aléas	2	<b>2</b>
	Évaluation de Vulnérabilités et Capacités (EVC)	1	
	Méthodes locales et scientifiques pour la prise de conscience des risques	4	
<b>Connaissance et Éducation</b>	Prise de conscience et connaissance du public	3	<b>3</b>
	Diffusion des connaissances en rapport avec les CC	3	
	Attitudes et valeurs culturelles	4	
<b>Gestion des Risques et Réduction de la Vulnérabilité</b>	Gestion durable de l'environnement	1	<b>1</b>
	Accès aux soins de santé dans les situations d'urgence	1	
	Accès aux services de santé en temps normal	3	
	Pratiques de survie (livelihood) résistantes aux désastres	2	
	Protection sociale	2	
	Accès aux services financiers	1	
	Protection des Infrastructures et des Services de base	1	
	Occupation de sols et Planification	2	
<b>Préparation et Réponse</b>	Capacité de préparation et de réponse	2	<b>2</b>
	Système d'alerte précoce	4	
	Planification des urgences/Plan ORSEC	2	
	Réponse d'urgence et récupération	2	
	Bénévolat et Redevabilité	2	
<b>Niveau général de Résilience</b>	<b>2</b>		

Figure 45 : Evaluation de la résilience selon différentes composantes (Sambou, et al. 2020)

Les résultats de l'enquête de terrain de Sambou et al. (2020) et Sambou (2020), révèlent que le niveau de résilience associée à la catégorie « gestion des risques et la réduction de la vulnérabilité » est très faible (score de 1). Bien qu'il existe des politiques et programmes pour la diminution du risque côtier au Sénégal, leur efficacité ne semble pas être perçue par les habitants de langue de Barbarie. En effet, les sous-composantes ayant obtenu les notes les plus faibles sont l'accès aux soins de santé dans les situations d'urgence, l'accès aux services financiers et la protection des infrastructures et des services de base.

En revanche, la catégorie « Connaissance et Education » présente un score de 3 et donc un niveau de résilience moyenne alors toutes les autres catégories présentent un niveau de résilience faible (note de 2). Ces faibles notes résultent de diverses causes. Concernant la gouvernance, le grand nombre d'acteurs et la gestion à différentes échelles viennent freiner la gestion des risques côtiers (Rey & Fanget, 2017). En effet, la diversité des acteurs implique aussi une divergence d'intérêt qui empêche une réponse cohérente et donc efficace face au risque côtier. De plus, il existe au Sénégal différents instruments de développement socio-économique prenant en compte le changement climatique tel que le Plan d'Action National d'Adaptation (PANA). Néanmoins, le financement des projets et des programmes ne semble pas être suffisant pour soutenir les différentes initiatives lancées (Gaye, Lo, Djimbira, Fall, & Ndiaye, 2015).

Les résultats de Sambou (2020) et Sambou et al. (2020) renforcent ceux du projet CLUVA. En effet dans cette étude de cas, une analyse sociale sur la question de la vulnérabilité des biens, vulnérabilité physique, institutionnelle et comportementale a été effectuée dans les communes de Goxxumbacc, Darou et Diaminar sur la partie continentale de Saint-Louis. Dans ces trois communes, entre 54 et 80% de la population ne « perçoivent pas la présence des institutions » dans la lutte contre les différents risques et cela bien que 4 à 84 % des résidents sont « convaincus qu'un plan d'évacuation existe ». Bien que la gestion des risques semble être prise en compte théoriquement, les actions qui en découlent ne semblent pas être perçues par la population.

## 5.1.2. Résumé des enquêtes de terrain

### Pré-enquêtes de terrain (novembre 2022)

Lors de la visite de terrain de novembre 2022, nous avons mené des entretiens non-directifs avec des acteurs locaux :

- M. Boun Daouda Soumaré, (directeur général) et M. Al Hassane Loum (responsable SIG) de l'Agence de développement Communal (ADC) de Saint-Louis qui fonctionne comme un bureau technique interne à la commune de Saint-Louis.
- Quelques habitants, dont un guide touristique

Nos échanges avec ces acteurs nous ont permis de comprendre le contexte de la gestion des risques côtiers de Saint-Louis et la perception locale de ces risques. En tant que ville classée au Patrimoine mondiale de l'UNESCO, Saint-Louis bénéficie de l'attention de l'Etat sénégalais qui a lancé un plaidoyer et des projets (en partie financé directement par l'Etat) de construction de digues de protection, accompagné d'actions de communication et d'un suivi scientifique. Les actions de communication et concertation sont menées par l'Agence de développement Municipal (ADM) de Dakar.

De manière générale, les acteurs locaux rencontrés lors de notre visite de terrain estiment que la zone la plus exposée à l'érosion et aux inondations est la Langue de Barbarie, et que les infrastructures et habitations des villages des pêcheurs sur la Langue sont les plus vulnérables.

De plus, les acteurs locaux estiment que la protection du littoral de Saint-Louis sera assurée par les projets de construction de digues réalisés ou en cours. Ces digues devraient protéger la majeure partie de la langue de Barbarie (du Nord jusqu'au cimetière situé au sud de Guet N'Dar - Figure 2). Les infrastructures les plus exposées à l'issue de ces constructions seraient donc les hôtels situés à Hydrobase et plus bas.

Nous avons également participé à l'atelier "Adapter les Villes et Territoires Côtiers à l'Élévation du Niveau de la Mer en Afrique de l'Ouest" organisé par la Plateforme Océan & Climat - Sea'ties à Dakar le 5 Octobre 2022. Cet atelier a réuni plusieurs acteurs scientifiques ou politiques engagés dans de la protection du littoral en Afrique de l'Ouest, dont l'ADC de Saint-Louis. La réflexion collective organisée lors de cet atelier a révélé que « l'engagement des communautés locales dans la production et l'appropriation de connaissances scientifiques est crucial. Le cas de Saint-Louis souligne la nécessité d'accompagner la mise en œuvre de réponses avec des campagnes d'information et d'éducation des communautés (par exemple, le biais cognitif de sécurité face à la digue). L'engagement des communautés dans la collecte de données est à la fois une option moins coûteuse et plus durable, particulièrement intéressante dans un contexte de manque de données et de difficultés à financer la recherche. » (Plateforme Océan & Climat - Sea'ties, 2022).

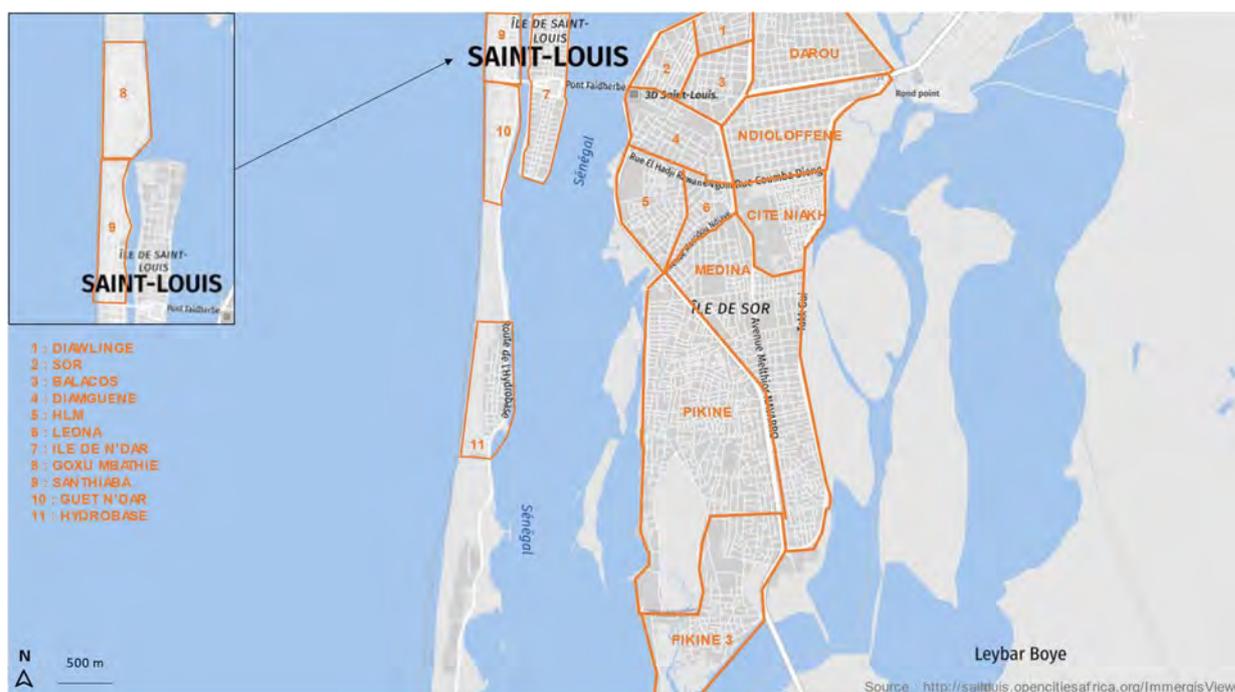


Figure 46 : Découpage de la zone d'étude utilisé pour produire les indicateurs de vulnérabilité des quartiers, Open Cities Saint-Louis (2019).

### Enquête de terrain d'avril 2023

Pour évaluer de manière plus précise la perception des risques à Saint-Louis, nous avons effectué des entretiens semi-directifs avec des acteurs locaux en avril 2023. Ces entretiens ont abordé quatre thèmes : les enjeux, les aléas, la vulnérabilité et les solutions d'adaptation.

#### *Enjeux*

Lors de l'analyse de la vulnérabilité de Saint-Louis au changement climatique (WP4), nous avons défini huit catégories d'infrastructures critiques pour le territoire : Secteur tertiaire (banques et assurances), Loisirs et tourisme, Éducation, Religion, Nourriture, Sécurité (police, armée, pompiers) Santé, ou Transport. Lors des entretiens, nous avons présenté cette liste et demandé aux participants s'ils la trouvaient pertinente et la modifieraient. Les différentes personnes interrogées ont validé la pertinence de la liste. Certains ont cependant fait remarquer que la catégorie « Loisirs et Tourisme » pourrait être divisée en deux catégories, car les infrastructures de loisirs (e.g. aires de jeux) sont moins développées et moins cruciales pour l'économie locale que les infrastructures de tourisme (hôtels).

Nous avons ensuite procédé à une analyse afin d'identifier les catégories d'infrastructures les plus importantes pour les acteurs interrogés. Pour cela, nous avons utilisé l'Analyse Multicritère Hiérarchique (AHP–Analytic Hierarchy Process) ». La méthode AHP, créée par Saaty (1980), est une méthode d'analyse multicritères, qui peut être utilisée en cartographie et dans la quantification des caractéristiques qualitatives, par le biais d'une pondération. Elle possède les caractéristiques suivantes :

- La méthode est basée sur la comparaison des différentes caractéristiques, deux par deux (selon l'échelle du Tableau suivant)
- À partir de la construction d'une matrice carrée, on évalue l'importance relative d'une caractéristique par rapport à une autre, en utilisant pour cela, une échelle adéquate.
- Une fois que la matrice de comparaison est remplie, on calcule la valeur propre de chacune et le vecteur propre lui correspondant.
- Le vecteur propre indique l'ordre de priorité ou la hiérarchie des caractéristiques étudiées.
- La valeur propre est la mesure qui permettra d'évaluer la cohérence ou la qualité de la solution obtenue, représentant ainsi, un autre avantage de cette méthode

*Tableau 8 : Echelle de comparaison des deux éléments dans la méthode AHP*

Valeurs	Signification	Explications
1	Même importance	Les deux composants présentent la même importance pour la société
3	Un peu plus important	Le composant considéré est un peu plus important que l'autre
5	Plus important	Le composant considéré est plus important que l'autre
7	Beaucoup plus important	Le composant considéré est beaucoup plus important que l'autre
9	Absolument plus important	Le composant considéré est absolument plus important que l'autre
2,4,6,8 sont considérées comme des valeurs intermédiaires entre deux appréciations voisines		

Les résultats de la comparaison deux par deux des catégories d'infrastructures par les acteurs locaux ont permis de calculer des scores d'importance (poids ou « préférences » entre 0 à 1). La figure et le tableau suivant proposent des statistiques descriptives des préférences individuelles des acteurs interrogés.

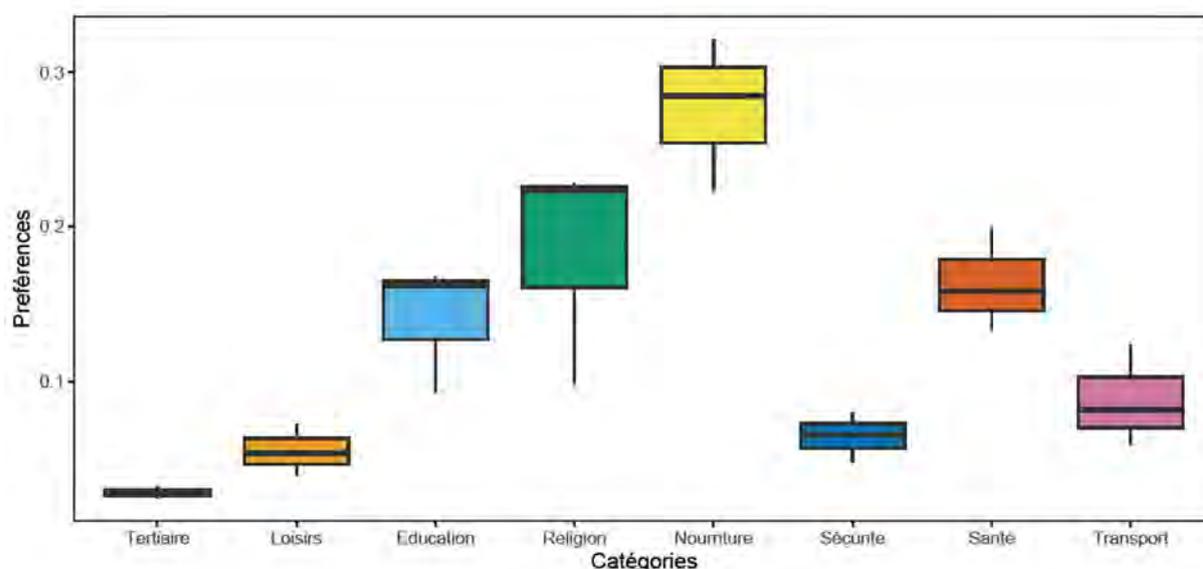


Figure 47 : Score d'importance (« préférences individuelles ») des catégories d'infrastructures urbaines essentielles à Saint-Louis calculés avec la méthode AHP en fonction des réponses des acteurs locaux (Tertiaire = Banques & assurances, Loisirs = Loisirs & tourisme)

Tableau 9 : Moyenne et déviation standard des scores d'importance (« préférences individuelles ») des catégories d'infrastructures urbaines essentielles à Saint-Louis calculés avec la méthode AHP en fonction des réponses des acteurs locaux

	Tertiaire	Loisirs & tourisme	Education	Religion	Nourriture	Sécurité	Santé	Transport
<b>Moyenne</b>	0,0277	0,055	0,143	0,186	0,279	0,062	0,157	0,090
<b>Déviati on</b>	0,006	0,0116	0,032	0,071	0,050	0,013	0,029	0,033

Les résultats montrent que les acteurs locaux perçoivent la nourriture comme étant la fonction urbaine la plus importante à protéger des aléas climatiques. La religion vient en seconde position. Cette seconde position reflète l'importance de la religion pour la population de Saint-Louis, qui est notamment historiquement liée à la proximité avec la Mauritanie et le passage d'érudits musulmans comme Serigne Ahmadou Bamba (mouride) dans la ville.

La santé et l'éducation en 3<sup>ème</sup> et 4<sup>ème</sup> obtiennent des scores proches. Les catégories Transport, Sécurité, Loisirs et tourisme, et Tertiaire se succèdent ensuite dans cet ordre au sein du classement des préférences. Il est à noter que la faible importance du secteur tertiaire pour les personnes interrogées est notamment liée au fait que la majorité des populations vulnérables (i.e. les familles des pêcheurs de Saint-Louis) ne sont pas bancarisées.

Les scores d'importance (Tableau 8) de l'analyse AHP ont ensuite été utilisés pour évaluer la vulnérabilité du territoire en fonction des priorités des acteurs locaux. Pour cela, nous avons développé un indicateur composite de vulnérabilité territoriale d'une zone géographique donnée ( $x$ ), qui combine les vulnérabilités physiques des infrastructures du territoire (voir WP4) en fonction des scores d'importance des catégories :

$$VT_x = \sum_i \alpha_i VP_i^x$$

où  $\alpha_i$  désigne le poids de la catégorie  $i$  (issue des préférences des acteurs locaux) et  $VP_i^x$  la vulnérabilité physique d'une infrastructure de catégorie  $i$  dans la zone  $x$ . Cet indicateur a été calculé dans un SIG pour les différents quartiers de Saint-Louis pour deux scénarii issus du WP4 :

- Scénario d'élévation de niveau marin de 110 cm (scénario pessimiste du GIEC)

- Scénario d'élévation de niveau marin de 110 cm + 210 cm dus à une tempête similaire à la tempête de 2018

Les résultats de l'analyse sont montrés dans les figures suivantes.

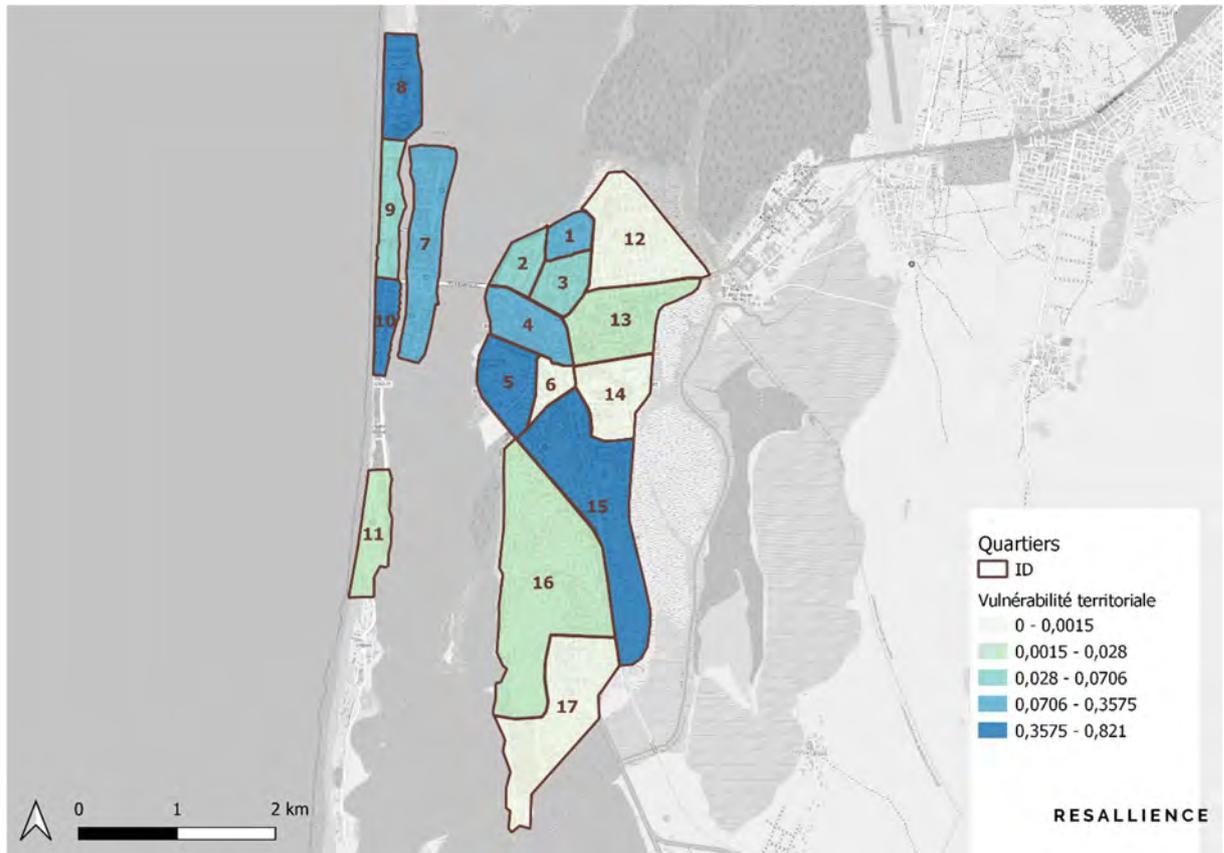


Figure 48 : Vulnérabilité territoriale des quartiers de Saint-Louis dans le scénario de submersion marine par élévation de la mer de 110 cm (voir WP4)

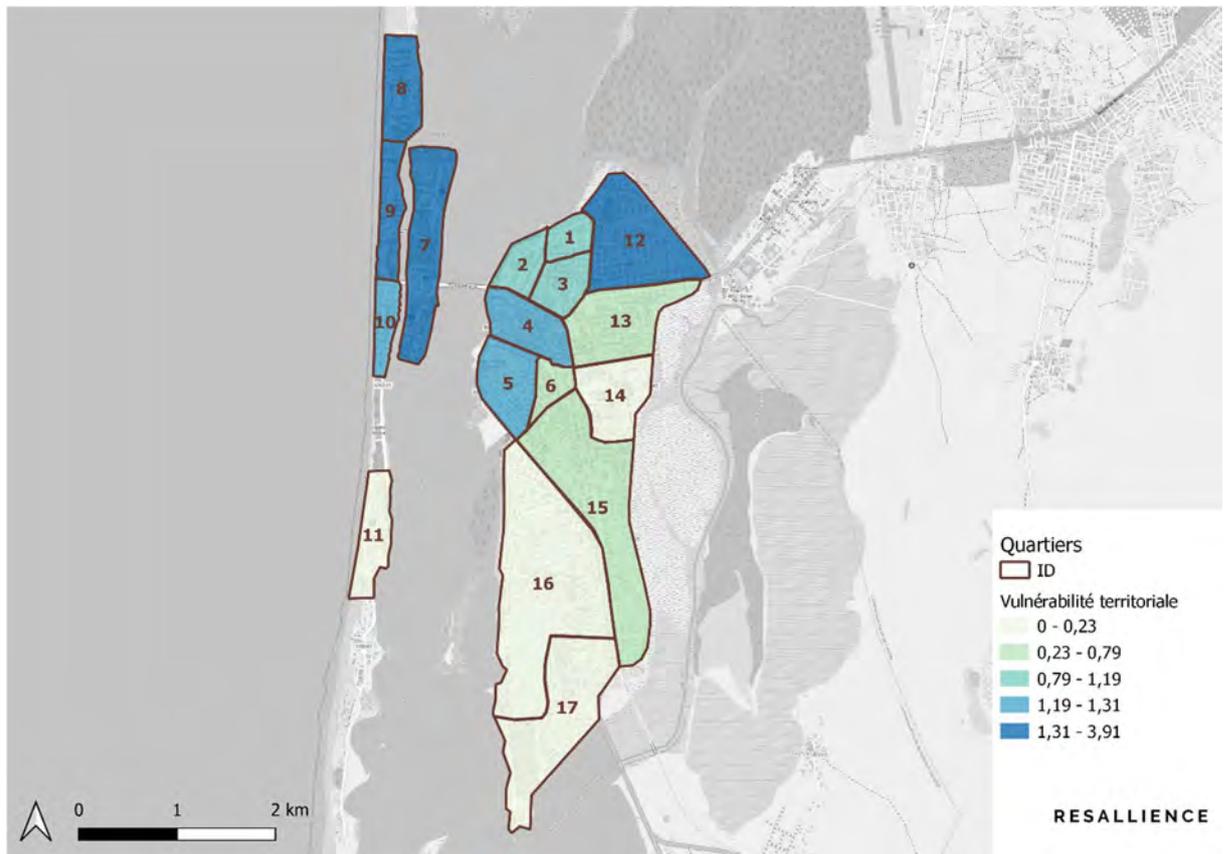


Figure 49 : Vulnérabilité territoriale des quartiers de Saint-Louis dans le scénario de submersion marine par élévation de la mer de 320 cm (voir WP4)

### Aléas

Nous avons demandé aux participants quels étaient les aléas (e.g. érosion, submersion marine/onde de tempête et débordement du fleuve) les plus préoccupants à Saint-Louis aujourd’hui et à horizon 2100.

Globalement, les acteurs interrogés voient l’érosion côtière comme l’aléa le plus préoccupant pour les populations. Les risques de submersion marine restent préoccupants, mais sont perçus comme mieux maîtrisés grâce à l’érection des digues. Les risques de débordement du fleuve sont perçus comme très limités grâce aux ouvrages de protection. En revanche, les acteurs interrogés ont identifié d’autres types d’inondations : les inondations par ruissellement et remontée de nappes, qui sont fréquentes et préoccupantes sur la partie continentale du territoire.

Toutes les personnes interrogées voient les aléas s’intensifier à horizon 2100. L’érosion côtière ressort également comme l’aléa le plus préoccupant dans le futur.

### Vulnérabilité

Afin d’évaluer la perception du risque des populations dans l’espace, nous avons demandé aux participants de classer les différents quartiers de Saint-Louis (Figure 2) selon quatre niveaux de vulnérabilité (faible, moyen, fort et très fort). Les cartes suivantes montrent les valeurs moyennes résultant de ce classement par les acteurs interrogés. Il est à noter que les quartiers 1 et 2 dans la Figure 2, 4 et 5 sont en pratique regroupés ensemble sous le nom de Tindjiguène.

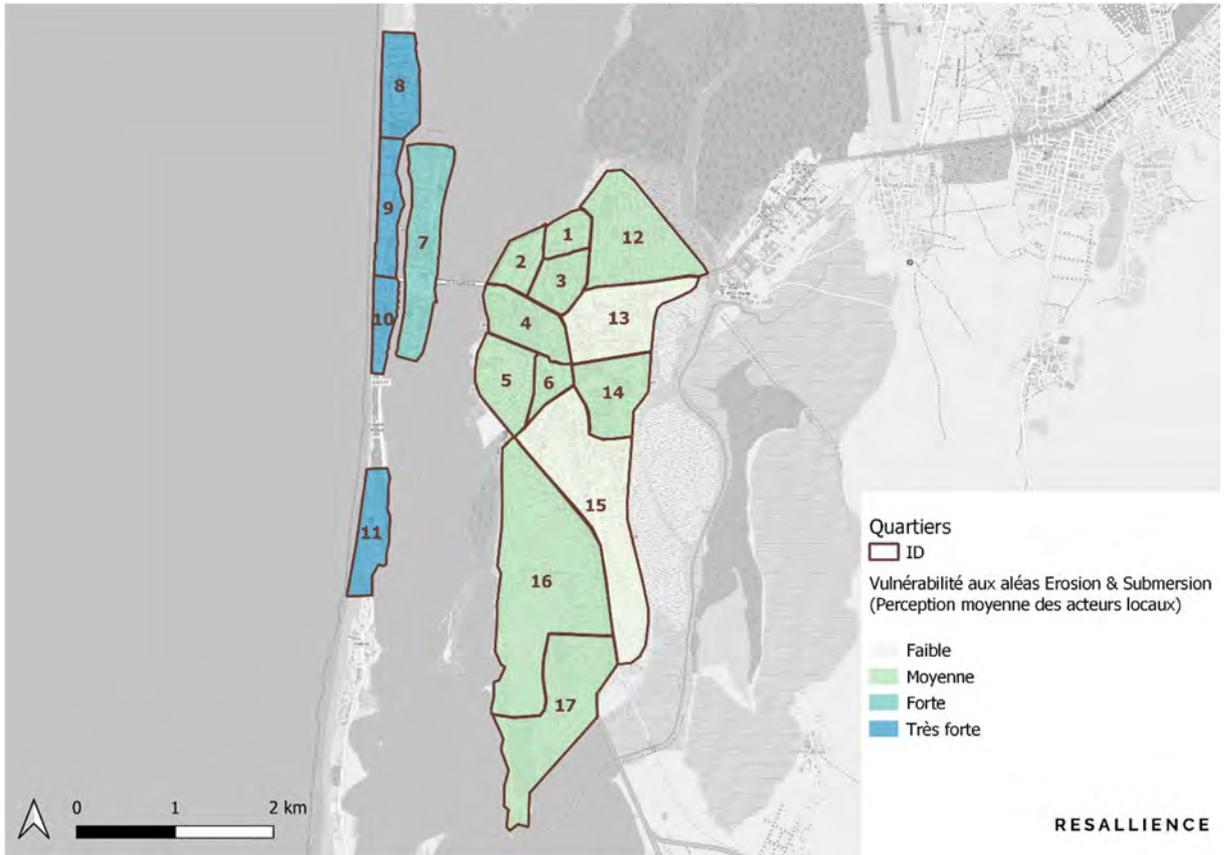


Figure 50 : Perception moyenne de la vulnérabilité des quartiers de Saint-Louis à la submersion marine et à l'érosion côtière (obtenue à partir d'entretiens d'acteurs locaux)

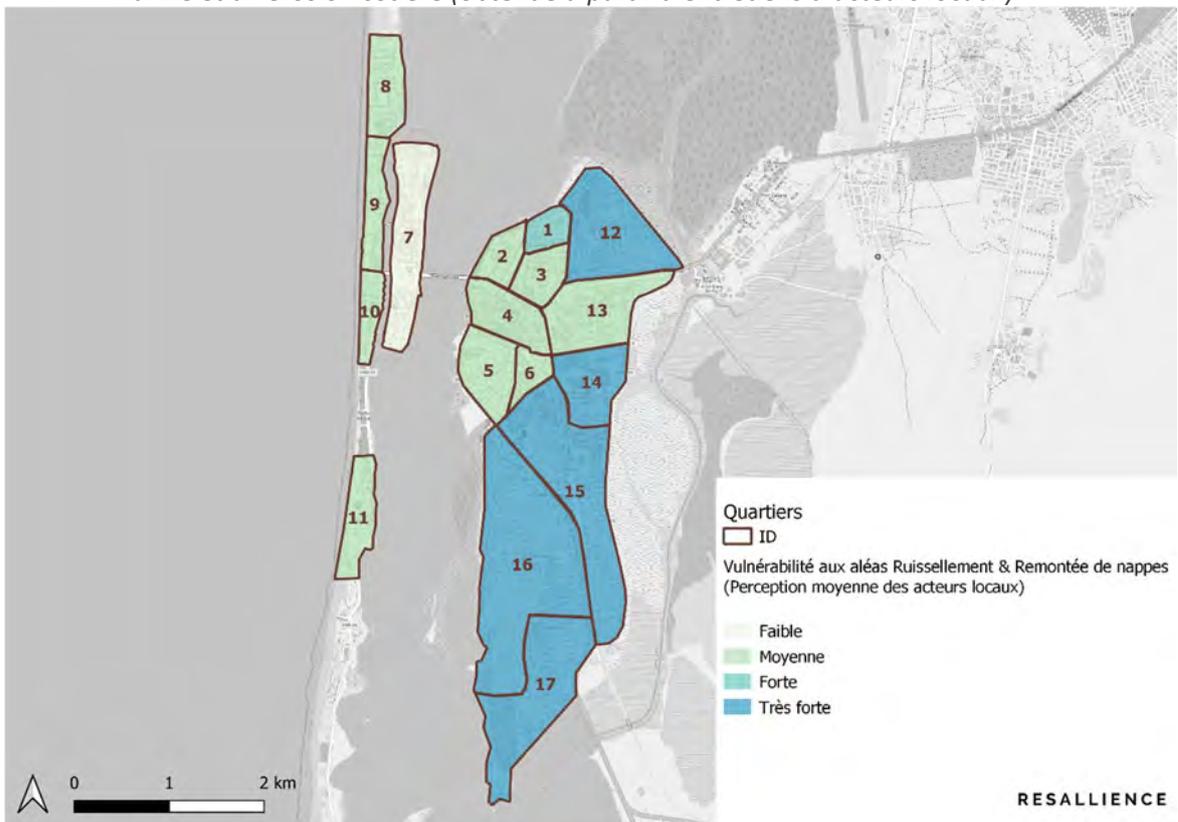


Figure 51 : Perception moyenne de la vulnérabilité des quartiers de Saint-Louis aux aléas inondation par ruissèlement et remontée de nappes (obtenue à partir d'entretiens d'acteurs locaux)

### *Solutions*

Pour finir, les entretiens ont abordé le thème des solutions d'adaptation. Les interviewés ont listé les solutions mises en place et les solutions non-mises en place mais pertinentes pour eux. Nous avons également interrogé les acteurs locaux sur l'apport des imageries satellitaires dans la protection du littoral de Saint-Louis.

Les solutions les mieux identifiées parmi les solutions mises en place sont la construction des digues, le recul stratégique des logements de la côte et le relogement des populations vers un site au nord-est de la ville. D'autres solutions comme le curage des canaux, le pompage ou l'ensablement des zones critiques ont également été citées.

Au moment d'aborder les solutions non-mises en place mais pertinentes selon eux, les acteurs interrogés ont plutôt évoqué la réticence des habitants de la langue de Barbarie à déménager et le fait que l'aménagement de l'île de Sor, qui est plus récent que celui de l'île de Saint-Louis, soit plus sensible aux inondations par ruissellement et remontée de nappe que celui de l'île de Saint-Louis.

Enfin, les interviewées pensent tous que les images satellitaires ont un rôle à jouer dans la surveillance des ouvrages de protection et de l'évolution du trait de côte.

## 5.1.3. Stratégie de protection des populations et des services urbains

Notre étude de la littérature et nos échanges avec les acteurs locaux ont révélé que plusieurs projets ont été ou sont actuellement menés pour protéger Saint-Louis et ses habitants contre les aléas climatiques, dont les projets suivants :

- **Projet de Relèvement d'Urgence et de Résilience à Saint-Louis (SERRP), 2018-2025, financé par le Gouvernement du Sénégal et la Banque mondiale** : Ce projet a pour objectif de réduire la vulnérabilité aux risques côtiers des populations de la Langue de Barbarie et renforcer la planification de la résilience côtière à Saint-Louis. Il a 5 composants :
  - Composante 1 - Réponse aux besoins immédiats de la population touchée par la catastrophe : Elle permettra de fournir un logement temporaire et des services connexes aux familles actuellement déplacées par la catastrophe et d'améliorer de toute urgence leurs conditions de vie.
  - Composante 2 - Relogement planifié des populations vivant dans la zone à haut risque sur la Langue de Barbarie : Elle répond au besoin à moyen terme de réinstaller les familles touchées dans des logements permanents.
  - Composante 3 - Renforcement de la planification de la résilience urbaine et côtière : Elle répond aux besoins, à long terme, pour Saint-Louis, de devenir une ville côtière plus résiliente.
  - Composante 4 - Composante pour la réponse d'urgence que le Gouvernement du Sénégal pourrait activer à la suite d'une crise ou une urgence admissible.
  - Composante 5 - Gestion, suivi et évaluation du projet.
- **PROJET DE PROTECTION COTIERE A SAINT-LOUIS (PPCS), 2018-2023** : Ce projet a pour objectif de protéger rapidement les populations et les biens des quartiers situés sur la Langue de Barbarie du risque d'érosion côtière et contribuer à l'amélioration des connaissances scientifiques sur les enjeux côtiers et à leur diffusion.
  - Le projet concerne la réalisation d'un ouvrage de protection frontale en enrochements sur un linéaire de 2150m de long. L'ouvrage concernera toute la partie sud de la zone urbanisée de la langue de Barbarie. Il démarrera au début du mur au Nord (Ndar Toute) et se terminera au Sud (Ngueth Ndar) à la fin de la zone urbaine à hauteur du marché aux poissons.

- Il s'inscrit dans la continuité de la protection d'urgence réalisée en 2017/2018 par Eiffage pour protéger le quartier de Goxu Mbacc au nord de la zone.
- **Projet de Gestion des Eaux pluviales et d'adaptation au changement climatique – PROGEP, Phase I (2012-2020)**, composante du Plan Décennale de Lutte Contre les Inondations (PDNA) qui est aligné sur les objectifs du Plan Sénégal Emergent (PSE) et de l'Acte 3 de la Décentralisation le PROGEP
  - Composante A : Intégration du risque d'inondation dans la planification urbaine
  - Composante B : Construction et gestion des ouvrages de drainage
  - Composante C : Engagement des communautés dans la réduction du risque d'inondation en milieu urbain et l'adaptation au changement climatique
  - Composante D : Coordination, gestion, suivi, et évaluation du Projet
- **Projet de Gestion des Eaux pluviales et d'adaptation au changement climatique – PROGEP, Phase II, financé par l'Association Internationale pour le Développement et le Fonds nordique de Développement (En cours)**,
  - Composante 1 : Planification et gestion urbaines intégrées prenant en compte les risques climatiques et la durabilité des villes
  - Composante 2 : Investissement et gestion du drainage, engagement communautaire, gestion environnementale et sociale
  - Composante 3 : Réponses d'urgence
  - Composante 4 : Gestion du projet
- **Programme de développement touristique de Saint-Louis et sa région, piloté par l'AIX** (Agence pour la promotion des investissements et des grands travaux), et financé par l'AFD :
  - Amélioration de l'accueil touristique
  - Requalification des espaces publics
  - Réhabilitation du patrimoine bâti privé et public: A travers une approche inspirée des «Opérations Programmées d'Amélioration de l'Habitat (OPAH) » en France, il est prévu dans ce cadre la réhabilitation de la maison des sœurs de Cluny pour devenir la « Maison du patrimoine », la réhabilitation d'éléments du patrimoine de l'Etat, tels que la Cathédrale par exemple, la réhabilitation complète attendue de 42 immeubles privés à intérêt architectural du secteur sauvegardé qui sont en mauvais état, la réhabilitation partielle attendue de 93 immeubles privés situés sur les séquences urbaines présentant un intérêt touristique (opérations de type « façades, toitures, sécurité »).
  - Renforcement de la gestion des déchets solides
  - Amélioration des conditions de débarquements des produits de la pêche
  - Renforcement des capacités institutionnelles

Les quatre premiers projets sont pilotés par l'ADM.

L'analyse de ces différentes initiatives montre que « l'intervention des fonds d'adaptation pour répondre à une urgence tend à favoriser la construction d'infrastructures de protection "dures" plutôt que la planification de stratégies d'adaptation durables à long terme. » (Plateforme Océan & Climat - Sea'ties, 2022). Ainsi, la stratégie de protection côtière pourrait être renforcée par une vision à long terme et un suivi de l'évolution des infrastructures et des aléas. C'est dans ce but que nous proposons dans le chapitre suivant la préconception d'un système de monitoring pour les infrastructures critiques de Saint-Louis.

## 5.2. Préconception d'un système de monitoring

Ce chapitre présente le résultat de la réflexion menée pour la conception d'un système de monitoring pour la surveillance des infrastructures de Saint-Louis dans le cadre de la protection de la

ville et de ses services. Cette réflexion a pour ambition de compléter les efforts en cours pour la protection de Saint-Louis (section 2.3).

### 5.2.1. Principes de conception du système de monitoring

Notre analyse de la littérature, des infrastructures et enjeux urbains, et des aléas inondation par submersion marine, onde de tempête ou débordement dans un contexte de changement climatique (WP1 à 4) nous a permis d'arriver aux conclusions suivantes concernant le monitoring :

- Trois sites cibles sont prioritaires :
  - La brèche où l'acquisition des données de l'hydrodynamique et de la bathymétrie est difficile via un système de monitoring in-situ.
  - La flèche littorale de la Langue de Barbarie où une première cartographie des données bathymétriques est déjà disponible.
  - Le bas estuaire au niveau de l'île de Saint-Louis caractérisé par une forte présence des villages où le risque de submersion d'érosion est maximal.
- Le système de monitoring pourra être conçu selon la méthodologie suivante :
  - Conception de deux niveaux de monitoring complémentaires : suivi satellitaire et capteurs in-situ (illustré dans la Figure 8)
  - Détermination des zones où l'installation des capteurs in-situ est difficile (e.g. la brèche)
  - Déploiement de la solution satellitaire au niveau des trois sites cibles (cités précédemment), et en particulier sur les zones non instrumentées.

Le suivi par satellite devra permettre d'acquérir sur les données suivantes :

- Données bathymétriques et hydrodynamiques
- Cartographie des différentes couches du sol et des caractéristiques lithologiques
- Cartographie de l'état de végétation

Le système de monitoring par capteurs in-situ pourra inclure des :

- Capteurs liés à l'évolution des niveaux des différents cours d'eau dans les zones à risque : piézomètres, sondes bathymétriques
  - Capteurs spécifiques à l'évolution de l'état structurel des constructions sensibles :
  - Capteurs de déformations installés sur les ponts et les passages supérieurs/inférieurs reliant les différentes parties des villages à risque et dont le réaménagement (voire l'évacuation) sera (ou est déjà) programmé : jauges de déformation, extensomètres, fissuromètres
  - Capteurs installés sur les bâtiments proches de la zone côtières mesurant les fissurations au niveau des fondations ainsi que sur les éléments porteurs (poutres, poteaux) et les cloisons : fissuromètres
  - Capteurs spécifiques aux données météorologiques, principalement aux variations de la température : station météorologique ou pour un cas plus simple des capteurs de température installés sur les ponts et les bâtiments sensibles
- Capteurs spécifiques aux grandeurs dynamiques peuvent être aussi installés sur les spots très sensibles : vibromètres au niveau des fondations (constructions à vocation résidentielle ou industrielle, hôpitaux, instituts d'éducation, etc.), accéléromètres sur les ponts (en particulier sur les piles en rivière afin de détecter le phénomène d'affouillement qui sera potentiellement aggravé et accéléré par les inondations ainsi que le phénomène d'érosion et l'augmentation du niveau d'eau).

Il est à noter qu'un croisement des données obtenues via des solutions satellitaires et les mesures déterminées in-situ présente une brique essentielle pour l'aide à la décision dans la gestion de la vulnérabilité de la ville de Saint-Louis aux différents aléas dans un contexte de changement climatique. En effet, les mesures des capteurs installés in-situ spécifique à la stabilité du terrain et celle des constructions avoisinants les zones sensibles doivent être complétées et couplées avec les données satellitaires offrant une cartographie détaillée par échelle (à définir) de l'évolution des différentes caractéristiques lithologiques, hydrologiques et bathymétriques. La stabilité des trois sites cible sera alors le résultat d'indicateurs obtenus via le couplage entre les mesures liées aux contraintes environnementales et climatiques (obtenus principalement par un suivi satellitaire) et les données de monitoring in-situ spécifique à l'évolution de l'état mécanique des différentes structures identifiées et classées selon leur niveau de sensibilité.



Figure 52 : Principe de surveillance par imagerie satellitaire et instrumentation in-situ

### 5.2.2. Déclinaison du système de monitoring en fonction des zones cibles

Le système de monitoring aura des composants différents dans les différentes zones de Saint-Louis : zone côtières vs zone intérieure (bâtiment et infrastructures).

#### Zones côtières

La caractérisation des zones côtières et la surveillance des éléments pouvant engendrer des risques au niveau de ces régions présentent les principaux objectifs du système de monitoring spatial à mettre en œuvre. Afin de répondre à ces besoins, les paramètres suivants doivent être monitorés :

**Bathymétrie littorale :** La caractérisation de la topographie et de la bathymétrie de la zone côtière avec une bonne précision et une résolution spatiale et temporelle élevée présentent une condition nécessaire à la modélisation et l'estimation des différents facteurs d'aléas côtiers ainsi que des aléas eux-mêmes. Dans la zone côtière, la bathymétrie satellitaire peut atteindre des résolutions horizontales très fines en utilisant les images optiques ou celles issues de la technique SAR (Synthetic Aperture Radar). La résolution horizontale de ces bathymétries dépendra du capteur optique : elle varie d'une résolution grossière avec, par exemple, le satellite Landsat (résolution ~ 30 m), à moyenne avec SPOT et Sentinel-2 (résolution de 10 m), et à élevée avec l'utilisation des satellites commerciaux tels que IKONOS (résolution de 1m) et Quickbird ou WorldView (résolution de 50-60 cm). L'un des grands avantages de cette approche réside dans son autonomie. De plus, elle ne nécessite pas d'informations supplémentaires issues d'observations ou de modèles en plus de celles acquises au moyen de la télédétection par satellite.

**Topographie côtière :** Plusieurs méthodes existent pour cartographier la topographie côtière à l'aide de satellites tels que SPOT, Landsat-8/OLI, Sentinel-2/MSI, WorldView, Quickbird, IKONOS, Pléiades, etc. En analysant les couples stéréoscopiques d'images optiques satellitaires, il est possible d'étudier les zones côtières avec des erreurs verticales inférieures à 0.5 m, tel qu'il est le cas avec le satellite Pléiades (le seul inconvénient reste le coût élevé de ce satellite). D'autre part, la topographie intertidale peut être obtenue en déterminant la position horizontale du littoral à l'aide d'images SAR ou optiques, puis en superposant les hauteurs au-dessus du niveau moyen de la mer.

**Mouvement vertical du sol :** Les méthodes classiques (par exemple : nivellement, GNSS) ne sont généralement pas adaptées à la quantification du mouvement vertical du sol avoisinant les zones côtières. En effet, les littoraux se caractérisent par un accès difficile du fait de la présence de marais, de lagunes et de cours d'eau. De plus, l'utilisation de techniques in situ dans les grandes agglomérations urbaines (qui ne cessent de croître dans les zones côtières), tel que l'île de Saint-Louis, fournit généralement une représentation trop simplifiée du schéma réel des déplacements de terres en raison du nombre limité des sites de surveillance.

Etant donné ces limitations des techniques traditionnelles, l'imagerie satellitaire devient de plus en plus adoptée. En exploitant la différence de phase des signaux radar d'un certain nombre (au moins deux) d'acquisitions de satellites sur la même zone, les techniques basées sur le SAR peuvent fournir des informations du mouvement du sol sur des millions de points dispersés sur une grande région (104-105 km<sup>2</sup>/image), avec un haut niveau de détail spatial (la résolution horizontale de l'image est de l'ordre de 25x25 m<sup>2</sup> ou moins selon le mode d'acquisition), une précision de mesure subcentimétrique, et un échantillonnage temporel de quelques jours à un mois. Cependant, il faut souligner que le nivellement et le GNSS restent d'une importance primordiale dans l'étalonnage des résultats SAR et la conversion des déplacements différentiels SAR en mesures absolues.

**Couverture du sol :** Les informations sur la couverture/l'utilisation du sol sont d'une grande importance dans la caractérisation de plusieurs aléas côtiers. Par exemple, lors d'inondations côtières, l'atténuation du niveau d'eau peut réduire considérablement l'exposition des zones, de la population et des structures aux inondations : une telle réduction est due au processus hydrodynamique lié à la rugosité de la surface terrestre, qui dépend de la couverture terrestre et de l'utilisation des terres.

Les informations liées à la couverture et l'utilisation des sols peuvent être obtenues des données des satellites Sentinel-2 ou Landsat-8 EO. En plus de la caractérisation des zones côtières, les paramètres pouvant entraîner un risque d'érosion et/ou d'inondation au niveau du sol et des bâtiments avoisinant les zones côtières doivent être suivis.

**Niveau de la mer :** Les marégraphes fournissent les observations fondamentales des changements locaux du niveau de la mer sur la côte (par rapport au niveau du sol puisqu'ils sont ancrés à terre). De

plus, les marégraphes sont la principale source d'observations du niveau de la mer à haute fréquence (<1 heure), indispensables pour observer les niveaux d'eau extrêmes sur le littoral.

Cependant, les observations marégraphiques comportent plusieurs limites. La couverture des marégraphes est plutôt clairsemée et inhomogène le long des côtes : certains processus tels que la configuration des vagues ne sont pas entièrement capturés en raison de l'emplacement du marégraphe dans des zones abritées contre les vagues. Les stations GNSS liées aux marégraphes sont alors nécessaires pour fournir un mouvement vertical du sol sur de longues périodes, mais elles sont souvent défaut (en termes de couverture spatiale).

L'altimétrie satellitaire, avec sa couverture quasi-globale et son temps de revisite assez élevé, complète alors les données marégraphiques. Néanmoins, l'altimétrie est confrontée à des problèmes d'échantillonnage concernant les variations à haute fréquence puisque les temps de revisite sont, au mieux, de 10 jours. Or, les événements extrêmes, d'une importance primordiale pour les aléas côtiers, sont très localisés dans l'espace et dans le temps alors que les résultats d'imagerie altimétrique sont séparés par des dizaines de kilomètres. Ainsi, l'altimétrie ne peut pas être considérée comme une alternative aux marégraphes lorsqu'il s'agit de surveiller les variations à haute fréquence et le niveau de la mer sur la côte.

En pratique, toutes les observations du niveau moyen et extrême de la mer sont limitées dans le temps et les résolutions spatiales : cela inclut l'altimétrie par satellite, les marégraphes et d'autres approches de surveillance du niveau de la mer (par exemple SAR, GNSS). Étant donné qu'aucune approche unique ne peut actuellement répondre à la demande d'informations sur les niveaux moyens et extrêmes de la mer, l'utilisation synergique de différentes observations et approches de modélisation (SAR : couverture spatiale importante + Marégraphes et stations GNSS : mesures à hautes fréquences et longues durées de surveillance) peut être suggérée comme une voie à suivre dans ce cas.

Vent de surface et hauteur des vagues : La hauteur significative des vagues (hauteur moyenne du tiers le plus élevé des vagues) peut être déduite de l'altimétrie par satellite. Cependant, de telles observations souffrent de limitations similaires à celles décrites pour l'altimétrie satellitaire du niveau de la mer dans la zone côtière, et peuvent de la même manière être améliorées avec le retraçage (retracking), le filtrage des données et la réduction de l'empreinte radar.

Des informations plus complètes peuvent être obtenues à partir du spectre d'onde dérivé des observations SAR (par exemple : ERS-1, ERS-2, Envisat, Sentinel-1) permettant le suivi des directions et des périodes d'onde, qui sont des paramètres essentiels en plus à une hauteur de vague significative. Il est à noter que les estimations à partir de l'imagerie SAR sont principalement fiables pour les longues houles (avec une longueur d'onde supérieure à 200m). L'imagerie optique peut être proposée comme autre alternative (complétant également les images SAR) fournissant le spectre complet des ondes directionnelles dans les zones côtières (Sentinel-2, Landsat).



Figure 53 : Zones et paramètres à monitorer par suivi satellitaire (SAR : Sentinel-1/Envisat/ERS-1... ; Imagerie multispectrale : Sentinel-2/Landsat)

### Bâtiments et infrastructures

Comme décrit ci-dessus, le système de monitoring devra mesurer des paramètres océanographiques liés directement au risque d'érosion, mais aussi des effets induits par un tel risque sur la stabilité structurelle et géotechniques des zones avoisinantes. Ainsi, un système de monitoring in-situ devrait également être mis en place au niveau des bâtiments et infrastructures stratégiques.

**Bâtiments :** Dans ce cas, le mouvement horizontal (risque d'effondrement par basculement) et vertical (tassement différentiel ou global) doivent être monitorés. Ceci peut être assuré en installant :

- Des tiltmètres au niveau des sous-sol afin de mesurer les angles de rotation permettant de caractériser le mouvement du bâtiment en question : le réseau de tiltmètres peut être renforcé par des vibromètres afin de déterminer les variations d'amplitudes et de fréquences du mouvement de la structure ;
- Des fissuromètres au niveau des fissures apparentes et évolutives : dans ce cas, des visites d'inspection doivent être réalisées au préalable ;
- Des cibles topographiques avec des stations automatiques.

De plus, des capteurs de température intégrés dans les capteurs précédemment mentionnés doivent être installés. La décorrélation thermique des mesures brutes doit être appliquée afin d'éviter les biais engendrés par les facteurs liés aux conditions environnementales.

Les bâtiments clé à inspecter pourraient inclure les bâtiments liés à des fonctions urbaines essentielles et à la gestion de crise, et situés près des berges de la Langue de Barbarie et de l'île de Saint-Louis.

**Autres Infrastructures :** Nous avons identifié quatre infrastructures clé pour le territoire de Saint-Louis :

- Le barrage de Diama ;
- Deux ponts métalliques : il s'agit des ponts Faidherbe et Ousmane Massack Ndiaye ;
- Et le pont Mustapha Malick Gaye en béton.

La conception d'un système de monitoring dédié à ces ouvrages est décrite dans le tableau et les Figure ci-dessous.

Tableau 10 : Capteurs à mettre en place sur les infrastructures clés de Saint-Louis

Ouvrage	Paramètres physiques à suivre	Instrumentation
<b>Ponts métalliques</b>	Mouvement au niveau des joints	Extensomètres
	Mouvement du tablier	Jauges de déformation (loin des zones d'appuis) + Tiltmètres (près des zones d'appuis) + Accéléromètres
	Mouvement des barres	Tiltmètres/Jauges de déformations
	Mouvement des piles (risque d'affouillement)	Accéléromètres 2D + Tiltmètres + Capteur de déplacement
	Conditions environnementales	Stations Météo (mesure de température, du vent, du niveau d'eau)
<b>Pont en béton</b>	Mouvement au niveau des joints	Extensomètres
	Mouvement du tablier	Jauges de déformation (loin des zones d'appuis) + Tiltmètres (près des zones d'appuis) + Accéléromètres
	Mouvement des piles (risque d'affouillement)	Accéléromètres 2D + Tiltmètres + Capteur de déplacement
	Conditions environnementales	Stations Météo (mesure de température, du vent, du niveau d'eau)
<b>Barrage de Diama</b>	Mouvement des parements	Segments inclinométrique + accéléromètres (suivi des fréquences propres)
	Mouvement du sol (horizontal et vertical)	Chaînes inclinométriques
	Niveau d'eau	Piézomètres

	Température	Capteurs de températures (de préférence intégrés dans les capteurs de mesures des paramètres structuraux)
--	-------------	---



Figure 54 : Capteurs à mettre en place sur le pont Massack Ndiaye



Figure 55 : Capteurs à mettre en place sur le pont Faidherbe

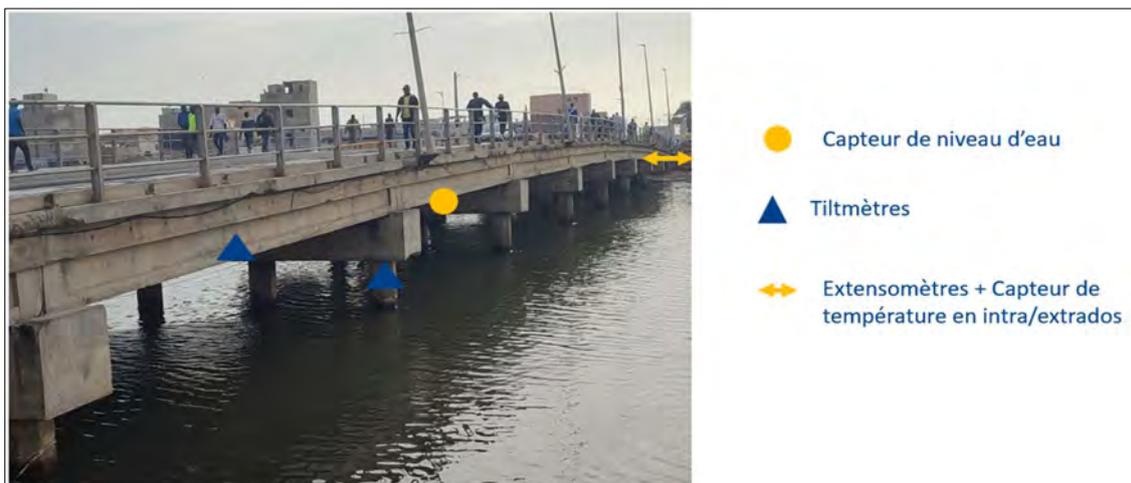


Figure 56 : Capteurs à mettre en place sur le pont Mustapha Malick Gaye

### 5.2.3. Système de monitoring en fonction des zones cibles

L'analyse des projets et initiatives en cours (5.1.3) montrent que la stratégie de protection côtière pourrait être renforcée par une vision à long terme et un suivi de l'évolution des infrastructures et des

aléas. Dans cette optique, nous avons développé un cadre de conception d'un système de monitoring pour les infrastructures critiques de Saint-Louis (Figure suivante).

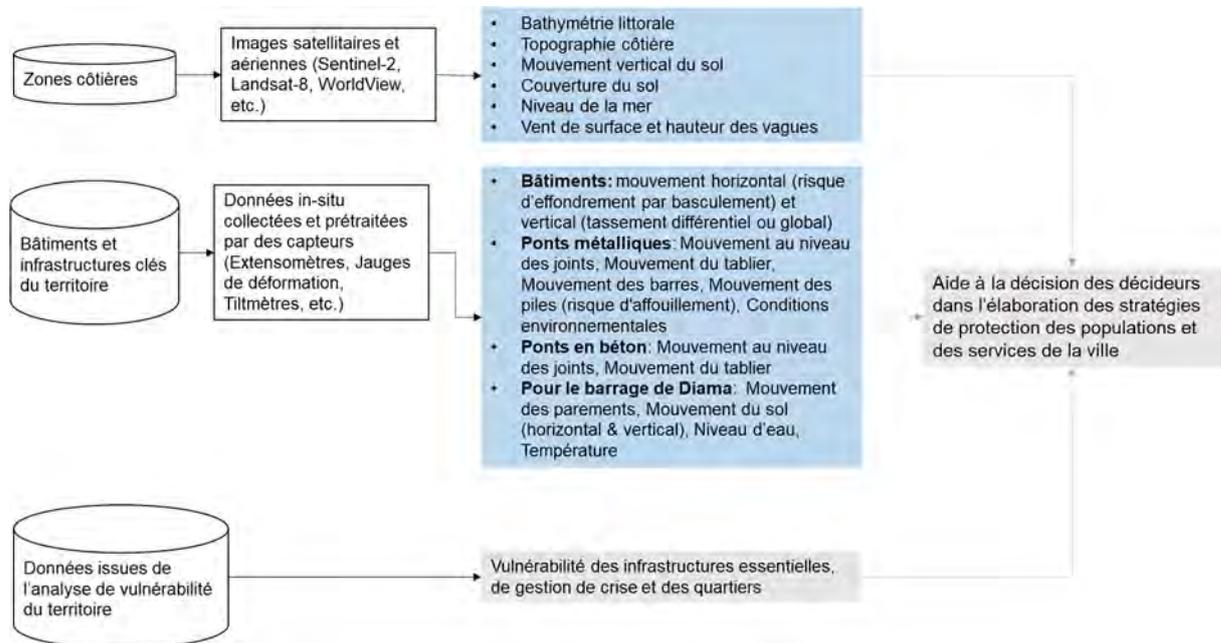


Figure 57 : Flux de travail du système de monitoring proposé pour la gestion des risques côtiers de la ville de Saint-Louis

## Conclusions

Des capteurs multispectraux de télédétection, notamment Landsat, Sentinel et Pléiades, ont été utilisés pour extraire des indicateurs de la morphologie en 2D et 3D. Les tendances de la montée du niveau de la mer ont été obtenues à partir du produit multimirage d'altimétrie satellite DUACS. Les indicateurs obtenus à partir de jeux de données de réanalyse modélisés comprenaient le modèle FES2014 pour obtenir des séries de données sur les marées, la base de données ERA 5 pour obtenir des données sur les vagues, et le MOG2D pour obtenir les valeurs de surcote.

L'Indice de Vulnérabilité Côtière montre que 70 % du site d'étude (7 km) présente des valeurs de vulnérabilité VH et H (respectivement 33 % et 37 %), suivies de 14 % de la côte (3 km) avec des valeurs M. Les valeurs L couvrent 9 % de la côte et les valeurs VL couvrent environ 7 % de la côte. De grandes grappes de valeurs de vulnérabilité VH ont été principalement trouvées dans les trois districts densément peuplés.

L'Indice de Vulnérabilité aux Inondations montre que 2,7 km (29 %) de la côte présente des valeurs H, les valeurs M correspondent à 1,5 km (16 %) et les valeurs L couvrent 4,7 km (55 %). Une zone à risque d'inondation de 2 km de longueur couvre l'ensemble de N'Dar Toute et les secteurs les plus au nord et les plus au sud des districts de Guet Ndar.

Les résultats fournis dans ce travail mettent en évidence le rôle clé des données satellitaires compilées pour investiguer avec précision la variabilité multi-échelle des systèmes côtiers en réponse aux conditions hydrodynamiques et leur vulnérabilité dans le contexte mondial du changement climatique.

Le travail effectué dans le WP4 du projet OSS ST Louis a permis d'explorer plusieurs approches et méthodes pour l'analyse de la vulnérabilité d'une ville côtière comme Saint-Louis. L'approche employée pour caractériser les aléas inondations (submersion par montée de la mer, tempête et débordement) repose principalement sur l'utilisation de données satellitaires et est ainsi aisément répliquable sur d'autres territoires. La simulation de l'aléa inondation par élévation de la mer dans un contexte de changement climatique est basée sur les résultats du GIEC qui sont disponibles sur l'ensemble du globe. Ils peuvent être obtenus à partir des rapports du GIEC ou d'outils comme le « Sea Level Projection Tool » de la NASA (2021). La simulation de l'aléa inondation par débordement dans un contexte de changement est plus incertaine sans modélisation hydraulique et nécessite un MNT de bonne résolution (moins de 2m) sur l'ensemble de la zone d'étude.

La caractérisation des enjeux et infrastructures essentiels et critiques est quant à elle dépendante de l'existence de données fiables et récentes sur les différents bâtiments et infrastructures. Celles-ci sont disponibles dans certains pays (comme la BD Topo en France) mais manquantes dans d'autres pays comme le Sénégal. Un tel jeu de données peut être reconstitué en combinant les informations de OSM, des images satellitaires et informations de Google ainsi que des informations de visites de terrain. Enfin, les infrastructures de communication ou d'énergie ne sont pas mentionnées, car comme leurs caractéristiques sont confidentielles et liées à des intérêts privés, il est difficile d'avoir des données pertinentes dessus (sans partenariat avec les autorités et entreprises de communication locales). La seule source de données est OSM, qui demande à être complétée et validée.

Le travail effectué dans le WP5 a permis d'évaluer la perception du risque des acteurs de Saint-Louis à partir d'une analyse de la littérature et des projets d'adaptation en cours, et d'enquêtes de terrain. Les résultats montrent que les populations locales sont au fait des aléas climatiques, de leur probable intensification avec le changement climatique, et de leurs impacts négatifs.

La comparaison entre les cartes de perception des risques des acteurs locaux et les cartes de vulnérabilité territoriale (combinant la vulnérabilité physique des infrastructures et l'importance des catégories d'infrastructures pour les acteurs locaux selon la méthode AHP) montrent que le recours à des analyses de vulnérabilité fines est utile pour guider la stratégie d'adaptation de la ville. Par exemple, les acteurs interrogés attribuent une vulnérabilité très forte à l'ensemble de la langue de Barbarie alors que l'analyse de vulnérabilité territoriale permet de faire une distinction entre les différents quartiers de la Langue de Barbarie, en fonction de la vulnérabilité physique et de l'importance territoriale des infrastructures de ces quartiers.

La méthode d'analyse de la perception du risque des acteurs locaux (guide d'entretien et méthode AHP) et le cadre de conception du système de monitoring pourront être répliqués dans d'autres villes côtières pour guider et alimenter la co-réflexion (scientifique, gestionnaire et acteur) et les stratégies d'adaptation au changement climatique du littoral et des villes côtières de demain.

## Références

- Bacopoulos, P. et Clark, R. R. 2021. Érosion côtière et dommages structurels dus à quatre ouragans majeurs consécutifs : Beach projects afford resilience and coastal protection. *Ocean & Coastal Management*, 209(105643).
- Benveniste, J., Cazenave, A., Vignudelli, S., Fenoglio-Marc, L., Shah, R., Almar, R., Andersen, O., Birol, F., Bonnefond, P., Bouffard, J., Calafat, F., Cardellach, E., Cipollini, P., Le Cozannet, G., Dufau, C., Fernandes, M. J., Frappart, F., Garrison, J., Gommenginger, C., Han, G., Høyer, J. L., Kourafalou, V., Leuliette, E., Li, Z., Loisel, H., Madsen, K. S., Marcos, M., Melet, A., Meyssignac, B., Pascual, A., Passaro, M., Ribó, S., Scharroo, R., Song, Y. T., Speich, S., Wilkin, J., Woodworth, P. & Wöppelmann, G. 2019. Exigences pour un système d'observation des risques côtiers. *Frontiers in Marine Science*, 6(en ligne), pp.
- Bergsma, E. W. J., Sadio, M., Sakho, I., Almar, R., Garlan, T., Gosselin, M. & Gauduin, H. 2020. Evolution des flèches sableuses et dynamique du bras de mer dérivée de l'imagerie optique spatiale : Is the Senegal-river Inlet Closing ? *Journal of Coastal Research*, 95(sp1), pp 372-376, 5.
- Carrere, L., Lyard, F., Cancet, M., Guillot, A. & Picot, N. 2016. FES 2014, un nouveau modèle de marée - Résultats de validation et perspectives d'amélioration. *ESA Living Planet Conference Prague*
- Corbella, S. et Stretch, D. D. 2013. Simulation d'une tempête marine multivariée à l'aide de copules d'Archimède. *Coastal Engineering*, 76(68-78).
- Dee, D. P., Uppala, S. M., Simmons, A. J., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., Andrae, U., Balmaseda, M. A., Balsamo, G., Bauer, P., Bechtold, P., Beljaars, A. C. M., van de Berg, L., Bidlot, J., Bormann, N., Delsol, C., Dragani, R., Fuentes, M., Geer, A. J., Haimberger, L., Healy, S. B., Hersbach, H., Hólm, E. V., Isaksen, I., Kållberg, P., Köhler, M., Matricardi, M., McNally, A. P., Monge-Sanz, B. M., Morcrette, J.-J., Park, B.-K., Peubey, C., de Rosnay, P., Tavolato, C., Thépaut, J.-N. & Vitart, F. 2011. La réanalyse ERA-Interim : configuration et performance du système d'assimilation de données. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 137(656), pp 553-597.
- Delbour, S., Fretin, D., Gastal, V., Fang, F., Hirschmugl, M. & Proske, H. 2019. EO4SD-Earth Observation for Sustainable Development, Urban Saint Louis City Operations Report, (France).
- Dorsch, W., Newland, T., Tassone, D., Tymons, S. & Walker, D. 2009. A Statistical Approach to Modelling the Temporal Patterns of Ocean Storms (Approche statistique de la modélisation des schémas temporels des tempêtes océaniques). *Journal of Coastal Research*, 24(1430-1438).
- Drusch, M., Del Bello, U., Carlier, S., Colin, O., Fernandez, V., Gascon, F., Hoersch, B., Isola, C., Laberinti, P., Martimort, P., Meygret, A., Spoto, F., Sy, O., Marchese, F. & Bargellini, P. 2012. Sentinel-2 : ESA's Optical High-Resolution Mission for GMES Operational Services. *Remote Sensing of Environment*, 120( ), pp 25-36.
- Emanuel, K. 2005. Augmentation du pouvoir destructeur des cyclones tropicaux au cours des 30 dernières années. *Nature*, 436(7051), pp 686-688.

- Faugère, Y., Taburet, G., Ballarotta, M., Pujol, I., Legeais, J. F., Maillard, G., Durand, C., Dagneau, Q., Lievin, M., Sanchez Roman, A. & Dibarboure, G. 2022. DUACS DT2021 : 28 ans de produits altimétriques retraités sur le niveau de la mer. *Assemblée générale de l'EGU 2022*. Vienne, Autriche.
- Gornitz, V. 1991. Global coastal hazards from future sea level rise (Risques côtiers mondiaux liés à l'élévation future du niveau de la mer). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 89(4), pp 379-398.
- Harley, M. D. 2017. Définition des tempêtes côtières. In : Ciavola, P. & Coco, G. (eds.) *Coastal Storms : Processes and Impacts*. West Sussex, UK : Wiley-Blackwell.
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Abellan, X., Balsamo, G., Bechtold, P., Biavati, G., Bidlot, J., Bonavita, M., De Chiara, G., Dahlgren, P., Dee, D., Diamantakis, M., Dragani, R., Flemming, J., Forbes, R., Fuentes, M., Geer, A., Haimberger, L., Healy, S., Hogan, R. J., Hólm, E., Janisková, M., Keeley, S., Laloyaux, P., Lopez, P., Lupu, C., Radnoti, G., de Rosnay, P., Rozum, I., Vamborg, F., Villaume, S. & Thépaut, J.-N. 2020. The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730), pp 1999-2049.
- GIEC. 2022. Changement climatique 2022 : impacts, adaptation et vulnérabilité. Contribution du groupe de travail II au sixième rapport d'évaluation du groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, (Royaume-Uni et New York, États-Unis).
- Jiménez, J. A., Gracia, V., Valdemoro, H. I., Mendoza, E. T. & Sánchez-Arcilla, A. 2011. Managing erosion-induced problems in NW Mediterranean urban beaches (Gestion des problèmes induits par l'érosion dans les plages urbaines du nord-ouest de la Méditerranée). *Ocean & Coastal Management*, 54(12), pp 907-918.
- Jiménez, J. A., Sancho-García, A., Bosom, E., Valdemoro, H. I. & Guillén, J. 2012. Storm-induced damages along the Catalan coast (NW Mediterranean) during the period 1958-2008. *Geomorphology*, 143-144(24-33).
- Koroglu, A., Ranasinghe, R., Jiménez, J. A. & Dastgheib, A. 2019. Comparaison des applications de l'indice de vulnérabilité côtière pour la province de Barcelone. *Ocean & Coastal Management*, 178( ), pp 104799.
- Lyard, F. H., Allain, D. J., Cancet, M., Carrère, L. & Picot, N. 2021. L'atlas mondial des marées océaniques FES2014 : conception et performance. *Ocean Sci.*, 17(3), pp 615-649.
- Malenovský, Z., Rott, H., Cihlar, J., Schaepman, M. E., García-Santos, G., Fernandes, R. & Berger, M. 2012. Des sentinelles pour la science : Potentiel des missions Sentinel-1, -2 et -3 pour l'observation scientifique des océans, de la cryosphère et des terres. *Remote Sensing of Environment*, 120( ), pp 91-101.
- Mendoza, E. T. & Jiménez, J. A. 2006. Storm-Induced Beach Erosion Potential on the Catalonian Coast. *Journal of Coastal Research*, 81-88.
- Mendoza, E. T., Jimenez, J. A. & Mateo, J. 2011. A coastal storms intensity scale for the Catalan sea (NW Mediterranean). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11(9), pp 2453-2462.

- Ndour, A., Laïbi, R. A., Sadio, M., Degbe, C. G. E., Diaw, A. T., Oyédé, L. M., Anthony, E. J., Dussouillez, P., Sambou, H. & Dièye, E. h. B. 2018. Stratégies de gestion des problèmes d'érosion côtière en Afrique de l'Ouest : Analyse, enjeux et contraintes à partir des exemples du Sénégal et du Bénin. *Ocean & Coastal Management*, 156( ), pp 92-106.
- Neumann, B., Vafeidis, A. T., Zimmermann, J. & Nicholls, R. J. 2015. Future Coastal Population Growth and Exposure to Sea-Level Rise and Coastal Flooding - A Global Assessment (Croissance future de la population côtière et exposition à l'élévation du niveau de la mer et aux inondations côtières - une évaluation mondiale). *PLOS ONE*, 10(3), pp e0118571.
- Nicholls, R. J., Hanson, S. E., Lowe, J. A., Warrick, R. A., Lu, X. & Long, A. J. 2014. Scénarios de niveau de la mer pour l'évaluation des impacts côtiers. *WIREs Climate Change*, 5(1), pp 129-150.
- Pendleton, E. A., Thieler, E. R., Williams, S. J. & Beavers, R. S. 2004. Coastal Vulnerability Assessment of Padre Island National Seashore (PAIS) to Sea-Level Rise, (USA).
- Pilkey, O. H., Davis, T. W., Nummedal, D., Pilkey, O. H. & Howard, J. D. 1987. An Analysis of Coastal Recession Models : North Carolina Coast. *Sea-Level Fluctuation and Coastal Evolution*. SEPM Society for Sedimentary Geology.
- Rouhaud, E. & Vanderlinden, J.-P. 2022. 10 ans et ça continue ? La gestion du risque d'inondation côtière à la suite d'un événement côtier majeur (tempête Xynthia 2010, Charente Maritime, France). *Climate Risk Management*, 35(100413).
- Sadio, M., Anthony, E. J., Diaw, A. T., Dussouillez, P., Fleury, J. T., Kane, A., Almar, R. & Kestenare, E. 2017. Changements du littoral sur le delta du fleuve Sénégal influencé par les vagues, Afrique de l'Ouest : The Roles of Natural Processes and Human Interventions. *Water*, 9(5), pp 357.
- Seck, A. 2010. *Développement urbain, changement climatique et gestion des risques d'inondation : une étude de cas à Saint-Louis du Sénégal*. Mémoire de Master.
- Showstack, R. 2014. Les satellites sentinelles inaugurent une nouvelle ère dans l'observation de la Terre. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 95(26), pp 239-240.
- Stockdon, H. F., Holman, R. A., Howd, P. A. & Sallenger Jr, A. H. 2006. Empirical parameterization of setup, swash, and runup. *Coastal Engineering*, 53(7), pp 573-588.
- Taveneau, A., Almar, R., Bergsma, E. W. J., Sy, B. A., Ndour, A., Sadio, M. & Garlan, T. 2021. Observing and Predicting Coastal Erosion at the Langue de Barbarie Sand Spit around Saint Louis (Senegal, West Africa) through Satellite-Derived Digital Elevation Model and Shoreline. *Remote Sensing*, 13(13), pp.
- Thieler, E. R. & Hammar-Klose, E. S. 2000. National assessment of coastal vulnerability to sea-level rise ; preliminary results for the U.S. Pacific Coast, (USA).
- Thieler, E. R., Himmelstoss, E. A., Zichichi, J. L. & Ergul, A. 2009. The Digital Shoreline Analysis System (DSAS) Version 4.0, (USA).
- ONU. 2017. Fiche d'information : Les peuples et les océans. (New York).

- von Schuckmann, K., Le Traon, P.-Y., Smith, N., Pascual, A., Brasseur, P., Fennel, K., Djavidnia, S., Aaboe, S., Fanjul, E. A., Autret, E., Axell, L., Aznar, R., Benincasa, M., Bentamy, A., Boberg, F., Bourdallé-Badie, R., Nardelli, B. B., Brando, V. E., Bricaud, C., Breivik, L.-A., Brewin, R. J. W., Capet, A., Ceschin, A., Ciliberti, S., Cossarini, G., de Alfonso, M., de Pascual Collar, A., de Kloe, J., Deshayes, J., Desportes, C., Dréville, M., Drillet, Y., Droghei, R., Dubois, C., Embury, O., Etienne, H., Fratianni, C., Lafuente, J. G., Sotillo, M. G., Garric, G., Gasparin, F., Gerin, R., Good, S., Gourrion, J., Grégoire, M., Greiner, E., Guinehut, S., Gutknecht, E., Hernandez, F., Hernandez, O., Høyer, J., Jackson, L., Jandt, S., Josey, S., Juza, M., Kennedy, J., Kokkini, Z., Korres, G., Kõuts, M., Lagema, P., Lavergne, T., le Cann, B., Legeais, J.-F., Lemieux-Dudon, B., Levier, B., Lien, V., Maljutenko, I., Manzano, F., Marcos, M., Marinova, V., Masina, S., Mauri, E., Mayer, M., Melet, A., Mélin, F., Meyssignac, B., Monier, M., Müller, M., Mulet, S., Naranjo, C., Notarstefano, G., Paulmier, A., Gomez, B. P., Gonzalez, I. P., Peneva, E., Perruche, C., Andrew Peterson, K., Pinardi, N., Pisano, A., Pardo, S., Poulain, P.-M., Raj, R. P., Raudsepp, U., Ravdas, M., Reid, R., Rio, M.-H., Salon, S., Samuelson, A., Sammartino, M., Sammartino, S., et al. 2018. Copernicus Marine Service Ocean State Report. *Journal of Operational Oceanography*, 11(sup1), pp S1-S142.
- Vos, K., Harley, M. D., Splinter, K. D., Walker, A. & Turner, I. L. 2020. Beach Slopes From Satellite-Derived Shorelines. *Geophysical Research Letters*, 47(14), pp e2020GL088365.
- Vos, K., Splinter, K. D., Harley, M. D., Simmons, J. A. & Turner, I. L. 2019. CoastSat : Une boîte à outils Python compatible avec le moteur Google Earth pour extraire les lignes de rivage de l'imagerie satellitaire disponible publiquement. *Environmental Modelling & Software*, 122( ), pp 104528.
- Walker, R. A. et Basco, D. R. 2011. Application of coastal storm impulse (COSI) parameter to predict coastal erosion (Application du paramètre d'impulsion de la tempête côtière (COSI) pour prédire l'érosion côtière). *Coastal Engineering Proceedings*, 1(32), pp.
- Wallace, J. M. et Hobbs, P. V. 2006. *Science de l'atmosphère : An Introductory Survey : Deuxième édition*.

## Annexe 1

Voici les différentes étapes qui ont été réalisées en utilisant la boîte à outils OTB (Orfeo ToolBox) et le logiciel QGIS (Annexe 1):

1. Corrections atmosphériques : élimination des effets atmosphériques qui peuvent affecter la qualité de l'image multispectrale. Cela permet de rendre les couleurs de l'image plus cohérentes et d'éliminer les biais dus aux variations des conditions atmosphériques.
2. Orthorectification : correction des distorsions géométriques dans l'image. Cela permet d'obtenir une image géoréférencée qui peut être utilisée pour l'analyse géospatiale.
3. Rééchantillonnage : conversion de l'image multispectrale à une résolution spatiale spécifique. Cela permet d'ajuster l'image à la résolution souhaitée pour une analyse plus précise. C'est une étape préparative à l'étape suivante.
4. Affinage panchromatique (Pansharpening) : fusion de la bande spectrale panchromatique haute résolution avec les bandes multispectrales basse résolution. Cela permet d'obtenir une image à haute résolution spatiale et spectrale.
5. Segmentation : division de l'image en segments ou en régions homogènes. Cela permet de réduire la complexité de l'image et de faciliter la classification.
6. Statistiques zonales : calcul des statistiques (moyenne, maximum, minimum, etc.) pour chaque segment créé lors de la segmentation. Cela permet de générer des variables quantitatives qui seront utilisées pour l'apprentissage du modèle de classification.
7. Échantillonnage : sélection manuel des objets (segments) dans les différentes classes d'occupation du sol. Cela permet de collecter des données d'apprentissage pour entraîner le modèle de classification.
8. Fusion de couches : combinaison des couches créées lors des étapes précédentes en une seule couche.
9. Apprentissage (modèle SVM - Support Vector Machine) : entraînement d'un modèle de classification en utilisant les données d'apprentissage collectées précédemment. Cela permet de classifier l'occupation du sol pour chaque segment de l'image.
10. Classification : utilisation du modèle de classification sur l'image entière pour générer la carte d'occupation du sol finale.