

ANALYSE DE L'ÉVOLUTION DU LITTORAL

L'accrétion de sable à l'amont d'un brise-lames et l'érosion à l'aval sont des phénomènes communs dans la gestion littorale. Des changements de la géomorphologie du littoral, semblables à ceux rencontrés par Nouakchott, ont également affecté d'autres endroits : Santa Barbara, Etats-Unis (Komar, 1998) ; Lanshan, Chine (Chang, 1997) ; Hualien, Taiwan (Hsu *et al.*, 2000) ; Fortaleza, Brésil (Maia *et al.*, 1998) ; la plage de Jacarepagua, environs de Rio de Janeiro, Brésil (Paskoff, 1998) ; le delta du nord-est du Nil, Egypte (Frihy *et al.*, 1998). Ainsi, la détection, le suivi et la cartographie du changement sont importants pour comprendre l'évolution du littoral due à un aménagement artificiel ainsi que l'évaluation de ses impacts sur le littoral et l'environnement humain.

L'application des méthodes de télédétection pour le suivi du changement côtier date d'une quarantaine d'années. Dès 1963, Verstappen avait commencé à employer les photographies aériennes pour mesurer les changements du delta Solo en Mer de Java. En 1971, Stafford et Langfelder ont utilisé de telles photos pour examiner l'érosion côtière. Dès lors, une variété de techniques et de capteurs aéroportés et spatiaux tels que Landsat MSS (Jensen *et al.*, 1987), la photogrammétrie aérienne (Ramsey, 1997 et Gorman *et al.*, 1998), Landsat TM (Ramsey, 1997), le radar (Jol *et al.*, 1996, 1999 et Ramsey *et al.*, 1998) et le LIDAR (Daniel *et al.*, 1998), ont été exploités dans différents projets de recherche sur les milieux littoraux. Les techniques de mesure, récemment développées,

telles que la photogrammétrie aéroportée et le LIDAR fournissent des mesures de haute résolution avec moins d'erreur. En raison de la disponibilité des données et de leur haute résolution, les images multi-temporelles de SPOT XS (tableau 3-1) ont été choisies pour accomplir cette analyse de changement ainsi que la surveillance de l'évolution du littoral.

1. METHODOLOGIE

Pour appréhender des changements à partir de données de télédétection à différentes dates, plusieurs méthodes de traitement sont actuellement disponibles : la comparaison de post-classification (Weismiller *et al.*, 1977 ; Gorden, 1980) et la soustraction (*differencing*) d'images (Jensen *et al.*, 1982 ; Quarmby *et al.*, 1989 ; Singh, 1989 et Wu *et al.*, 2002a). Quelques auteurs (Wu *et al.*, 2003a) ont suggéré une approche par 'vectorisation en superposition' pour mesurer les changements lorsque l'utilisation de ces méthodes traditionnelles n'est pas possible. Puisqu'il y a, dans le canal rouge, une différence évidente, entre la réflectance de l'eau et celle de la terre, la procédure de différenciation (*differencing*) des niveaux de gris a été appliquée aux images SPOT XS et panchromatique (Pan) multi-dates pour mettre en évidence les changements géomorphologiques côtiers. On a procédé selon les démarches suivantes :

PREPARATION

Pour améliorer la comparaison entre les images et la distinction de la réflectance entre terre et eau, trois images de SPOT Pan (résolution 10m) datées respectivement du 22 janvier 2001, 11 novembre 1999, du 4 février 1995 et une image multispectrale XS2 (le canal rouge à résolution de 20 m) du 3 novembre 1989 ont été observées. Leurs caractéristiques sont présentées dans le tableau 3-1.

La Pan 1999 fut la première corrigée géométriquement au moyen d'une carte bathymétrique de Nouakchott dans le datum WGS84 et la projection UTM (Zone 28) avec une erreur de RMS de 1,5 pixel. Ensuite cette image corrigée a été utilisée pour rectifier les autres images Pan et XS. Cette rectification image par image s'est terminée en utilisant la méthode polynomiale (modèle d'ordre 3 et ré-échantillonnage bilinéaire) avec l'erreur de RMS de 0,21 à 0,33 pixel.

Les brisants qui pouvaient être confondus avec la plage sur les images Pan et XS ont été reconnus visuellement et masqués.

SOUSTRACTION (DIFFERENCING)

Au moyen des données ci-dessus, nous avons créé un fichier contenant les quatre images (longueur d'onde : 0,630 et 0,645 μm), effectué ensuite une soustraction entre deux de ces bandes pour effectuer une différenciation (*differencing*) d'images. Une nouvelle image avec trois bandes a donc été

constituée où la bande 1, représente le résultat de la soustraction en niveau de gris entre les images Pan 2001 et 1999, la bande 2 entre Pan 1999 et 1995 et la bande 3 entre Pan 1995 et XS2 1989.

Bande 1 = $\Delta_{2001-1999}$ = Niveau de gris de Pan 2001 – Niveau de gris de Pan 1999 ;

Bande 2 = $\Delta_{1999-1995}$ = Niveau de gris de Pan 1999 – Niveau de gris de Pan 1995 ;

Bande 3 = $\Delta_{1995-1989}$ = Niveau de gris de Pan 1995 – Niveau de gris de XS2 1989.

Après soustraction, les valeurs de comptes numériques sont comprises entre –255 et +255. Les valeurs positives montrent les zones d'accroissement alors que les valeurs négatives indiquent les zones érodées.

EXTRACTION DU CHANGEMENT ET COMPOSITION COLOREE

Une composition colorée de la nouvelle image a été réalisée à partir des trois bandes obtenues par la méthode de soustraction. Pour souligner l'accrétion de la plage au nord du port ($\Delta > 0$), nous avons "seuillé" l'histogramme en supprimant toutes les valeurs négatives (figure III-5a). Nous avons fait de même pour mettre en évidence les zones d'érosion ($\Delta < 0$) en excluant les valeurs positives (figure III-5b).

QUANTIFICATION DU CHANGEMENT

Une vectorisation a été pratiquée pour quantifier l'accrétion et l'érosion de la plage à différentes dates autour du port et de l'épi. Les changements de 1989 à 1995, de 1995 à 1999 et de 1999 à 2001 ont été mesurés ; ils sont présentés dans le tableau 3-5.

2. RESULTATS

La détection des changements indique que la plage du nord s'est étendue de $0,92 \pm 0,02 \text{ km}^2$ avec un taux moyen d'accrétion de $0,08 \text{ km}^2/\text{a}$. Par contre, la barrière lagunaire du sud a diminué $1,34 \pm 0,04 \text{ km}^2$ avec un taux d'érosion de $0,12 \text{ km}^2/\text{an}$, au cours de la période 1989-2001. La modification la plus significative concerne ce dernier secteur érodé.

L'analyse du tableau 3-5 prouve également que le taux de changement des deux types est différent d'une période à l'autre. De 1989 à 2001, l'accrétion semble plus rapide que l'érosion.

Une accumulation de sable d'environ $0,04 \text{ km}^2$ a été détectée sur la petite plage à l'amont de l'épi (Figure III-5a).

Plus de 15 kilomètres de la plage du sud sont exposés à l'érosion, ce qui a causé la disparition de la barrière de la lagune en 1995, puis de la lagune entière en 1999.

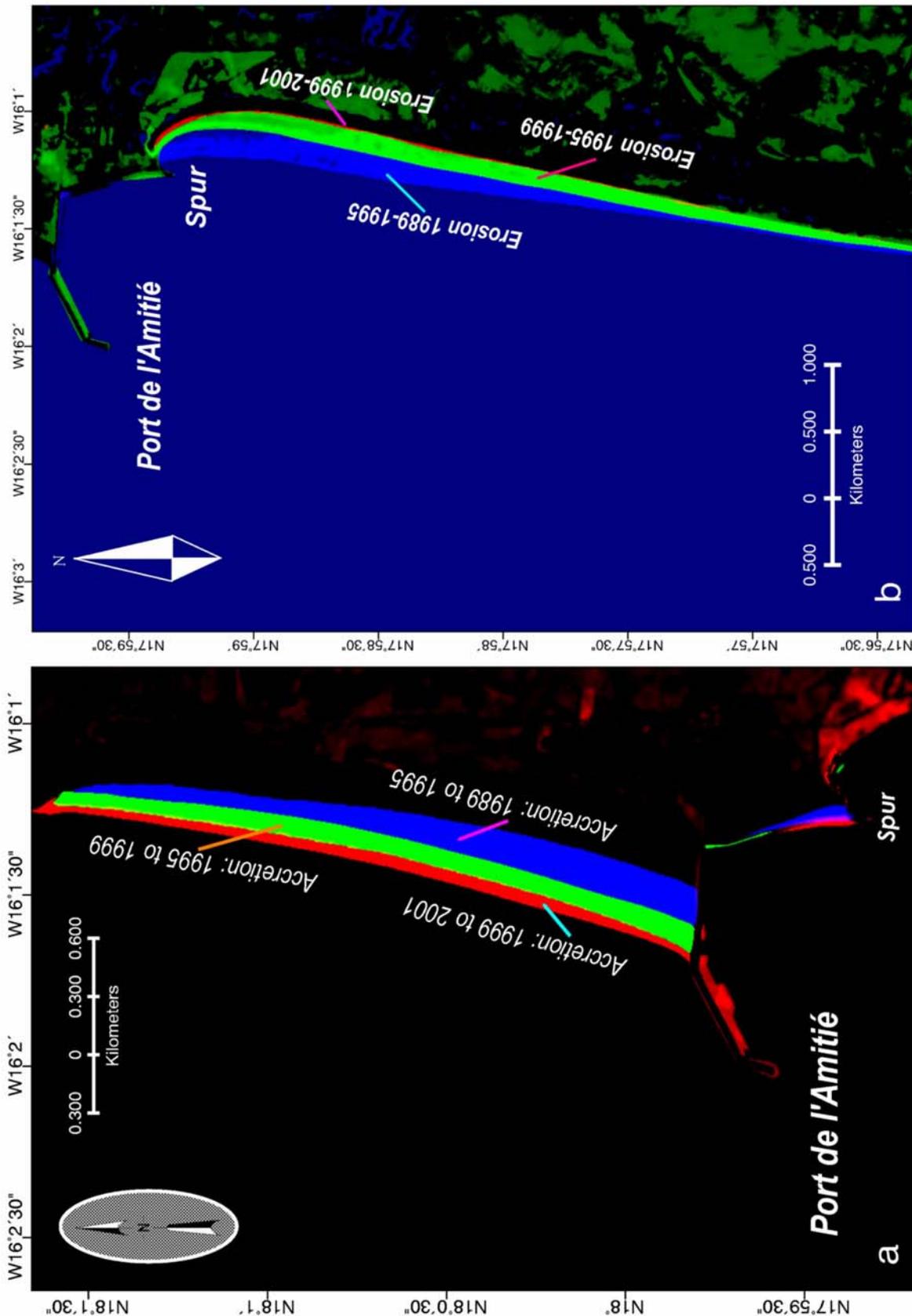


Figure III-5 : Changements du littoral aux abords du Port de l'Amitié à Nouakchott entre 1989 et 2001

a : accretion à l'amont et b : érosion à l'aval de 1989 à 1995, de 1995 à 1999 et de 1999 à 2001.

Tableau 3-5 : Surfaces et taux de changement littoral autour du Port de l'Amitié

| Position | Changement | 1989-1995 | 1995-1999 | 1999-2001 | Total | Erreur |
|--------------------|--|-----------|-----------|-----------|-------|--------|
| A l'amont du port | Accrétion (km ²) | 0,41 | 0,33 | 0,17 | 0,92 | 0,023 |
| | Taux d'accrétion moyenne (km ² /an) | 0,08 | 0,07 | 0,14 | 0,08 | 0,002 |
| A l'amont de l'épi | Accrétion (km ²) | 0,02 | 0,01 | 0,01 | 0,04 | 0,007 |
| A l'aval du port | Erosion (km ²) | 0,63 | 0,64 | 0,07 | 1,34 | 0,041 |
| | Taux d'érosion moyenne (km ² /an) | 0,12 | 0,13 | 0,05 | 0,12 | 0,011 |

3. ANALYSE DE L'EVOLUTION POTENTIELLE DE LA COTE

Les côtes évoluent par érosion et sédimentation. Ces phénomènes s'expliquent d'abord par le jeu des vagues et des marées ainsi que par celui des courants qu'elles engendrent. Mais l'homme est devenu, volontairement mais aussi involontairement, un agent essentiel de l'évolution de beaucoup de rivages marins (Paskoff 1998).

Les changements morphologiques du littoral à Nouakchott découlent d'une modification de l'hydrodynamique côtière, telle que la direction et la vitesse du courant côtier qui résulte de la construction du port. La connaissance du courant et des changements morphologiques dans le passé est utile pour comprendre l'évolution potentielle à venir.

VAGUES ET DERIVE LITTORALE

Les vagues apparaissent quand la vitesse du vent excède 3 à 4 m/s. Leurs caractéristiques dépendent de la vitesse du vent, de la durée pendant laquelle il souffle, de l'étendue d'eau. Au large, les relations suivantes permettent de caractériser les vagues (Paskoff, 1998) :

$$v = gT/2\pi \text{ et } \lambda = gT^2/2\pi \dots\dots\dots(III-2)$$

λ étant la longueur d'onde exprimée en mètres, T la période exprimée en secondes, v la vitesse exprimée en m/s et g l'accélération de la pesanteur (9,81 m/s²). Si la longueur d'onde des vagues peut être mesurée, nous pouvons calculer leur vitesse de propagation.

Les vagues et la direction de leur propagation peuvent être identifiées sur les images de télédétection grâce à leur réflectance dans les bandes visibles. De plus, la mesure de direction peut révéler l'interaction entre vagues et courants (Cuq, 1984, 1991). Ces informations sont utiles pour mieux comprendre les caractéristiques de la dérive littorale à Nouakchott.

Sur les images XS de SPOT, datées du 3 novembre 1989, la direction des plans de houle dans le secteur côtier est de 30°O avec une longueur d'onde d'environ 880m (figure III-6). Une orientation de 60°O avec une longueur d'onde de 125m environ a été reconnue sur l'image SPOT Pan du 4 février 1995 (figure III-7a). Selon la formule (1), nous obtenons les résultats suivants à Nouakchott :

La période de propagation $T \approx 24s$ et la vitesse des houles $v \approx 37$ m/s pour la mer du 3 novembre 1989 ; $T \approx 9$ s et $v \approx 14$ m/s pour la mer du 4 février 1995.

La photographie prise en juillet 2000 montre également une direction semblable des vagues (figure III-7b). Bien qu'il y ait quelques différences d'orientation et de longueur d'onde, les vagues observées sur les images et les photos sont principalement orientées nord-ouest. En fait, une telle direction concerne 48,6 % des vagues (Courel, 1998) ; donc cette direction est dominante.

D'après la propagation des vagues, on peut supposer qu'un courant côtier coule du nord au sud à Nouakchott (figure III-7a et 7b). C'est, en fait, la composante côtière du courant des Canaries qui se déplace du nord-est au sud-ouest vers la mer mauritanienne (Lanjamet, 1988). Cette composante apporte la dérive littorale et joue un rôle important dans les changements de la géomorphologie du littoral car elle met en mouvement des sédiments et les transporte quand sa vitesse est supérieure à une certaine valeur. Elle les dépose lors du ralentissement jusqu'à une certaine limite.

La vitesse de la dérive littorale dépend de plusieurs facteurs : périodes et angle d'incidence des vagues, hauteur de celles-ci au moment du déferlement, pente et rugosité de l'espace infralittoral (Paskoff, 1998). Elle n'est pas facile à calculer. Il existe cependant des formules qui permettent de faire des estimations. Parmi elles, celle de Putnam *et al.* (1949) retouchée par Inman-Quinn, est souvent employée car ses résultats sont confirmés par des mesures de terrain (Chang, 1997) :

$$V = [((1/4X^2) + Y)^{1/2} - (1/2X)]^{1/2} \dots\dots\dots(III-3)$$

$$X = 646 H p \cos \alpha / T$$

$$Y = (2.28 g H)^{1/2} \sin \alpha$$

Où V est la vitesse de la dérive littorale en m/s ; p , la pente de l'espace infralittoral ; H , la hauteur des vagues en mètres au moment du déferlement ; α , l'angle d'incidence avec le rivage des vagues qui se brisent ; T , la période de houle en secondes.

La pente du fond infralittoral à Nouakchott est très faible. A partir de la carte bathymétrique, p (la pente) obtient une valeur de 0,18 % à 0,3 % avec une moyenne de 0,24 %. La hauteur H mesurée est de 1-2 m avec une moyenne de 1,5 m (Lanjamet, 1988). L' α est d'environ 45°, en moyenne, pour les houles du 3 novembre 1989 et 20° pour celles du 4 février 1995 mesurées sur les images SPOT. En utilisant les résultats obtenus ci-dessus, les vitesses de la dérive littorale sont calculées selon la formule (III-3) :

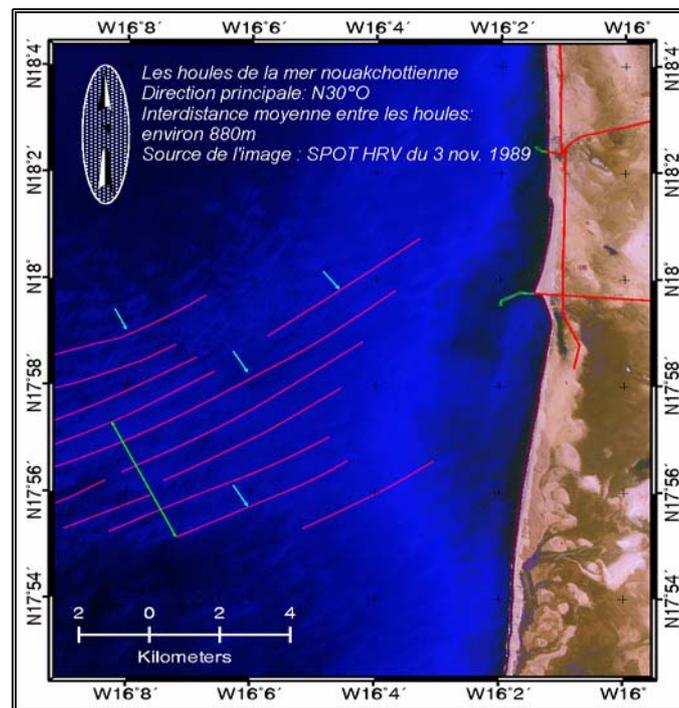


Figure III-6 : Propagation des vagues (30°O) dans l'image SPOT XS datée du 3 novembre 1989

$X = 0,0685$, $Y = 4,0960$, et $V = 0,52$ m/s pour la journée du 3 novembre 1989 ;

$X = 0,2428$ $Y = 1,9810$, et $V = 0,66$ m/s pour la journée du 4 février 1995.

Les résultats sont très proches des 0,5 m/s, rapportés par Lanjamet (1988).

Selon Dou *et al.*(1995) et Chang (1997), une telle vitesse peut mettre en mouvement des sables ayant une granulométrie de 0,01 à 4mm. Si les courants rencontrent des obstacles, par exemple des brise-lames, leurs apports peuvent être déchargés. Les vagues et leur dérive littorale ainsi que leurs déferlements modifient les rivages soit par érosion soit par accrétion.

Les marées et les courants de marée (flot et jusant), jouent aussi un rôle non-négligeable dans une telle modification des rivages. Du fait du marnage microtidal (hauteur moyenne de la haute mer inférieure à 2 m, Lanjamet, 1988 et tableau 3-1) et de la faible pente infralittorale de la côte nouakchottienne, l'énergie de marée peut facilement se dissiper à l'avant-côte. Les actions des marées seraient ainsi moins importantes que celles des vagues.

La construction du Port de l'Amitié a sensiblement modifié le sens local des vagues et des courants (figure III-7b et III-7c). C'est pourquoi l'accrétion à l'amont et l'érosion à l'aval du port se sont produites. Un épi a été construit pour protéger la plage contre la progression de l'érosion. Cependant, il a causé un retrait important de la terre en changeant la direction des vagues de NWW à NEE comme l'a fait le port (figure III-7b et III-7c).

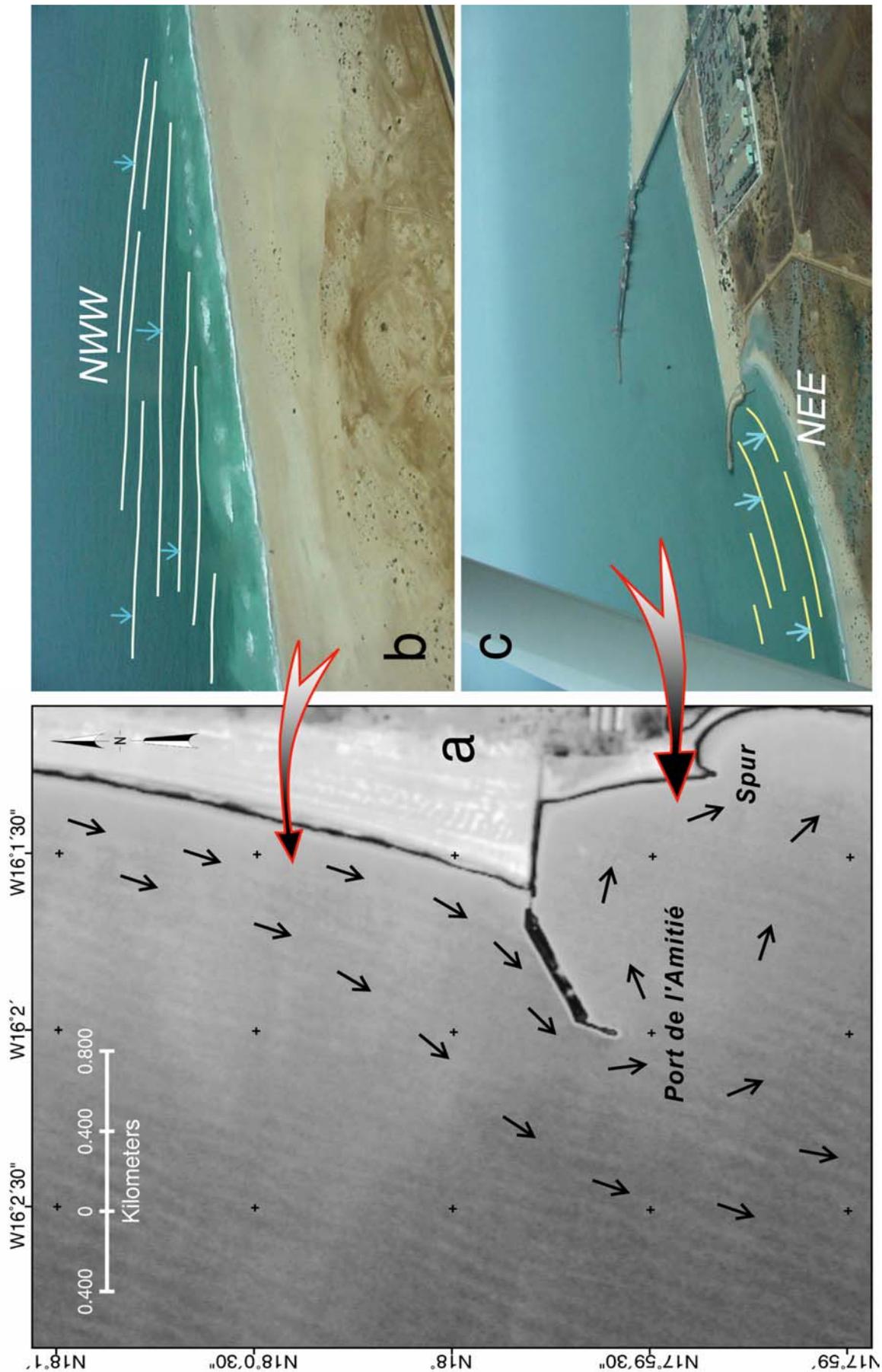


Figure III-7: Direction des vagues sur l'image SPOT (a) et les photos aériennes (b, c)

La direction de vagues observée sur l'image Pan (février 1995) est d'environ 60°O et celle en arrière de l'épi sur la photo (c) est orientée NEE. Les flèches sur l'image (a) représentent la direction du courant.

ANALYSE DE L'EROSION A L'AVANT

L'érosion côtière est contrôlée par les facteurs hydrodynamiques liés aux vagues et aux courants. En raison de la difficulté d'évaluation quantitative de ces paramètres, une analyse mathématique simple est donc appliquée, pour cerner l'évolution côtière potentielle, en supposant que l'érosion de plage est en progression géométrique.

A partir des traitements de télédétection, mentionnés ci-dessus, les distances et les taux d'érosion terrestre, le long des directions normales à la côte au cours des périodes 1989-1995 et 1995-2001, ont été mesurés pour chaque point d'observation (tableau 3-6, figure III-8). On trouve que les taux d'érosion annuelle de 1995-2001 sont globalement un peu moins que ceux de 1989-1995. L'abrasion semble à se ralentir. Dans un avenir proche, la vitesse d'érosion sera estimée si l'on peut déterminer la tendance de ralentissement. La conception de progression géométrique est introduite pour estimer les taux d'érosion future. Par exemple, $a : b = b : c$, on dit a , b et c sont une série de progression géométrique.

Comme indiqué dans le tableau 3-6, les totaux des taux d'érosion annuelle (Σ Taux annuel de 1989-1995 et Σ Taux de 1995-2001) sont calculés. Le ratio des taux de différentes périodes est donc :

$$\begin{aligned} \text{Ratio} &= \frac{\Sigma \text{ Taux d'érosion annuelle de 1989-1995}}{\Sigma \text{ Taux d'érosion annuelle de 1995-2001}} \\ &= \frac{720,54}{696,34} \\ &= 0,97 \end{aligned}$$

Comme supposé par la définition de progression géométrique, le ratio des taux de 2001-2010 et de 1995-2001 reste le même que celui de 1995-2001 et 1989-1995. Donc les taux d'érosion annuelle, le long des directions normales de la côte pour la période de 2001-2010, peuvent être estimés comme suit :

$$\text{Taux d'érosion annuelle potentielle de 2001-2011} = \text{Taux d'érosion annuelle 1995-2001} * 0,97$$

Les distances éventuelles d'érosion de la côte, pour la période 2001-2011, sont ainsi calculées et configurées dans le tableau 3-6 et la figure III-8.

Cette analyse indique qu'environ 0,91 km² de terre disparaîtront du fait de l'abrasion maritime pendant la période de 2001 à 2011. La régression maximale atteindra probablement 277 m (à l'échantillon N°9) et le littoral, derrière l'épi, présentera un retrait significatif vers le nord et le nord-est (points d'échantillonnage N° 1, 2, 3 et 4) en raison de la diffraction des vagues.

Tableau 3-6: Erosion de plage à l'aval du port

| Numéro d'observation | Distance du Port (km) | Erosion du 1989 à 1995 (m) | Taux d'érosion annuelle de 1989 à 1995 (m/a) | Erosion de 1995 à 2001(m) | Taux d'érosion annuelle de 1995 à 2001(m/a) | Taux d'érosion potentielle de 2001 à 2010 (m/a) | Distance potentiellement érodée de 2001 à 2011 (m) |
|----------------------|-----------------------|----------------------------|--|---------------------------|---|---|--|
| 0 | 0,75 | 22,74 | 4,33 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 1 | 0,78 | 97,65 | 18,60 | 45,31 | 7,55 | 7,33 | 73,25 |
| 2 | 0,83 | 134,10 | 25,54 | 66,99 | 11,17 | 10,83 | 108,30 |
| 3 | 0,88 | 161,66 | 30,79 | 75,13 | 12,52 | 12,15 | 121,46 |
| 4 | 0,94 | 184,86 | 35,21 | 83,36 | 13,89 | 13,48 | 134,77 |
| 5 | 1,00 | 194,99 | 37,14 | 92,41 | 15,40 | 14,94 | 149,40 |
| 6 | 1,15 | 206,36 | 39,31 | 118,03 | 19,67 | 19,08 | 190,82 |
| 7 | 1,36 | 216,85 | 41,30 | 136,62 | 22,77 | 22,09 | 220,87 |
| 8 | 1,58 | 199,23 | 37,95 | 162,45 | 27,08 | 26,26 | 262,63 |
| 9 | 1,80 | 186,34 | 35,49 | 171,66 | 28,61 | 27,75 | 277,52 |
| 10 | 2,08 | 182,81 | 34,82 | 157,72 | 26,29 | 25,50 | 254,98 |
| 11 | 2,30 | 173,88 | 33,12 | 158,09 | 26,35 | 25,56 | 255,58 |
| 12 | 2,55 | 165,80 | 31,58 | 148,86 | 24,81 | 24,07 | 240,66 |
| 13 | 2,72 | 147,55 | 28,10 | 149,27 | 24,88 | 24,13 | 241,32 |
| 14 | 2,86 | 135,14 | 25,74 | 146,22 | 24,37 | 23,64 | 236,39 |
| 15 | 3,00 | 128,87 | 24,55 | 135,96 | 22,66 | 21,98 | 219,80 |
| 16 | 3,18 | 116,24 | 22,14 | 140,79 | 23,47 | 22,76 | 227,61 |
| 17 | 3,38 | 105,06 | 20,01 | 131,34 | 21,89 | 21,23 | 212,33 |
| 18 | 3,51 | 103,78 | 19,77 | 128,50 | 21,42 | 20,77 | 207,74 |
| 19 | 3,72 | 86,00 | 16,38 | 129,30 | 21,55 | 20,90 | 209,04 |
| 20 | 3,96 | 71,49 | 13,62 | 120,00 | 20,00 | 19,40 | 194,00 |
| 21 | 4,03 | 59,89 | 11,41 | 117,98 | 19,66 | 19,07 | 190,73 |
| 22 | 4,19 | 53,59 | 10,21 | 111,26 | 18,54 | 17,99 | 179,87 |
| 23 | 4,26 | 50,14 | 9,55 | 105,43 | 17,57 | 17,04 | 170,45 |
| 24 | 4,33 | 42,30 | 8,06 | 107,92 | 17,99 | 17,45 | 174,47 |
| 25 | 4,45 | 36,67 | 6,98 | 101,75 | 16,96 | 16,45 | 164,50 |
| 26 | 4,59 | 36,92 | 7,03 | 92,92 | 15,49 | 15,02 | 150,22 |
| 27 | 4,72 | 32,12 | 6,12 | 89,61 | 14,94 | 14,49 | 144,87 |
| 28 | 4,82 | 31,71 | 6,04 | 82,83 | 13,81 | 13,39 | 133,91 |
| 29 | 4,90 | 29,13 | 5,55 | 83,05 | 13,84 | 13,43 | 134,26 |
| 30 | 5,01 | 25,82 | 4,92 | 82,76 | 13,79 | 13,38 | 133,80 |
| 31 | 5,13 | 23,88 | 4,55 | 78,48 | 13,08 | 12,69 | 126,88 |
| 32 | 5,23 | 25,20 | 4,80 | 73,99 | 12,33 | 11,96 | 119,62 |
| 33 | 5,33 | 27,88 | 5,31 | 72,62 | 12,10 | 11,74 | 117,40 |
| 34 | 5,43 | 30,78 | 5,86 | 68,45 | 11,41 | 11,07 | 110,66 |
| 35 | 5,55 | 29,43 | 5,61 | 65,00 | 10,83 | 10,51 | 105,08 |
| 36 | 5,66 | 32,11 | 6,12 | 60,92 | 10,15 | 9,85 | 98,49 |
| 37 | 5,74 | 36,64 | 6,98 | 58,40 | 9,73 | 9,44 | 94,41 |
| 38 | 5,85 | 34,59 | 6,59 | 53,97 | 9,00 | 8,73 | 87,25 |
| 39 | 5,92 | 34,94 | 6,66 | 46,63 | 7,77 | 7,54 | 75,39 |
| 40 | 6,02 | 30,69 | 5,85 | 44,16 | 7,36 | 7,14 | 71,39 |
| 41 | 6,09 | 29,05 | 5,53 | 41,57 | 6,93 | 6,72 | 67,20 |
| 42 | 6,18 | 27,96 | 5,33 | 40,33 | 6,72 | 6,52 | 65,20 |
| Total | | | 720,54 | | 696,34 | | |

ESPERANCE DE VIE DU PORT DE L'AMITIE

La durée de vie du port dépend principalement de la profondeur de son bassin. La dérive littorale déposera la majeure partie de ses sédiments dans le port en raison de la diffraction et de l'affaiblissement du courant quand l'accrétion sur la plage à l'amont parviendra à son point maximal. Cela mènera graduellement à une fin de service du port si une ingénierie de dragage n'est pas menée. Le point important à analyser est la méthode pour évaluer cette limite d'accrétion maximale.

L'extension de la plage du nord vers la mer et ses taux d'accrétion selon la direction normale au trait de côte ont été mesurés (tableau 3-7).

Tableau 3-7 : Données d'accrétion à l'amont du port

| N° échantillon nage | Distance du point échantillonné au port (km) | Accrétion (m) | | | Accrétion totale (m) | Taux d'accrétion de 1989 à 2001 (m/a) | Distance de la côte 2001 à celle de maximum engraissement (m) | Temps nécessaire (a) |
|---------------------------|--|---------------|--------|-------|-------------------------|---|--|----------------------------|
| | | 89-95 | 95-99 | 99-01 | | | | |
| 1 | 0,04 | 185,20 | 121,90 | 33,79 | 340,89 | 30,44 | 422 | 13,86 |
| 2 | 0,13 | 182,43 | 123,65 | 35,90 | 341,98 | 30,53 | 429 | 14,05 |
| 3 | 0,23 | 175,83 | 119,16 | 40,35 | 335,34 | 29,94 | 423 | 14,13 |
| 4 | 0,34 | 185,01 | 110,51 | 44,71 | 340,23 | 30,38 | 423 | 13,92 |
| 5 | 0,44 | 188,08 | 104,38 | 52,29 | 344,75 | 30,78 | 421 | 13,68 |
| 6 | 0,55 | 188,99 | 98,99 | 59,48 | 347,46 | 31,02 | 406 | 13,09 |
| 7 | 0,67 | 188,79 | 90,24 | 63,36 | 342,39 | 30,57 | 405 | 13,25 |
| 8 | 0,80 | 180,07 | 93,33 | 67,18 | 340,58 | 30,41 | 398 | 13,09 |
| 9 | 0,93 | 168,90 | 101,26 | 68,19 | 338,35 | 30,21 | 385 | 12,74 |
| 10 | 1,06 | 162,77 | 100,49 | 60,57 | 323,83 | 28,91 | 378 | 13,07 |
| 11 | 1,20 | 155,87 | 101,57 | 61,02 | 318,46 | 28,43 | 373 | 13,12 |
| 12 | 1,30 | 145,03 | 99,77 | 62,36 | 307,16 | 27,43 | 361 | 13,16 |
| 13 | 1,41 | 139,82 | 96,43 | 60,59 | 296,84 | 26,50 | 354 | 13,36 |
| 14 | 1,53 | 133,33 | 94,57 | 62,71 | 290,61 | 25,95 | 353 | 13,60 |
| 15 | 1,63 | 121,61 | 94,79 | 66,09 | 282,49 | 25,22 | 344 | 13,64 |
| 16 | 1,73 | 113,20 | 99,29 | 59,20 | 271,69 | 24,26 | 325 | 13,39 |
| 17 | 1,84 | 100,50 | 100,08 | 54,87 | 255,45 | 22,81 | 315 | 13,81 |
| 18 | 1,94 | 93,88 | 111,13 | 49,16 | 254,17 | 22,69 | 302 | 13,31 |
| 19 | 2,04 | 88,85 | 102,23 | 52,94 | 244,02 | 21,79 | 288 | 13,22 |
| 20 | 2,13 | 76,68 | 100,64 | 51,22 | 228,54 | 20,40 | 273 | 13,38 |
| 21 | 2,22 | 72,10 | 100,51 | 52,01 | 224,62 | 20,06 | 266 | 13,26 |
| 22 | 2,32 | 70,20 | 94,15 | 49,94 | 214,29 | 19,13 | 266 | 13,90 |
| 23 | 2,42 | 75,02 | 95,85 | 45,63 | 216,50 | 19,33 | 257 | 13,29 |
| 24 | 2,5 | 77,85 | 95,31 | 43,15 | 216,31 | 19,31 | 245 | 12,68 |
| 25 | 2,61 | 75,12 | 87,33 | 44,37 | 206,82 | 18,47 | 240 | 13,00 |
| 26 | 2,71 | 79,20 | 83,85 | 46,12 | 209,17 | 18,68 | 226 | 12,10 |
| 27 | 2,83 | 71,39 | 79,72 | 39,22 | 190,33 | 16,99 | 219 | 12,89 |
| 28 | 2,93 | 60,74 | 79,38 | 38,38 | 178,50 | 15,94 | 206 | 12,93 |
| 29 | 3,05 | 49,81 | 75,03 | 39,35 | 164,19 | 14,66 | 204 | 13,91 |
| 30 | 3,16 | 29,57 | 73,37 | 34,92 | 137,86 | 12,31 | 177 | 14,38 |

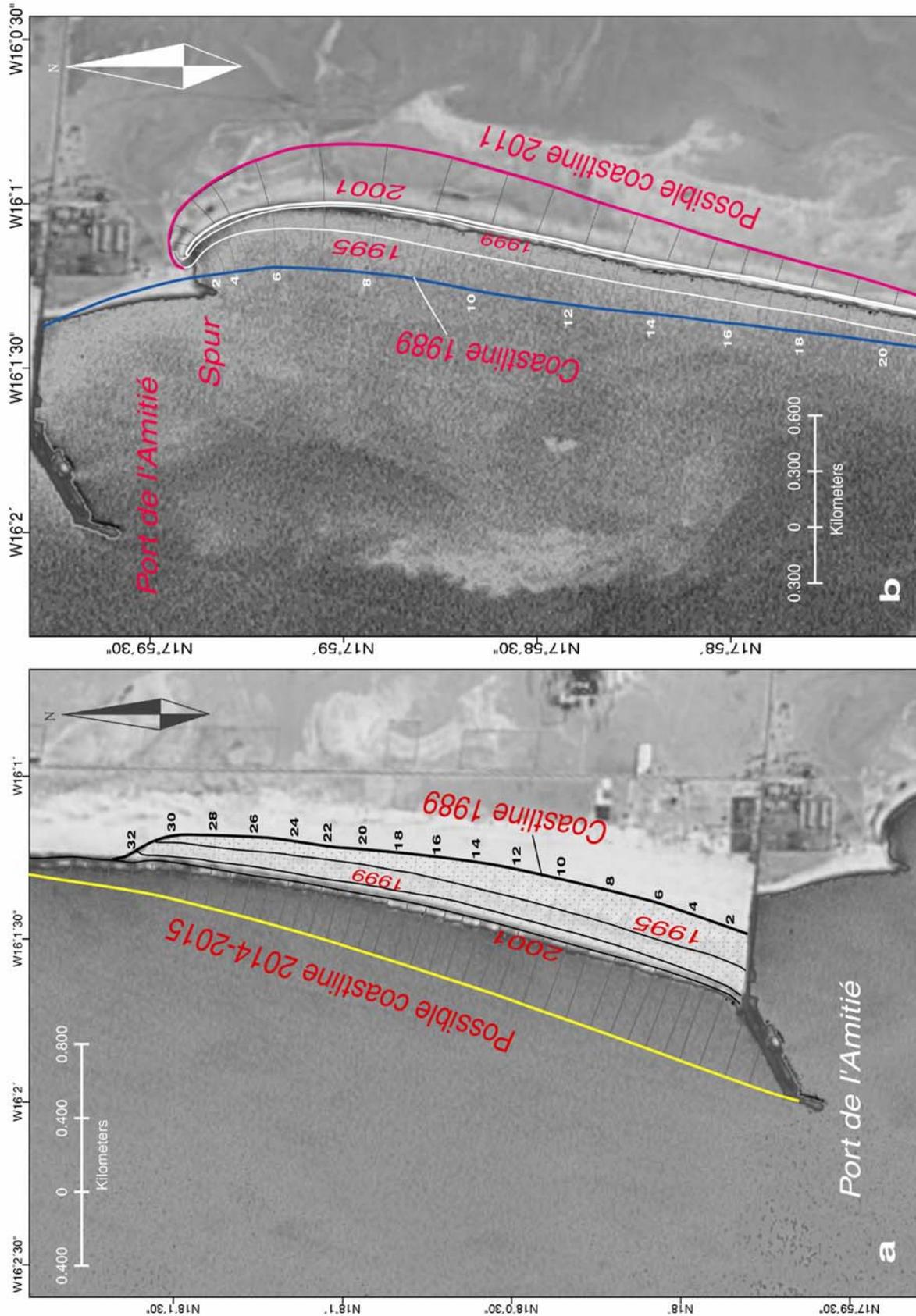


Figure III-8 . Position potentielle du trait de côte autour du Port de l'Amitié dans un avenir proche
 a : l'accrétion sur la plage au nord du port devrait arriver à sa limite maximale dans $13,4 \pm 0,5$ ans (2014-2015).
 b : la position du trait de côte estimée au sud du port en 2011.

D'après nos connaissances sur l'extension passée et les courants côtiers, une limite probable d'augmentation maximale est présentée dans la figure III-8a. Le temps prévu pour que l'extension atteigne cette limite est, en fait, celui pendant lequel le port pourrait rester en service, ou plutôt, l'espérance de vie du port. Cette durée a été calculée en employant les taux d'accrétion moyens antérieurs (tableau 3-7) ; elle est comprise entre 12,10 et 14,38 années avec une moyenne de 13,4 et un écart type de 0,5.

C'est-à-dire que la plage du Nord connaîtrait sa limite d'accumulation dans environ $13,4 \pm 0,5$ ans (2014-2015), avec $1,3 \text{ km}^2$ de nouvelle plage construite. Le port atteindrait alors la fin de son service. En effet, la dérive littorale se déchargerait alors, en grande partie, dans le bassin et, en l'absence de nouvelles mesures, le port serait abandonné.

4. EVALUATION DU SUIVI DE CHANGEMENT COTIER

Les données multi-temporelles de SPOT Pan et XS (1989, 1995, 1999 et 2001) ont été utilisées pour détecter les changements géomorphologiques du littoral par la méthode de la soustraction d'images, pour évaluer la durée de vie du port et prédire la tendance d'érosion, autour du Port de l'Amitié à Nouakchott. Les résultats acquis semblent cohérents et les approches et les techniques adaptées à ce type de recherche. Quelques points dignes d'intérêt sont exposés comme suit :

(1) Au cours de la détection des changements, trois facteurs peuvent produire des résultats inexacts :

Premièrement la rectification image par image dont l'erreur de RMS doit être déterminée par une petite valeur ($< 0,5$ pixel), lesquelles dans notre recherche sont de 0,21 à 0,33 pixel.

Le deuxième facteur concerne l'effet de marée dans les zones côtières. Comme cela a été démontré dans le tableau I, la différence significative de niveau de marée se distingue entre l'image de 1999 et celle de 1995. Donc l'erreur de soustraction pourrait s'y produire. Cependant, une différence de 0,61m en marnage provoquerait, sur la pente du cordon allant de 10° à 20° (Philippon, 1999), une erreur de $0,008-0,015 \text{ km}^2$ pour la plage nord et de $0,015-0,030 \text{ km}^2$ pour la plage sud. Cela est compris dans l'intervalle d'erreur tolérée (tableau 3-5).

Le troisième facteur est la zone du déferlement qui apparaît comme brillante sur les images Pan et XS et se confond facilement avec la plage. Il est donc nécessaire de l'exclure avant la mise en œuvre du processus de soustraction d'images.

De cette façon, les résultats de la détection de changement et de leur suivi sont convaincants et pertinents.

(2) L'analyse de chaîne de Markov a été également appliquée pour évaluer la tendance d'évolution du littoral dans notre étude. Cependant, il reste encore à améliorer, aux niveaux théoriques et pratiques, le modèle lui-même.

(3) Les courants côtiers et, en particulier, la dérive littorale, engendrés par les vagues du nord-ouest, prédominant du nord au sud, le long la côte, avec une vitesse de 0,52 – 0,66 m/s. Ils jouent un rôle primordial dans l'évolution de la morphologie du littoral à Nouakchott. De tels courants peuvent mettre en mouvement des sables d'une granulométrie de 0,01-4 mm et les déposer quand ils ralentissent ou changent de direction près d'un obstacle. C'est la raison de l'érosion et de l'accrétion littorales dans le site d'étude.

La compréhension des particularités des vagues et des courants dans le secteur du port est un impératif pour évaluer l'évolution du littoral.

IV. CONCLUSIONS

La télédétection et les techniques des GIS combinées avec des données démographiques sont appliquées à la surveillance du changement de l'environnement urbain et à l'analyse d'évolution côtière. Cette étude prouve que les résultats acquis semblent conformes à la réalité ; la méthodologie et les techniques paraissent adaptées et efficaces pour ce type de recherche. Les résultats obtenus ainsi que quelques propositions sont maintenant présentées :

(1) Comme une étoile à cinq branches se prolongeant à l'est, au sud, au nord et à l'ouest (Figure III-2), la ville a augmenté sa superficie de 36 km² avec un taux de croissance annuel de 5,3 % et un taux d'extension de 3,6 km²/a entre 1989 et 1999, correspondant à une croissance de la population de 380,000 habitants. La densité démographique était de 7,650 habitants/km² en 1989 alors qu'elle atteint le chiffre de 8,890 habitants/km² en 1999 (calculé à partir des tableaux 3-2 et 3-3). Une telle extension ne serait pas anormale pour une ville se développant dans une plaine fertile, mais elle est trop rapide et trop dense pour une ville prise en tenaille entre le désert et l'océan. ***C'est un fardeau lourd à porter pour une terre stérile déjà surexploitée.***

La croissance démographique est la dynamique principale conduisant à cette expansion urbaine rapide de Nouakchott.

(2) Trois degrés de risque d'inondation par la mer ont été identifiés. Le futur plan d'urbanisation devra éviter ces zones. Une véritable politique urbaine, maîtrisant les ressources en eau, le contrôle de

la population urbaine et le choix des secteurs susceptibles d'être urbanisés, est vivement recommandée pour améliorer notablement la situation actuelle et pour juguler l'expansion future de la ville.

(3) Du fait de la construction du Port de l'Amitié en 1987, la plage du nord s'est étendue de 0,92 km² avec un taux d'extension de 0,08 km²/a et connaîtra une autre augmentation de quelque 1,32 km² lorsque cette accrétion aura atteint sa limite dans 13,4 ± 0,5 années (2014-2015). A ce stade, les apports de la dérive littorale aboutiront principalement dans le bassin. En l'absence de mesures, le port arrivera alors en fin de service.

(4) La dune de sable au sud a été érodée de 1,34 km² avec un taux d'érosion de 0,12 km²/a. La construction de l'épi en 1991 n'a pas stoppé l'érosion de la plage mais accéléré le recul du trait de côte vers l'intérieur des terres en raison de la modification de l'orientation des vagues et des courants. Le retrait maximum mesuré de 1989 à 2001 est de 362m et son potentiel estimé à 277 m pour la période 2001-2011. Ainsi 0,91 km² de terre serait encore érodés par la mer lors des dix prochaines années.

(5) Les courants côtiers et, en particulier, la dérive littorale, engendrés par les vagues du nord-ouest, prédominent au nord au sud le long la côte avec une vitesse de 0,52 – 0,66 m/s. Ils jouent un rôle primordial dans l'évolution de la morphologie du littoral à Nouakchott. De tels courants peuvent mettre en mouvement des sables d'une granulométrie de 0,01-4 mm et les déposer quand ils ralentissent ou changent de direction lors d'un obstacle. C'est la raison de l'érosion et de l'accrétion littorales dans le site d'étude.

La compréhension des particularités des vagues et des courants dans le secteur du port est un impératif pour évaluer l'évolution du littoral.

Ces changements côtiers ont provoqué une modification sérieuse de l'environnement littoral et urbain à Nouakchott. Tout futur aménagement côtier devrait tirer une leçon de cet avertissement.

REMERCIEMENTS

L'auteur veut remercier Monsieur le professeur G. Béné pour sa suggestion quant à la composition de ces articles.