



## **Dynamique morpho-sédimentaire de la baie d'Agadir : Caractérisation sédimentologique et évolution des petits fonds**

Ismail Aouiche, Lahcen Daoudi, Abdelhadi Elmimouni, Fatim-Zahra Ihbach,  
Mouncef Sedrati, Brahim Ouahmane

### **► To cite this version:**

Ismail Aouiche, Lahcen Daoudi, Abdelhadi Elmimouni, Fatim-Zahra Ihbach, Mouncef Sedrati, et al.. Dynamique morpho-sédimentaire de la baie d'Agadir : Caractérisation sédimentologique et évolution des petits fonds. *Revue Marocaine de Géomorphologie*, 2017, 1, pp.31-46. <hal-03204686>

**HAL Id: hal-03204686**

**<https://hal.science/hal-03204686v1>**

Submitted on 22 Apr 2021

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization

## **Dynamique morpho-sédimentaire de la baie d'Agadir : Caractérisation sédimentologique et évolution des petits fonds**

Ismail AOUCHE <sup>1</sup>, Lahcen DAOUDI <sup>1</sup>, Abdelhadi ELMIMOUNI <sup>1</sup>, Fatim-zahra IHBACH<sup>1</sup>, Mouncef SEDRATI <sup>2</sup> et Brahim OUAHMANE <sup>3</sup>.

<sup>1</sup>Laboratoire de Géosciences et Environnement, Faculté des Sciences et Techniques, Université Cadi Ayyad - Marrakech, B.P.549, Marrakech, Morocco.

<sup>2</sup>Université de Bretagne Sud, Equipe GMGL-Domains Océaniques UMR 6538, Vannes, France

<sup>3</sup> Département de Géographie, Faculté des Lettres et des Sciences Humaines, Université Ibn Zohr, Agadir.

### **Résumé**

Le littoral d'Agadir est une zone particulièrement intéressante pour comprendre l'influence des processus naturels et anthropiques sur la dynamique sédimentaire. Cette étude présente une méthodologie basée sur trois approches complémentaires ; 1) une caractérisation minéralogique et granulométrique des sédiments 2) une analyse à long terme des levées bathymétriques des fonds marins des deux périodes (1972-1993 et 1993-2012) et 3) une simulation numérique de la houle et des courants. La caractérisation granulométrique et minéralogique de la plage sableuse d'Agadir a été effectuée en analysant l'évolution spatiale des caractéristiques du sable le long de la plage et au niveau de ses différentes unités géomorphologiques. Pour cela, une campagne d'échantillonnage a été réalisée en janvier 2014 le long de 19 profils perpendiculaires à la ligne de rivage. Les résultats relatifs aux indices granulométriques et leurs distributions en fonction des unités morphologiques ont montré qu'il s'agit, généralement, de sables de taille moyenne, bien classés et presque symétriques. Cependant une variabilité de la distribution spatiale des grains de sable met en évidence l'effet combiné des agents de forçage (vagues et courants), la nature des fonds de l'avant côte et les sources des sédiments. Par ailleurs, la superposition des levés bathymétriques a permis le calcul des volumes de sables (cubatures) correspondant aux surfaces en érosion ou en accrétion et du bilan sédimentaire. Les résultats permettent de distinguer un secteur Nord en accrétion et un secteur Sud en érosion. Le bilan sédimentaire global de la baie est fortement négatif, les pertes de sédiments se chiffrent à plus de 145,000 m<sup>3</sup> /an sur une surface de 8.5km<sup>2</sup> en allant de la profondeur 0 à -12 m/Zh. Les simulations de la houle du courant ont permis de comprendre l'origine des changements qui ont eu lieu au niveau du shoreface : L'accrétion au nord et l'aggravation de l'érosion au sud sont en grande partie expliquées par les interventions humaines surtout la mise en place de la jetée principale du port de commerce qui a bloqué la dérive littoral et a perturbé le spectre de la houle.

**Mots clés :** Littoral d'Agadir, Caractérisation sédimentologique, évolution des petits fonds, simulations numériques.

## Abstract

The Agadir coastline represents an interesting zone to understand the influence of natural and anthropogenic processes on sedimentary dynamics. This study presents a methodology based on three complementary approaches: 1) Mineralogical and granulometric characterization of sediments, 2) A long-term analysis of bathymetric data of the seabed of the two periods (1972-1993 et 1993-2012), 3) A numerical simulation of wave and current. The granulometric and mineralogical characterisation of the sandy beach of Agadir was performed by analysing the spatial evolution of the characteristics of the sand along the beach and at every geomorphologic unit. The results relative to granulometric indices have shown that it's about medium size sand, well sorted and almost symmetrical. However, variability in the spatial distribution of sand highlights the combined effect of forcing agents (wave and current), the nature of the seabed and sediment sources. Also, the bathymetric differencing allowed the calculation of sands volume corresponding to surfaces in erosion or accretion of sediment budget. The results allow distinguishing a northern sector in accretion and a southern sector in erosion. The total sediment budget of the bay is strongly negative; sediment losses amounted to more than 145000 m<sup>3</sup>/year over a surface of 8.5km<sup>2</sup> ranging from a depth of 0 to -12 m/Zh. The simulation of wave and currents allowed understanding the origin of the changes that took place at the shoreface: Accretion in the north and erosion in the south are largely explained by human intervention especially the implementation of the main jetty of the commercial harbour that has blocked the littoral drift and disrupted the energy spectrum of swell.

## Keywords

Coastal of Agadir, sedimentological characterization, evolution of shallow depths, numerical simulations.

## ملخص

يعتبر ساحل أكادير مجالا مثاليا لدراسة تأثير العوامل الطبيعية والبشرية على الدينامية الرسوبية. تركز منهجية دراستنا هذه على ثلاث مقاربات متكاملة: (1) تحديد الخصائص العيانية ونسيج المواد الرسوبية (2) تحليل طويل المدى لتغيرات قاع البحر على مدى الفترتين (1972-1993 و 1993-2012) (3) محاكاة العباب والتيارات البحرية. وللقيام بذلك تم القيام بدراسة رسابية تطورية على طول شاطئ أكادير مع الأخذ بعين الاعتبار مختلف وحداته الجيومورفولوجية، وذلك عن طريق أخذ مجموعة من العينات في يناير 2014 على طول 19 مقطع متعامد مع خط الساحل. وقد أظهرت المؤشرات الرسابية على مستوى مختلف الوحدات المورفولوجية أن العينات تتكون عموما من رمال متوسط الحجم وذات فرز جيد ومتماثلة. بيد أن التوزيع المكاني المتباين للحببات الرملية يبرز التأثير المشترك لمجموعة من العوامل المتمثلة في حركة العباب والتيارات البحرية وطبوغرافية قاع مقدمة الشاطئ (المنطقة المغمورة بالماء) ومصادر المواد الرسوبية. من جهة أخرى، مكنتنا عملية تراكم نتائج سبر الأعماق من قياس كميات الرمال سواء في المناطق الإزالة أو التسمين. كما سمحت النتائج المحصل عليها بالتمييز بين قطاعين: شمالي يعرف عملية تسمين مهمة، وآخر جنوبي في حالة تآكل. كما أن الموازنة الرسوبية الإجمالية للخليج أظهرت نتائج جد سلبية حيث فقدت المنطقة ما يقارب 145000 م<sup>3</sup> في السنة على مساحة 8,5 كلم<sup>2</sup> على عمق ما بين 0 و 12 متر. من جهة أخرى سمحت المحاكاة الرقمية للعباب و التيارات البحرية بفهم مصدر التطورات التي عرفها خليج أكادير: حيث يرتبط التراكم في الشمال والتآكل في الجنوب بدرجة كبيرة بالتدخلات البشرية وخاصة بعد إنشاء الرصيف الرئيسي للميناء التجاري الذي منع التيار الساحلي من نقل الرواسب في اتجاه الجنوب كما أثر في توزيع قوة الأمواج بالمنطقة.

## الكلمات المفتاحية

الشريط الساحلي لأكادير، دراسة مورفوسابية، سبر قاع الخليج، المحاكاة العددية.

## Introduction

À l'instar de nombreuses plages sableuses à l'échelle du monde, la côte atlantique du Maroc est le siège d'une érosion et d'un recul du trait de côte accélérés. De nombreuses études ont été entreprises sur les littoraux marocains. La baie d'Agadir, localisée au sud du Maroc, est parmi les moins étudiés. Des études de modélisation que nous avons entreprises très récemment, nous ont permis de comprendre le fonctionnement de cette baie (Aouiche et al., 2015a, Aouiche et al., 2015b, Aouiche et al., 2015c). Cependant, les caractéristiques morpho sédimentaires ainsi que les caractéristiques hydrodynamiques sont encore mal comprises.

Dans la perspective de prévoir l'évolution précise des zones côtières, il apparaît aujourd'hui primordial de mieux comprendre comment fonctionne le domaine pré-littoral et plus spécialement de mieux cerner quels sont les facteurs déterminants qui contrôlent ses variations et forcent l'intensité et la direction des échanges sédimentaires avec les systèmes adjacents.

La morphologie des plages est fortement liée aux sources des sédiments alimentant les plages, mais aussi à l'énergie mise en jeu dans leur transport et leur dépôt. Les études sédimentologiques (études granulométriques, minéralogiques...etc.), permettent de déterminer la relation entre les caractéristiques des sédiments (la taille, la nature...etc.) et leurs conditions de sédimentation. Les sources de sédiments alimentant les plages sont très diverses : la charge solide des cours d'eau, la dérive littorale, les apports du large, les dunes...etc. Le déplacement des sédiments le long des côtes est lié essentiellement à l'hydrodynamique marine (Paolo, 1993), mais également influencé par la granulométrie du sédiment source (Sahu 1964, Folk 1966, Nordstrom, 1977, Pino et Jaramillo 1992).

L'objectif de cet article est de déterminer d'une part les caractéristiques granulométriques et minéralogiques et d'autre part de préciser le rythme l'évolution morphologique des petits-fonds à l'aide de données bathymétriques couvrant les périodes 1972-1993 et 1993-2012. Pour analyser les principaux facteurs contrôlant cette évolution, on a réalisé une approche fine de la dynamique sédimentaire à partir des modèles numériques simulant la houle et les courants.

### 1. Présentation de la zone d'étude

Situé sur la côte atlantique du Maroc à 35 km au sud du Cap Ghir, le littoral d'Agadir est implanté au fond d'une baie protégée au nord par le Cap Ghir et largement ouverte vers le sud-ouest (Fig. 1). La baie d'Agadir située à 30°25' N de latitude et 9°38' W de longitude, forme une zone de transition entre une côte rocheuse au nord et une longue côte sableuse, rectiligne et basse au sud.

Le littoral d'Agadir a connu de grands bouleversements à partir du début du 20ème siècle. Depuis l'antiquité ce littoral est le siège d'une dynamique hydrosédimentaire très active ; cette dynamique s'est fortement perturbée par les différents aménagements portuaires et touristiques mis en place au niveau de la zone. Aujourd'hui il s'agit d'une zone soumise à un régime hydrodynamique très complexe ; les ouvrages présents (Ports, brises lames, épis) ainsi que l'agressivité de la houle ont bouleversé l'évolution de ce domaine côtier.

La baie d'Agadir appartient à la région Souss Massa qui se situe au centre géographique du Maroc et qui couvre une superficie de l'ordre de 53789 km<sup>2</sup> soit 7,57% du territoire national.

Le climat de la plaine de Souss est aride à semi-aride ; il varie du type humide, à hiver froid sur les sommets du Haut-Atlas Occidental, à hiver frais en plaine. La proximité de l'Océan et l'influence du courant froid des Canaries atténuent le climat de la zone, et la barrière montagneuse de l'Anti-Atlas contribue à la protection contre les vents du sud (Aouiche et al., 2015a). Sur le bassin versant d'Agadir, quatre rivières débouchent dans la baie d'Agadir : Oued Souss, Oued Lahouar, Oued Tanaout et Oued Tildi. Parmi ces rivières, Oued Souss est le seul dont le débit est élevé ; il constitue la quasi-totalité des apports d'eau par voie fluviale dans la baie d'Agadir (500 millions de m<sup>3</sup> voire même 1 milliard de m<sup>3</sup> au cours d'années exceptionnellement pluvieuses). Il se jette dans l'océan à 6 km au sud du port. Son débit moyen est de 16,3 m<sup>3</sup>/s (Laboratoire Central d'Hydraulique de France-LCHF, 1972).

La houle le long des côtes marocaines est la conséquence de dépressions barométriques lointaines et sans relation avec les vents locaux. L'organisme public ports de l'état de l'Espagne nous a fourni des données statistiques des paramètres des houles (Hauteur significative, direction, période) en fonction de leurs fréquences. Les champs d'ondes ont été générés avec le modèle d'onde spectrale WAM qui est un code de calcul numérique basé sur les champs de vents. La comparaison des mesures du point SIMAR 44 a permis de mettre en évidence que les houles de directions W, WNW, NW, et NNW sont très largement dominantes en fréquence et en intensité (Aouiche, 2015).

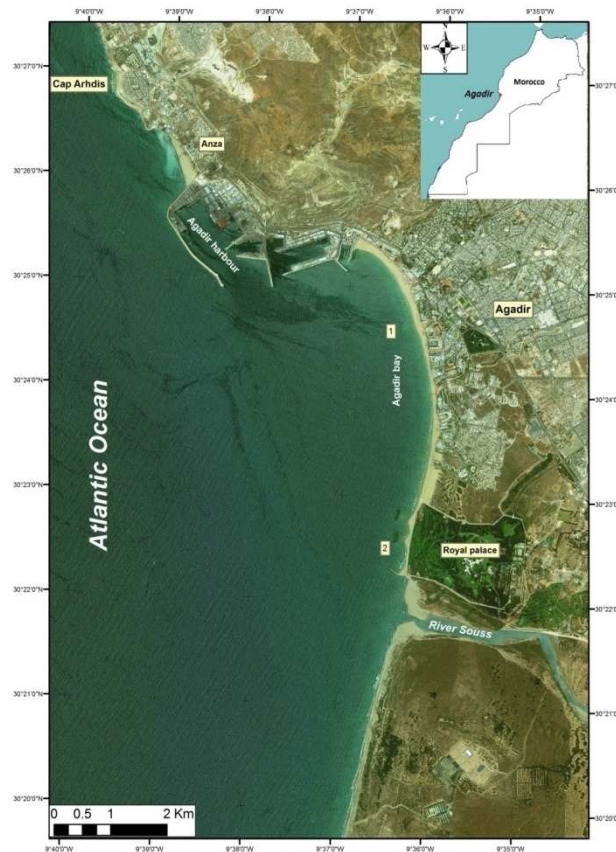


Figure 1 : Situation géographique de la baie d'Agadir (Google earth, 2012)



## 2. Méthodologie

### 2.1. Caractérisation sédimentologique

L'échantillonnage a été conduit, le long de 19 profils perpendiculaires à la ligne de rivage (3 profils dans la plage d'Anza et 14 dans la baie d'Agadir et 2 profils au niveau de l'embouchure de l'oued Souss) (Figure 2). Pour chaque profil, quatre prélèvements ont été effectués respectivement au niveau des quatre unités géomorphologiques de la plage, depuis la plage sous marine jusqu'à l'arrière plage (bas estran, mi-estran, haut estran et arrière plage), soit au total 68 échantillons superficiels. Chaque échantillon sableux a été prélevé sur une surface de 200 cm<sup>2</sup> (rectangle de 20 cm x 10 cm) et sur une épaisseur d'environ 5 mm couvrant ainsi toute la couche active (Chauhan 1992, Abuodha 2003).

L'étude sédimentologique comporte des analyses granulométriques et des analyses minéralogiques des sables : i) Une analyse granulométrique à l'aide d'un granulomètre laser, les paramètres habituels analysés sont la taille moyenne ( $\mu m$ ), le coefficient de classement ou de triage ( $\sigma$ ) et le coefficient d'asymétrie ( $Sk$ ) (Short 1992, Anthony et al. 2006, Tamura et al. 2010). ii) Une analyse calcimétrique par le calcimètre de Bernard. Le principe de cette technique est donné par Vatan (1967), selon lequel, tout matériau contenant du carbonate de calcium ( $CaCO_3$ ) fait effervescence au contact d'un acide.



Figure 2 : Localisation des profils d'échantillonnage (Rd : Rive gauche et Rd : Rive droite)

### 2.2. Evolution des petits fonds

Pour disposer d'une information sur les variations bathymétriques de la baie d'Agadir, nous avons recherché et exploité plusieurs modèles numériques de profondeur, couvrant l'ensemble du secteur d'étude sur une échelle de temps relativement importante. Les modèles numériques de profondeur (MNP) sont particulièrement appréciés par les scientifiques, notamment pour leur aptitude à permettre le calcul du taux d'engraissement et de démaigrissement, et à fournir divers indices, tels que l'inclinaison et l'orientation des pentes, ainsi que la possibilité de

visualiser des structures en trois dimensions (Hüttemeyer, 2000) ; pour cela, nous avons procédé à une compilation de relevés bathymétriques qui ont été effectués par le Centre Expérimental de l'Hydraulique du Laboratoire Public d'essais et d'études-Casablanca, Maroc, SOGREAH, et la direction des ports et du domaine public et maritime-Rabat, Maroc-pendant la période 1972 et 2012 (Tableau 1).

Date	Extension géographique	Profondeurs	Source
1972	Couvre l'ensemble du littoral entre l'ancien port jusqu'au palais royal	De 0 à -20m	Levée LPEE et SOGREAH
1993	Couvre l'ensemble du littoral entre l'ancien port jusqu'à l'oued Souss	De 0 à -25m	Levée LPEE
2012	Couvre l'ensemble du littoral entre l'ancien port jusqu'au palais royal	De 0 à -12 m	Levée DPDPM

Tableau 1: Données utilisées pour l'analyse bathymétrique

L'analyse de l'évolution des fonds marins a été réalisée à partir des minutes bathymétriques, ainsi comme l'ont montré plusieurs auteurs ; l'utilisation des minutes de bathymétrie, dans l'étude de l'évolution des fonds marins, permet de limiter les marges d'erreurs par rapport aux cartes bathymétriques (Aernouts et Héquette , 2006). La couverture spatiale des différents levés bathymétriques utilisés est cependant variable d'une année à l'autre. Les levés bathymétriques de 1972 comprennent 1000 points de sonde qui couvrent une superficie de 13.5 km<sup>2</sup>, ce qui représente un point de mesure tous les quarante mètres en moyenne le long des radiales de navigation. La couverture bathymétrique de 1993 est constituée de 1400 points de sonde couvrant une superficie de 14 km<sup>2</sup> (un point de sonde tous les 36 m). La couverture bathymétrique 2012 comprend 21000 points de sonde sur une surface de 8.5 km<sup>2</sup>, livrant la plus forte densité de points de mesure (un point de sonde tous les 6 m).

### 2.3. Simulation numérique

La propagation des ondes depuis le large vers la côte a été simulée en utilisant le logiciel MIKE 21 SW. Ce modèle vise les études d'approche de la houle sur des domaines assez vastes, basés sur le concept de quantité de mouvement. L'équation régissant dans Mike 21 est l'équilibre de l'action des vagues formulée soit par des coordonnées cartésiennes ou sphériques (1). En coordonnées cartésiennes horizontales l'équation s'écrit :

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla \cdot (VN) = \frac{S}{\sigma} \quad (1)$$

Où N ((x, y), σ, θ, t) est la densité d'action, t est le temps, (x, y) le temps cartésien, v (Cx, Cy, Cσ, Cθ) est le groupe de la phase des houles en quatre dimensions. S est le terme source de l'équilibre énergétique. ∇ est l'opérateur différentiel en quatre dimensions dans le plan d'espace (x, y), σ, θ.

La simulation par Mike 21 flow model a permis de quantifier les vitesses du courant correspondant aux conditions des houles testées à partir des tenseurs de radiations, nés lors du déferlement. Le courant dû à la houle (V) est généralement parallèle à la côte. Il varie proportionnellement à la racine carrée de la hauteur des vagues (Hb) (Soulsby, 1997) (2).

$$V = 1,17 (g \cdot H_b) 0,5 \cdot \sin(\alpha) \cdot \cos(\alpha) \quad (2)$$

où  $\alpha$  est l'angle d'incidence de la houle lors du déferlement et  $g$  est l'accélération de la pesanteur. Les mécanismes sous-jacents de la génération de ces courants sont les gradients de dynamique de reflux (tenseur de radiation en relation avec l'obliquité des houles incidentes (Longuet Higgins and Stewart, 1964).

### 3. Résultats et discussions

#### 3.1 Analyse sédimentologique

##### - Indices granulométriques

Les résultats obtenus pour les différents indices granulométriques sont présentés sous forme de cartes réalisées avec le logiciel Arcgis 10 par interpolation des valeurs des échantillons pour les différents profils. La carte de la figure 3a,b représente la répartition de la taille moyenne des grains au niveau de la baie d'Agadir et la plage d'Anza. Au niveau de la baie d'Agadir les valeurs du grain moyen se situent entre 230 $\mu$ m et 323 $\mu$ m, ce qui indique des sables fins à moyens. La carte montre une évolution transversale caractérisée par la diminution de la taille moyenne des grains en allant du bas estran vers le haut de plage, à l'exception de la partie extrême nord de la baie adossée à la digue où on constate une tendance évolutive inverse. Concernant la distribution longitudinale, le bas d'estran de la partie sud de la baie présente des sables avec des tailles relativement plus grossières par rapport au secteur nord. Au niveau de la plage d'Anza, l'évolution transversale et longitudinale du grain moyen est identique à celle de la baie d'Agadir. En allant du nord vers le sud la taille augmente, alors que du bas de l'estran vers l'arrière plage la taille moyenne diminue (Fig . 3a,b).

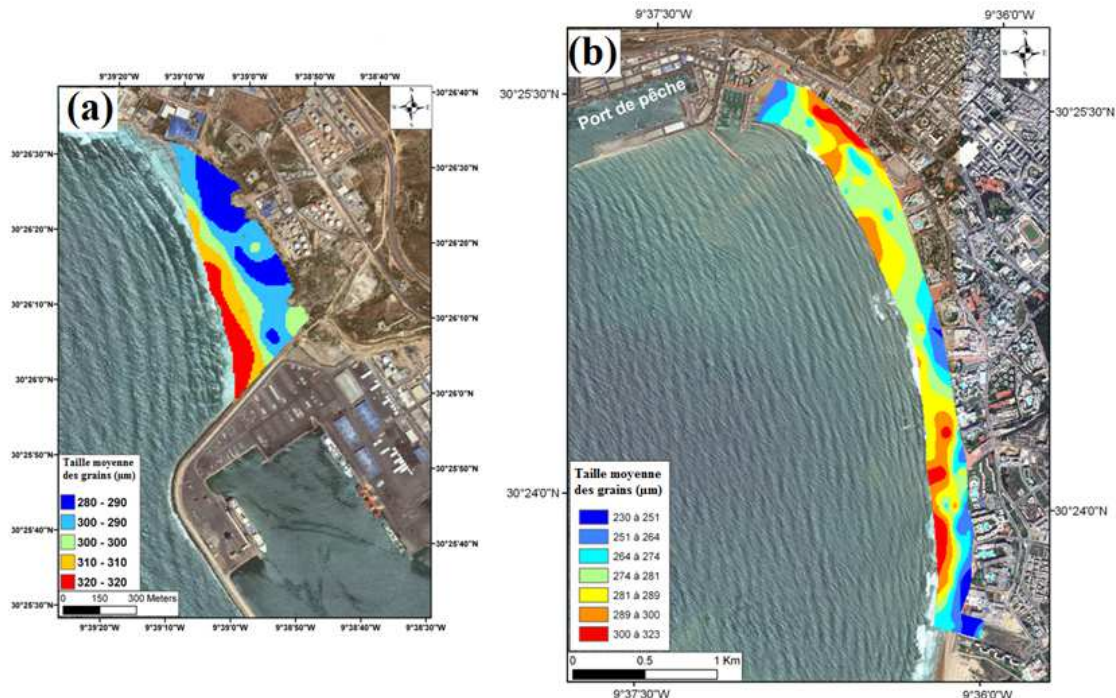


Fig . 3: Distribution de la taille moyenne des grains au niveau de la plage d'Anza (a), et au niveau de la baie d'Agadir (b).



La carte de la figure 4a, b montre que pour la majorité des échantillons analysés dans la baie d'Agadir et la plage d'Anza les valeurs du classement (Sorting index) varient entre 0.4 Ø et 0.5 Ø permettant de qualifier ces sables de bien classés.

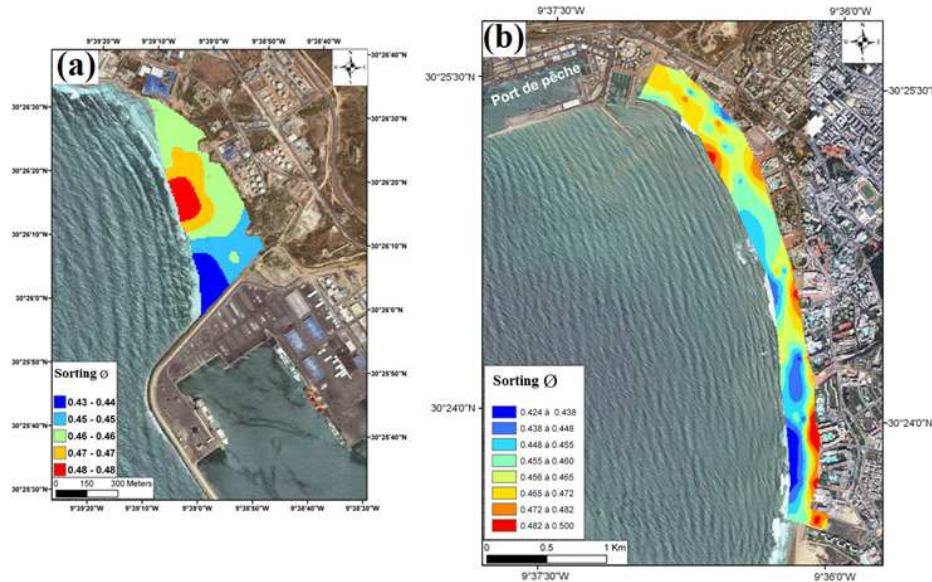


Fig . 4: Evolution du coefficient de classement- Sorting index- au niveau de la plage d'Anza (a) et au niveau de la baie d'Agadir (b)

La carte de la figure 5a, b représente la distribution du coefficient d'asymétrie (skewness) dans la baie d'Agadir et la plage d'Anza, les valeurs varient entre -0,104 à -0,031 Ø. Ils sont donc comprises entre -1Ø et +1Ø, ceci indique que la distribution est presque symétrique.

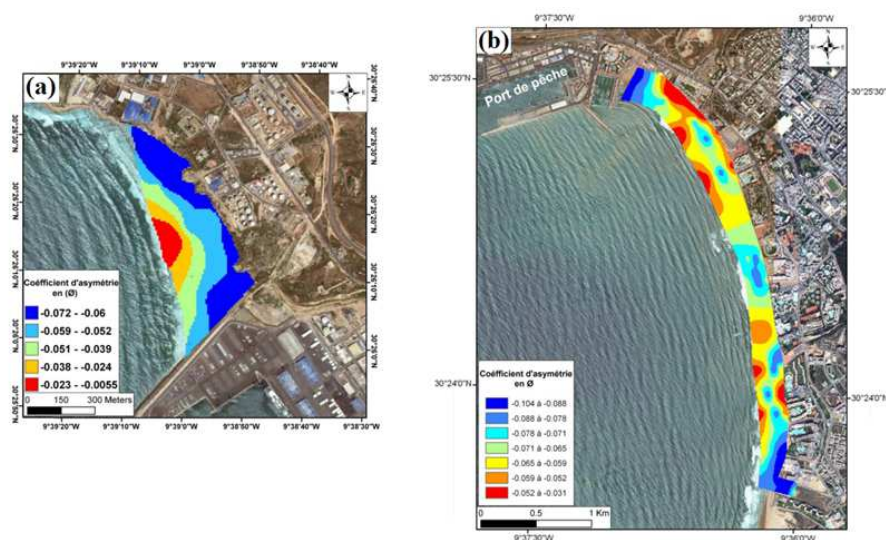


Fig . 5 : Evolution du coefficient d'asymétrie - skewness- au niveau de la plage d'Anza (a) et au niveau de la baie d'Agadir (b)

L'analyse granulométrique des sables de la baie d'Agadir a permis de mettre en évidence la distribution et la cartographie des différents indices granulométriques et de comprendre les différents agents de dépôt. Les différentes cartes granulométriques présentées montrent que tous les paramètres analysés présentent une évolution transversale et longitudinale identiques. La partie Nord de la baie est caractérisée par des valeurs faibles des grains moyens et des valeurs élevées des deux coefficients d'assymétrie et du triage. Ceci indique un milieu de faible énergie justifiée par la présence de la jetée du port (Aouiche, 2015). En effet, la houle incidente qui arrive directement du large est atténuée par la jetée du port créant une zone d'ombre en arrière de la jetée. Cependant, dans la partie Sud de la baie la taille du grain moyen est plus importante, alors que les deux autres coefficients présentent des valeurs faibles. Ceci montre que la zone est très agitée vu qu'elle est directement ouverte aux actions de la houle incidente (Aouiche, 2015).

### - Calcimétrie

Pour les 68 échantillons analysés le pourcentage de  $\text{CaCO}_3$  varie entre 31 % et 62 %. La figure 6 représente l'évolution transversale du pourcentage de  $\text{CaCO}_3$ . Il est presque identique pour tous les profils représentatifs de la baie d'Agadir et la plage d'Anza. En allant du bas estran vers le haut de plage le pourcentage de  $\text{CaCO}_3$  augmente avec une stabilité de la teneur en calcite entre le bas et le mi estran (Fig . 6). Les deux profils représentatifs de l'oued Souss (Rive gauche et Rive droite) sont les seuls qui présentent une variation transversale inverse avec des pourcentages de calcite généralement faibles (< 20%).

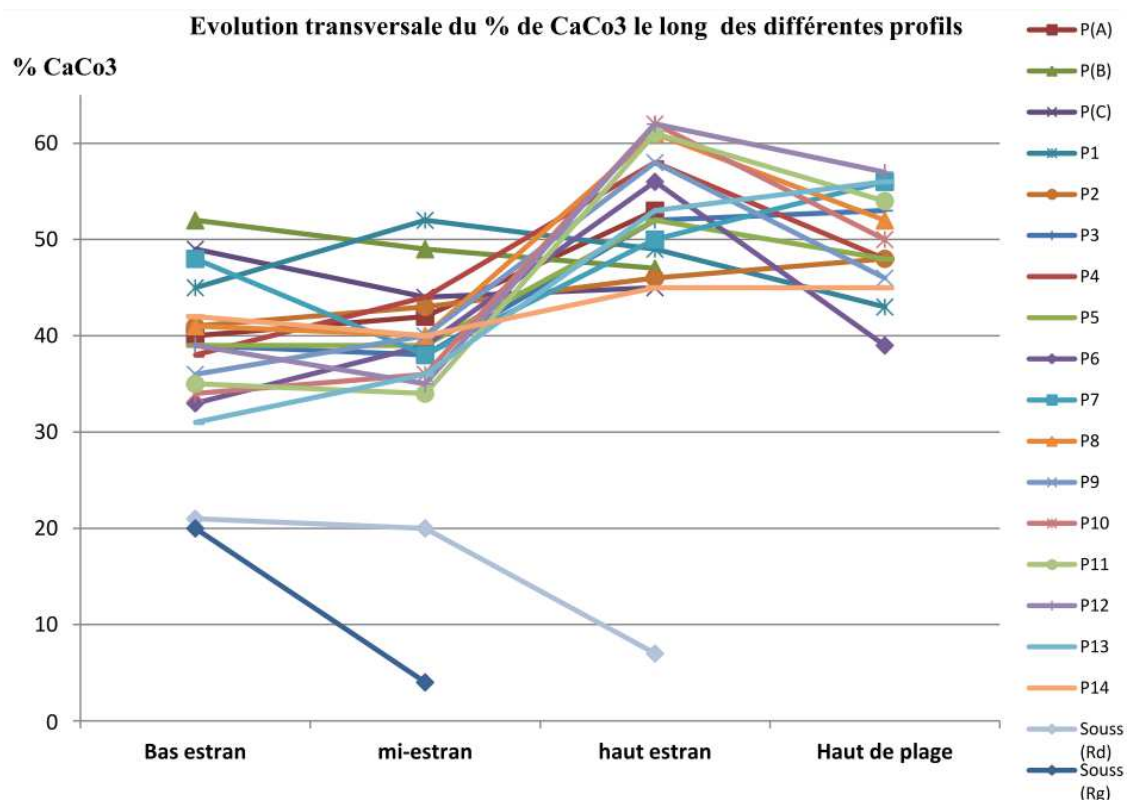


Fig . 6 : Evolution transversale du % de  $\text{CaCO}_3$  le long des différents profils (RD : rive droite ; RG :Rive gauche)

Les figures (7a/b) présentent la variation du pourcentage de la calcite dans la baie d'Agadir et dans la plage d'Anza. Elles dénotent clairement la variation transversale mise en évidence dans la figure (6). Cette évolution traduit un enrichissement des sables en fragments de coquilles, en allant du bas estran vers le haut de plage. En ce qui concerne la variation longitudinale, le pourcentage de la calcite augmente généralement en allant du nord vers le sud de la baie d'Agadir. La même tendance est observée dans la plage d'Anza.

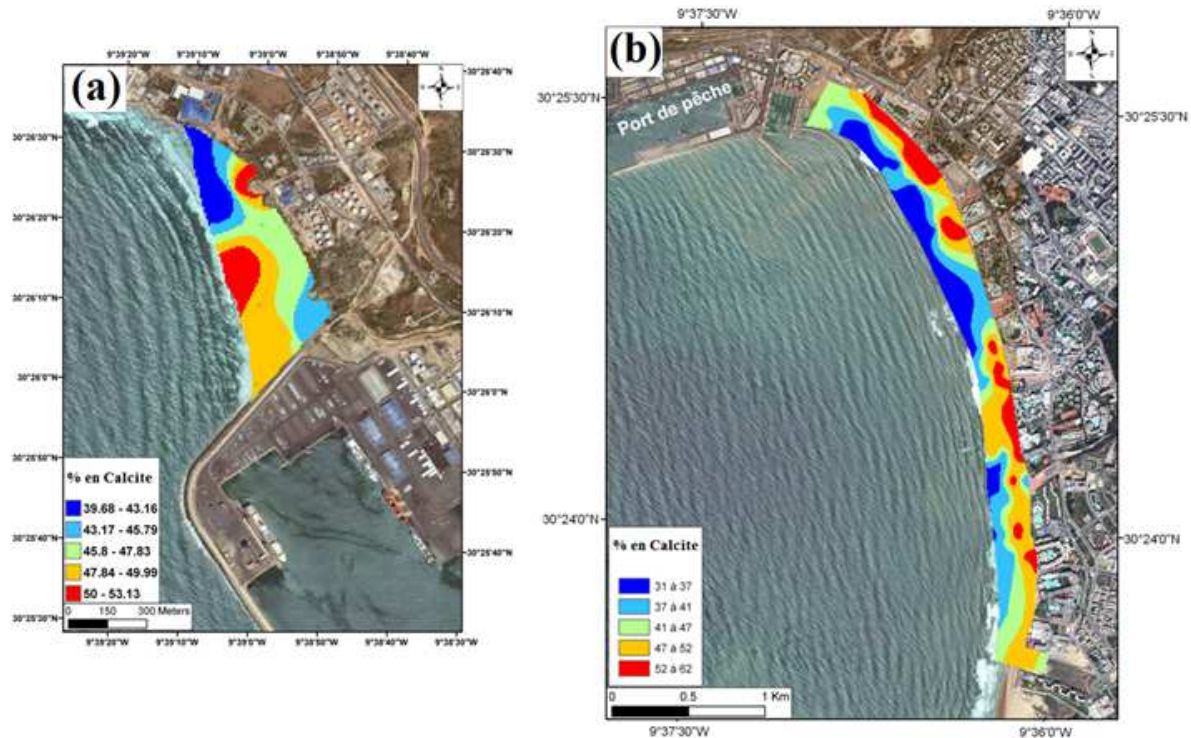


Fig . 7: Evolution du pourcentage de calcite au niveau de la plage d'Anza (a) et au niveau de la baie d'Agadir(b)

La répartition des teneurs en calcite (fragments de coquilles) dans les différents échantillons de sables montre une évolution transversale similaire à celle de l'étude granulométrique. L'évolution longitudinale de la teneur en fragments de coquilles indique que ce dernier est de plus en plus important quand la zone est ouverte aux fluctuations des agents hydrodynamiques, ce qui permet d'enrichir les sables de cette partie en débris de coquilles provenant de la dérive ou du large. Par contre au niveau des zones calmes et abritées, la teneur est faible ce qui indique que les échanges avec le large sont limités.

### 3.2 Evolution des petits fonds

#### - Entre 1972 et 1993

Les cartes différentielles montrent de nombreuses zones d'abaissement et d'exhaussement plus ou moins important des petits-fonds (Figure 8). Nous avons calculé, pour chaque campagne, le volume de sédiments présents dans la zone commune à ces deux campagnes. Ce volume a été calculé avec une base commune fixée à -17m/Zh. Pour la campagne de 1972 nous avons un volume de 126.96 millions de m<sup>3</sup> de sédiments, et pour 1993 nous avons 121.87 millions de m<sup>3</sup>, soit une perte de 5.091 millions de m<sup>3</sup>



équivalant à 4 % du volume recensé en 1972. Nous présenterons, tout d'abord, les zones d'exhaussement, puis nous ferons de même pour les zones d'abaissement.

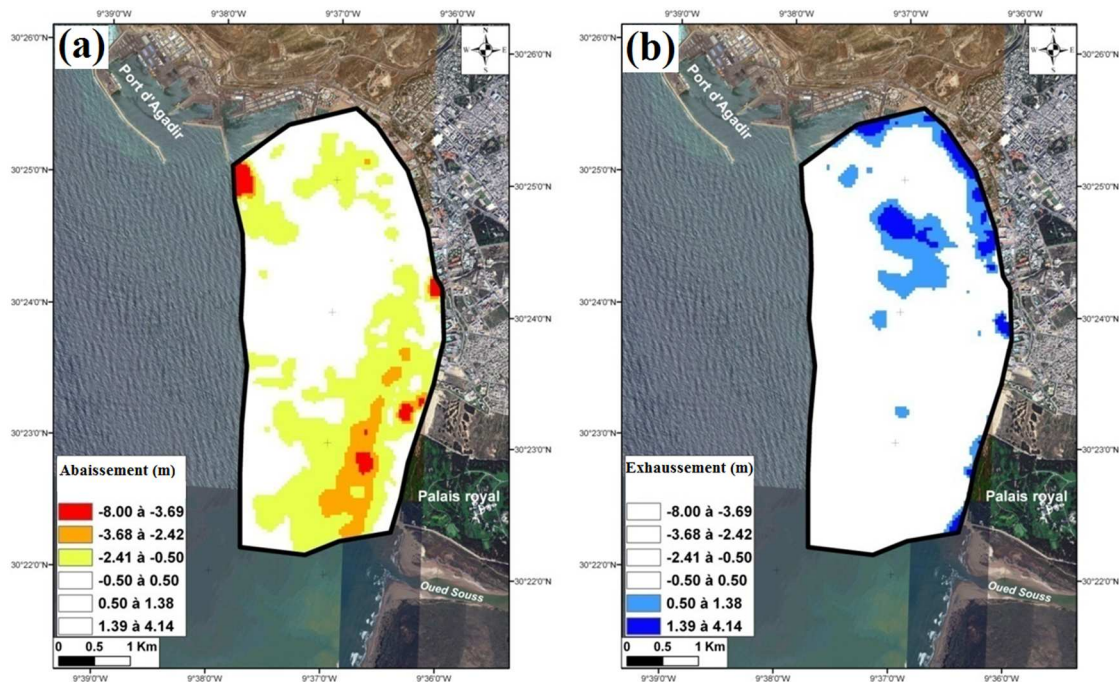


Figure 8 : Carte des zones d'abaissements (a), Carte des zones d'exhaussements (b)

La première zone en abaissement se situe au devant de l'ancien port de pêche à une distance comprise entre 1500 et 2000 m du trait de côte (Figure 8a). Cet abaissement varie de 0,5 à 8 m et correspond à l'ensemble des opérations de dragages réalisées à l'entrée du port de pêche afin maintenir la passe à une profondeur d'environ -7.5 m. La deuxième zone en abaissement est située au sud de la baie d'Agadir, variant de 0 à 4m : Cet abaissement est parallèle à la côte, avec une orientation nord/sud (Figure 8a).

Pour les exhaussement des fonds, nous observons que les zones d'évolution sont en général concentré au Nord de la baie, près et parallèles au trait de côte, mais plus restreints que les zones d'abaissements. La première zone d'exhaussement est située au sud-est de la première zone d'abaissement et qui varie de 0 à 3 : Cette zone d'exhaussement peut s'expliquer en grande partie par les rejets de dragage effectué devant l'entrée du port de pêche (Figure 8b). La deuxième zone en exhaussement est située au nord de la baie près et parallèle à la côte avec une surélévation moyenne de l'ordre de 2 m (Figure 8b).

#### - Entre 1993 et 2012

Tout comme pour la période 1993-2012, nous présenterons toutes les évolutions de la même façon. Le calcul du volume de sédiments présents dans la zone commune aux campagnes bathymétriques de 1993 et 2012 nous permet d'obtenir plus d'informations sur la variation générale de la morphologie des petits-fonds au cours de cette période (Figure 9). Ce volume a été calculé avec une base commune fixée à -12m/Zh. Pour la campagne de 1993 nous avons un volume de 62.005 millions de m<sup>3</sup> de sédiments et pour 2012, nous avons 68.562 millions de m<sup>3</sup>, soit une perte de 6.55 millions de m<sup>3</sup> équivalant à 10.5 % du volume recensé en 1993. Nous présenterons, comme pour la période 1993-2012, les zones d'exhaussement

d'ouest en est et du large vers la plage, puis nous ferons de même pour les zones d'abaissement.

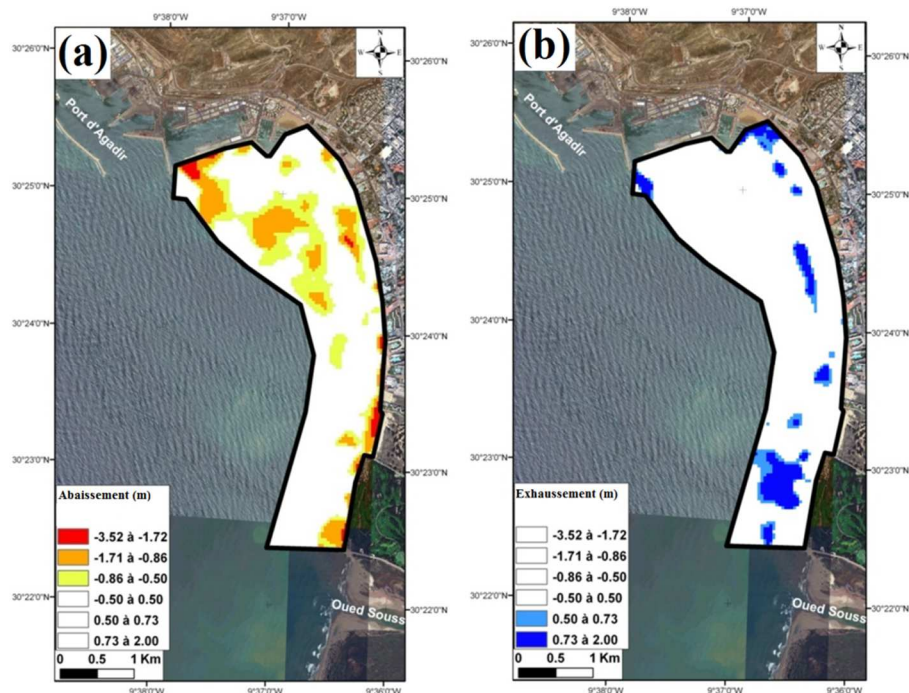


Figure 9 : Carte des zones d'abaissements (a), Carte des zones d'exhaussement (b)

Concernant les zones d'abaissement au cours de cette période, deux zones ont pu être délimitées, une première au nord plus au large et une seconde au sud près de la côte. La première zone est située à une distance de 600 et 1500 m du trait de côte avec un abaissement des fonds de 1.5 m environ. Le second abaissement dans la partie sud du site est observé entre 0 et 300 m du trait de côte, avec un abaissement supérieur à 3 m (Figure 9a).

Le premier exhaussement est situé à l'extrême nord de la baie à une distance de 0 à 500 m du trait de côte qui varie de 0 à 1 m. Le deuxième exhaussement, le moins important en terme de surface, se situe au centre de la baie, avec une accumulation qui ne dépasse pas 2 m. La troisième zone en exhaussement est située au sud de la baie à une distance de 300 à 1000 du trait de côte, avec une surélévation moyenne de l'ordre de 2 m (Figure 9b).

#### 4 Simulation numérique

Les simulations de la houle montrent que la jetée du port commercial implanté en 1989 avait conduit à une diminution significative de l'énergie des vagues, expliquée par la diffraction des houles provenant du nord-ouest. Cette diminution de l'énergie est très remarquable dans la partie nord de la baie. Alors que le sud de la baie est exposé à des niveaux plus élevés de l'énergie de la houle incidente (Figure 10). Les résultats obtenus de la simulation quasi stationnaire des courants montre que la combinaison des trois courants ; courant de retour, courant de dérive et courant sagittal, contrôlent une grande partie du transport sédimentaire du secteur sud de la baie: i) Le courant de retour (Undertow current) induit un intense transport sédimentaire vers le large en particulier pendant les épisodes de forte énergie, provoquant un mouvement important des sables du haut vers le bas de la zone intertidale (Fig. 11). ii) L'incidence de la houle oblique, énergétiquement forte, induit un courant de dérive important



(longshore current) qui contribue au transit sédimentaire en déplaçant des volumes importants de sédiments du nord vers le sud (Fig . 11). iii) Alors qu'en amont de système de défense implanté au sud le courant sagittal (rip current) transporte une grande quantité de sédiments au large (Fig . 11).

La situation au nord est complètement à l'inverse : Le nord de la baie présente un secteur protégé de la houle incidente, caractérisé par des faibles courants de retour et un courant de dérive orienté sud-nord (Fig . 11) et qui perd sa capacité de transport tout en se déplaçant vers le nord. La diminution de l'intensité de ce courant favorise le dépôt des sédiments, ainsi l'asymétrie des vagues lors des conditions peu énergétiques induit un transport net vers le rivage.

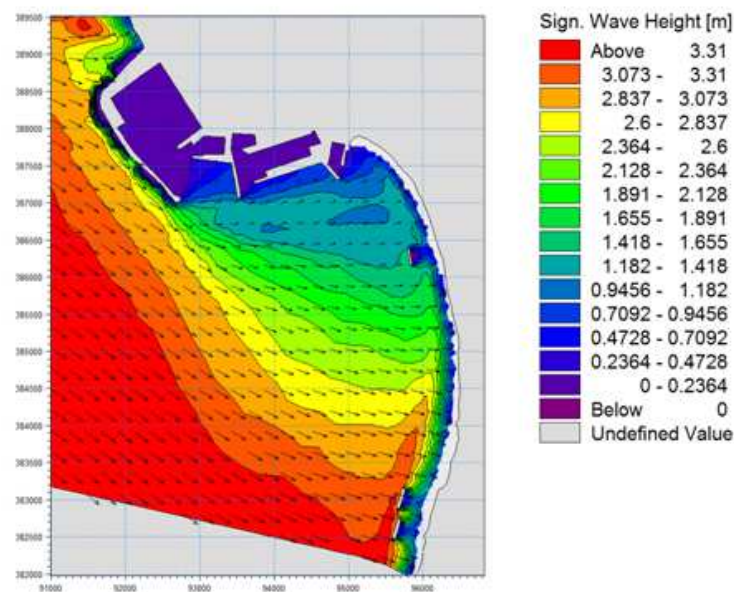


Figure 10 : Simulation de la propagation de la houle (Caractéristique des houles les plus fréquentes)

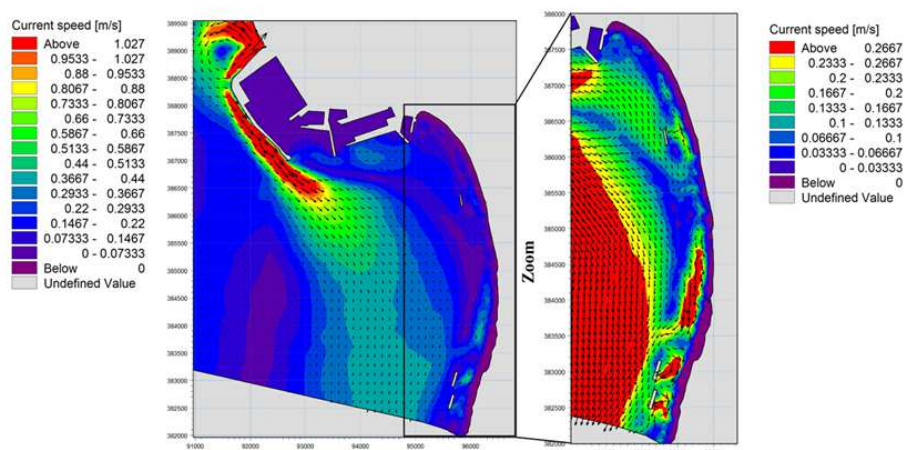


Figure 11 : Simulations des courants engendrés par la houle

## Conclusion

Les analyses granulométriques et calcimétriques menées dans le cadre de l'étude sédimentologique ont permis de montrer une forte relation entre les caractéristiques des sables de la plage d'Agadir (taille, coefficient d'assymétrie, coefficient du triage ...etc.) et les agents dynamiques (houles, marées et courants) qui sont influencés en partie par les aménagements (port, brises lames, épis, extractions des matériaux...etc.). Les zones agitées et ouvertes aux actions des agents hydrodynamiques (Anza et la partie sud de la baie) présentent généralement des sables de taille moyenne et des pourcentages en calcite plus élevés (échanges avec le large). Tandis que les zones calmes protégées et abritées favorisent la sédimentation des sables de taille assez fine et des pourcentages de calcite plus faible (faible échange avec le large).

Au cours de la période 1993-2012, l'évaluation globale du budget sédimentaire pour l'ensemble de la baie d'Agadir montre une perte de l'avant-côte qui dépasse  $-6.55 \pm 1,2$  millions de m<sup>3</sup>. Cette situation est expliquée principalement par la construction du port de commerce qui s'est achevée en 1989. La jetée de ce nouvel ouvrage, qui atteint une profondeur de -20m/Zh, a bloqué la totalité du transit littoral en provenance du nord. Ce blocage a eu pour effets de limiter les apports en sédiments. L'orientation du trait de côte et la forme du port de commerce représentent les principaux facteurs influençant la complexité hydrodynamique de la baie d'Agadir. La jetée du port de commerce crée une zone abritée au nord et diffracte la houle provenant du secteur nord-ouest. Cette jetée est aussi à l'origine de naissance de la contre dérive orientée Sud-Nord. En revanche dans la moitié sud de la baie, les installations touristiques et la digue promenade sont de plus en plus exposées à l'énergie de la houle. Dans ce secteur, l'angle d'approche de la houle génère un courant littoral qui transporte les sédiments en suspension dans la zone adjacente. Une partie de ces sédiments est stockée derrière le système de défense, tandis que le reste est pris par les courants de retour et les courants sagittaux.

En résumé, le déficit budgétaire au niveau de la baie d'Agadir peut être expliqué par : (1) L'impact du port de commerce, qui a bloqué la majorité du sable apporté par la dérive littoral, contribuant ainsi à la croissance de la plage de Anza. (2) L'avancée du trait de côte au nord de la baie, expliqué par l'alimentation en sable principalement par la contre dérive orientée sud-nord (3) les courants de retour en amont du système de défense au sud, transportant les sédiments au large de la zone. Ces sédiments sont ensuite transportés vers le sud par la dérive nord-sud.

## Références

- Abuodha J.O.Z, 2003. *Grain size distribution and composition of modern dune and beach sediments, Malindi bay coast, Kenya*, J. African Earth Sci., vol. 36, pp: 41-54.
- Aernouts D., and Héquette A, 2006. *L'évolution du rivage et des petits-fonds en baie de Wissant pendant le XXe siècle (Pas-de-Calais, France)*. Géomorphologie: relief, processus, environnement , Vol. 1, pp: 49-64
- Anthony E.J., Vanhée S. & Ruz M.-H, 2006. *Short-term beach-dune sand budgets on the North Sea coast of France: Sand supply from shore face to dunes and the role of wind and fetch*, Geomorphology, vol. 81, pp: 316-329.
- Aouiche I., Daoudi L., Anthony E.J., Sedrati M., Ziane E., & Harti A, 2015c. *The impact of storms in the morphodynamic evolution of a human-impacted semi-sheltered beach (Agadir Bay, Morocco)*, Journal of African Earth Sciences , vol.115, pp: 32-47.
- Aouiche I., Daoudi L., Anthony E.J., Sedrati M., Ziane E., Harti A., Dussouillez P, 2015a. *Anthropogenic effects on shoreface and shoreline changes: Input from a multi-method analysis, Agadir Bay, Morocco*, Geomorphology vol. 254, pp: 16-31 doi:10.1016/j.geomorph.2015.11.013.
- Aouiche I., Daoudi L., Ziane E., Harti A, 2015b. *Apport de l'étude diachronique dans l'évolution spatio-temporelle de la baie d'Agadir (Maroc)*, Journal of Materials and Environmental Science. Vol. 6 (11), pp: 3307-3318.
- Chauhan O.S, 1992. *Laminae and grain-size measures in beach sediments, East Coast Beaches, India*, J. Coastal Res., Vol. 8(1), pp: 172-182.
- Folk R.L, 1966. *A review of grain size parameters*, Sedimentology, Vol. 6(2), pp: 73-93.
- Folk R.L. and Ward W.C, 1957. *Brazos river bar; a study on the significance of grain size parameters*, J. sedim. Res., Vol. 27(1), pp: 3-26.
- Gao S., Collins M., Lanckneus J., De moor G., and Van lancker V, 1994. *Grain-size trends associated with net sediment transport patterns: An example from the Belgian continental shelf*, Marine Geology, Vol. 121, pp: 171-185
- Hüttemeyer, P, 2000. *GIS application for the study of the morphodynamics of the shoreface area of the German Bight: methods and problems*. In Populus J. and Loubersac L. (Eds.): *CoastGIS'99: Geomatics and coastal environment*. Serie Actes de Colloques, Ifremer/SHOM, Brest , pp: 222-232.
- LCHF (Laboratoire centrale hydraulique de la France), 1972. *Modélisation physique du port d'Agadir*, Casablanca (Maroc), 4 p.
- Nordstrom K.F, 1977. *The use of grain size statistics to distinguish between high and moderate energy beach environments*, J. Sedim. Res., Vol. 47(3), pp: 1287-1294.

Pino M. & Jaramillo E, 1992. Morphology, texture and mineralogical composition of sandy beaches in South of Chile. J. Coastal Res., Vol. 8(3), pp: 593-602.

Sahu B.K, 1964. *Depositional mechanisms from the size analysis of clastic sediments*, J. Sedim. Res., Vol. 34(1), pp: 73-83.

Short A.D, 1992. *Beach systems of the central Netherlands coast: processes, morphology and structural impacts in a storm driven multi-bar system*, Mar. Geol., Vol. 107, pp: 103-137.

Tamura T., Horaguchi K., Saito Y., Nguyen V. L., Tateishi M., Oahn Ta T.K., Nanayama F. & Watanabe K, 2010. *Monsoon-influenced variations in morphology and sediment of a mesotidal beach on the Mekong River delta coast*, Geomorphology Vol. 116, pp: 11-23

Vatan A, 1967. *Manuel de sédimentologie*, Ed. Tech. Paris, 327 p.