

Analyse de la circulation littorale par l'apport combiné de l'imagerie satellitaire haute résolution, de mesures *in situ* et de la modélisation numérique – Application au littoral de Dakhla

**Nicolas CHINI¹, Matthieu JOUAN¹, Philippe BRYERE², Christian RAFFOURT³,
Philippe BARDEY³, Mohamed CHAGDALI⁴, Jean BOUGIS⁵**

1. ACRI-IN, Quai de la Douane, 29200 Brest, France.
nicolas.chini@acri-in.fr
2. ARGANS, Quai de la Douane, 29200 Brest, France.
3. ACRI-IN, 260 Route du Pin Montard, 06904 Sophia Antipolis, France.
4. GC2-EC, MA
5. Ingénieur Conseil, 32 Chemin du Moulin, 06650 Opio, France.

Résumé :

Dans la région de Dakhla, la côte présente des singularités (cap, etc.). Les forts courants côtiers engendrent une dynamique littorale très complexe qu'il faut bien cerner avant de procéder à des aménagements littoraux. L'installation *in situ* de courantomètres ponctuels, pendant une durée limitée à quelques mois, est donc insuffisante pour caler un modèle numérique ou physique. Il est alors nécessaire de mettre en œuvre différents moyens d'investigations complémentaires à différentes échelles spatio-temporelles : (i) installation de courantomètres fixes, (ii) détermination de transects perpendiculaires au moyen de courantomètres embarqués (extension spatiale), (iii) utilisation d'images satellite acquises pendant des périodes assez longues, (iv) utilisation d'un modèle régional de courantologie avec des courantomètres virtuels en limite d'un modèle local. Cette approche a été mise en œuvre pour la conception du circuit d'eau de mer de l'usine de dessalement de Dakhla au Maroc. Elle a permis de construire un modèle de dilution pour éviter les recirculations et consolider l'étude d'impact. L'imagerie satellite à haute résolution spatiale a joué un rôle prépondérant dans la compréhension de la courantologie côtière. Cet article apporte une vision intéressante de l'utilisation des images satellites non seulement pour aider le modélisateur dans son processus de construction du modèle mais également pour déterminer les zones susceptibles d'être impactées par de fortes turbidités afin de définir l'emprise d'un modèle numérique.

Mots-clés :

Hydrodynamique côtière, Télédétection, Mesures physiques, Modélisation numérique, Travaux maritimes, Environnement littoral.

1. Introduction

La création d'une unité de dessalement dans la région de Dakhla (Maroc) a nécessité la réalisation d'une étude de dilution, pour optimiser la position du rejet tout en éliminant les risques de recirculation, et pour servir de base à l'étude environnementale.

Pour permettre le calage du modèle de dilution, le Maître d'ouvrage a fait réaliser des investigations de terrain, dont des mesures de courant à 640 m du rivage avec un courantomètre ADCP fixe. Ces mesures, collectées sur la période entre le 05/11/2018 et le 05/12/2018, ont fait apparaître des séquences marquées par des inversions de la direction du courant sensiblement toutes les 24 h (voir figure 1).

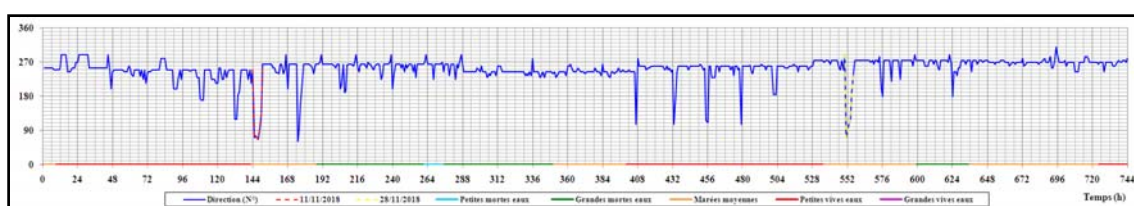


Figure 1. Direction du courant à la surface (N°).

Ces inversions étant difficilement explicables dans une zone dominée par les Alizés du NE, le courant côtier des Canaries qui longe la côte du NE vers le SE et les marées astronomiques, de type semi diurne, il fut nécessaire de recourir à différentes sources d'information pour comprendre ce phénomène et construire un modèle numérique capable de le reproduire.

2. Méthodologie

Etant données les contraintes de délai du projet, il s'est avéré impossible d'implanter un ou deux courantomètres ADCP pendant une période de plus d'un mois et d'espérer obtenir l'ensemble des informations courantologiques nécessaires. En 2019, une solution mixte a donc été mise en œuvre en associant trois sources d'informations :

- une campagne de mesures *in situ*,
- l'exploitation de données satellitales,
- le recours à des courantomètres virtuels dans un modèle de courantologie régional.

L'association de ces trois sources de données a permis d'obtenir des séries temporelles de mesures numériques simulées par le modèle régional, calées avec la campagne de mesures *in situ* et étendue à l'ensemble des informations enregistrées par les satellites depuis de nombreuses années.

2.1 Mesures *in situ*

La prise d'eau a été placée à 440 m du rivage. Les mesures *in situ* ont été réalisées avec deux courantomètres ADCP fixes situés à 500 m et à 1000 m de la prise d'eau.

Ces mesures, qui ont confirmé l'existence du phénomène observé en 2018, ont été complétées par des transects réalisés, lors de la pose et de la reprise des ADCP fixes, entre la côte et un point situé à 3000 m au large. Les transects ont permis de montrer que le courant est très peu dépendant de la distance à la côte.

2.2 Modélisation régionale

Le service européen Copernicus (CMEMS, <http://marine.copernicus.eu/>) met à disposition les résultats de simulation de plusieurs configurations de modèles océaniques fournis entre autres par Mercator, opérateur de services d'analyse et de prévision océaniques de l'océan global. Depuis Avril 2016, une nouvelle configuration globale à la résolution du 1/12° de degré est disponible à échelle temporelle d'une heure et est opérée par le centre de Toulouse. Cette configuration est un produit dérivé plus récent que la configuration initiale, qui propose des résultats depuis 2006, mais sans décomposition de la vitesse. Cette configuration (Surface and Merged Ocean Currents SMOC) fournit séparément plusieurs composantes de la vitesse : le courant régional, le courant dû à la marée, le courant dû aux vagues, le courant total (somme des 3 précédents).

On s'intéresse ici à la vitesse totale, et notamment, aux possibilités d'inversion du sens du courant, dominé par la présence, au large, du courant des Canaries. En effet, ce courant est dirigé en moyenne vers le sud-ouest, nous souhaitons connaître les probabilités d'un courant dirigé vers le nord-est dans la zone d'intérêt.

2.3 Données satellitaires

Deux types de données sont disponibles sur cette période:

- les images Sentinel L1C, disponibles depuis 2016 sans corrections atmosphériques,
- les images Sentinel L2A, disponibles depuis 2018, avec la correction atmosphérique standard ESA (Sen2Corr).

Dans cette étude, la turbidité a été estimée avec l'algorithme développé par HAN *et al.* (2016) sur les données L2A corrigées de l'atmosphère. En milieu côtier, les valeurs de turbidité obtenues par cet algorithme devraient être validées avec des mesures in situ. En l'absence de telles données, seuls les gradients de turbidités sont analysés pour caractériser la courantologie locale.

Le traitement et l'analyse des images satellite sont dépendants de certains paramètres environnementaux qui peuvent détériorer la qualité de l'interprétation:

- les fortes productions primaires en période printanière et estivale qui entraînent une homogénéisation de la couleur de l'eau et ne permettent pas de mettre en évidence des structures turbides singulières le long du littoral;
- les images analysées présentent de faibles niveaux de turbidité ($<1\text{ g/m}^3$ hormis en zone littorale);

Thème 3 – Instrumentation, mesures, imagerie et télédétection

- les aérosols lors de tempêtes de sable ne sont pas bien pris en compte dans les traitements de corrections atmosphériques; un seuil sur la vitesse du vent est appliqué pour la sélection des images.

Au final 14 images ont été jugées exploitables. Sur l'ensemble de ces images le vent moyen journalier provient du NE avec des vitesses inférieures comprises entre 5 et 7 m/s. La hauteur significative des vagues au large pour ces dates est généralement inférieure à 2.5m et la direction de provenance moyenne varie entre NE et NW. Les données de vagues sont extraites de la base de données IOWAGA et ERA5

3. Résultats

3.1 Circulation littorale moyenne

3.1.1 *Apport de la mesure in situ*

Les mesures *in situ* sont à l'origine de nombreuses interrogations et de la remise en question de l'idée reçue selon laquelle le courant des Canaries constitue un écoulement côtier régulier, plus ou moins permanent, orienté depuis le NE vers le SW. Leur analyse nous a conduits à recourir à une approche multidisciplinaire.

3.1.2 *Apport de la modélisation régionale*

La série temporelle au point de coordonnées (-15.2; 24.6) illustre les phénomènes d'inversion du courant total lors d'événements se produisant environ 5% du temps. Sur de très courtes périodes, le courant orienté généralement vers le sud-ouest peut s'orienter vers le nord-est. Ce phénomène semble se produire au moins une fois par an sur une fenêtre comprise entre Septembre et Février. C'est aussi la période où le courant des Canaries est moins intense.

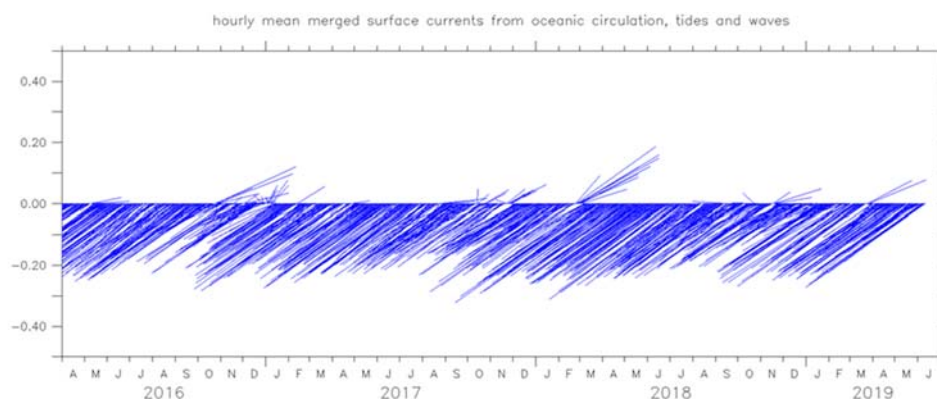


Figure 2. Série temporelle de vitesses de surface sur la période 2016-2019 au large de Dakhla

3.1.3 Apport de l'imagerie satellitaire

Les images satellites ont permis de mettre en évidence des structures turbides, indicatrices de la direction des courants dans la zone d'étude. Deux types de structures turbides ont été identifiés :

- Des bouffées turbides au niveau de la plage qui se développent périodiquement le long du littoral sous l'effet des vagues. Ces structures généralement très côtières s'étendent perpendiculairement à la côte sur une bande de quelques centaines de mètres. En s'éloignant du rivage ces bouffées s'incurvent progressivement vers le Sud Est.
- Des structures turbides au large présentant des turbidités plus faibles sous la forme de panache rectiligne parallèle à la côte. Leur origine peut être associée aux décollements se produisant au niveau de la Pointe des Sept Caps.

Ces deux types de structures peuvent renseigner sur la direction des courants à différentes échelles. Les bouffées turbides sont la marque de courants de retour qui se forment près du littoral sous l'action de la dissipation de l'énergie des vagues et du transfert vers le milieu ambiant d'une quantité de mouvement (figure 3). Ces courants sont généralement orientés perpendiculairement à la côte et transportent l'énergie libérée par les vagues vers le large sur une distance pouvant varier à Dakhla entre 50 m et plusieurs centaines de mètres. Dans le cas de Dakhla, ceux-ci peuvent s'incurver sous l'effet de courants portant vers le sud-ouest. Ces courants de plus grande échelle peuvent être, soit associés à la dérive littorale, soit au courant des Canaries. Les bords de ces courants de retour sont le siège d'intenses cisaillements et des instabilités peuvent induire des systèmes tourbillonnaires donnant naissance à des courants orientés vers le nord-est. Les échelles de ces tourbillons restent toutefois inférieures à quelques dizaines de mètres.

Les structures turbides qui se développent au large peuvent quant à elles être attribuées à différents processus de mise en suspension. En premier lieu, il peut s'agir de la signature de circulation induite par la présence de la Pointe des Sept Caps, situé au nord-est de la zone d'étude (figure 4). Au niveau de ce cap, les images satellites mettent clairement en évidence le décollement de la dérive littorale. Ce décollement prend la forme d'un tourbillon qui a pour conséquence, d'une part de disperser vers le large la turbidité induite par la dérive littorale, et d'autre part de générer une zone de contre-courant orienté vers le nord-est entre le panache turbide et la côte.

Thème 3 – Instrumentation, mesures, imagerie et télédétection

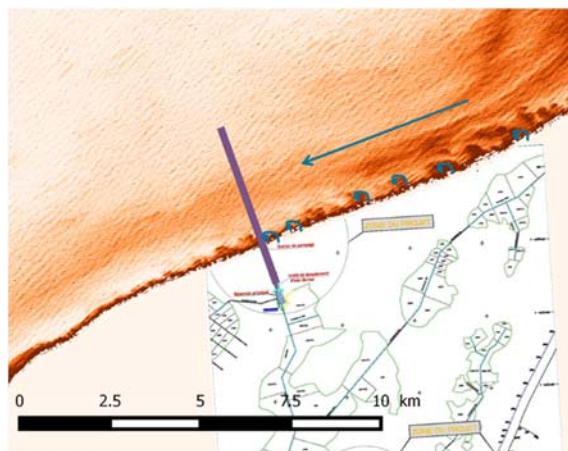


Figure 3. Turbidité de surface mettant en évidence des courants de retour.

Le panache est par la suite repris par le courant des Canaries qui transporte vers le sud-ouest les matières en suspension sur une distance pouvant atteindre la zone envisagée pour l'implantation de l'unité de dessalement de Dakhla.

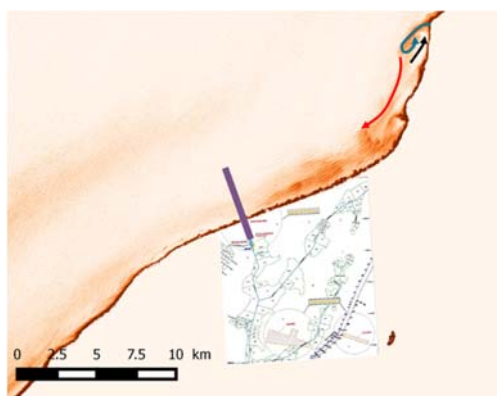


Figure 4. Turbidité de surface et mise en évidence des décollements au niveau du cap des Sept Caps.

3.2 Etudes des cas peu fréquents

3.2.1 *Apport de l'imagerie satellitaire*

Le tableau 1 suivant présente la comparaison entre les conditions de turbidités observées à partir des images satellites et les courants mesurés au point fixe.

Lors de ces comparaisons, les courants portent généralement au sud-ouest conformément à la circulation générale. Le 28/11/2018, les courants marins s'orientent vers l'est. Cette observation se produit de nuit et les images satellites dans le visible étant héliosynchrone n'ont pas permis de mettre en évidence ce changement de direction.

Tableau 1. Caractéristiques des courants mesurés concomitantes aux images satellites

date du cliché	courant moyen	direction minimale	direction maximale	présence de structure	forme des structures	intensité
09/11/2018	0.09	170	250	oui	décollement au niveau de la Pointe des Sept Caps et agitation littorale	forte
14/11/2018	0.10	200	290	oui	agitation littorale	forte
24/11/2018	0.10	105	260	oui	décollement au niveau de la Pointe des Sept Caps	faible
04/12/2018	0.04	245	285	non	-	-

3.2.2 Apport de la modélisation numérique

Le module 3D de la chaîne hydro-informatique, Telemac Mascaret, a été retenu pour cette étude (HERVOUET, 2007). Il résout les équations de Navier-Stokes instationnaires à surface libre, ainsi que les équations de transport-diffusion de traceur actif. Le modèle sur le site de Dakhla a été développé pour l'étude de la dilution du rejet de saumure. Cet article ne traite que l'aspect hydrodynamique. Le modèle prend en considération l'hypothèse de pression non-hydrostatique, la force de Coriolis, le forçage par la marée et les courants des Canaries, le forçage par un vent variable en temps ainsi que la présence de bancs couvrant/découvrant.

Des conditions aux limites des courants régionaux ont été imposées en amont du domaine d'étude (sur la frontière Nord-Est). Les conditions aux limites des niveaux seront donc imposées en aval du domaine d'étude (sur la frontière Sud-Ouest). Le choix de l'emprise du domaine d'étude a été basé sur la prise en compte des éléments géomorphologiques (traits de côtes-caps ...) qui influent sur l'hydrodynamique. L'emprise retenue contient les Sept Caps induisant des singularités qui génèrent des tourbillons. Le schéma numérique MURD (Multidimensional Upwind Residual Distribution) N schéma a été utilisé pour l'advection de la vitesse et de la turbulence. Il a l'avantage d'être conservateur, monotone et génère peu d'oscillation numérique. Le frottement est pris en compte par une loi de Nikuradse avec une longueur caractéristique de la rugosité. Le modèle de turbulence pour la fermeture des équations de Navier-Stokes utilisée est de type « $k-\varepsilon$ ». A la fin du mois de novembre, les lâchers de tourbillons se sont produits en moyenne, avec un intervalle de temps de 24.1 h. tandis que la vitesse moyenne, était de $U=0.3$ m/s. En considérant une longueur caractéristique de 2500 m à 3000 m, le nombre de Strouhal était donc de l'ordre de $St=0.099$ à 0.119 . La figure 5 présente la reproduction d'un lâcher de tourbillon, sur la pointe des Sept Caps.

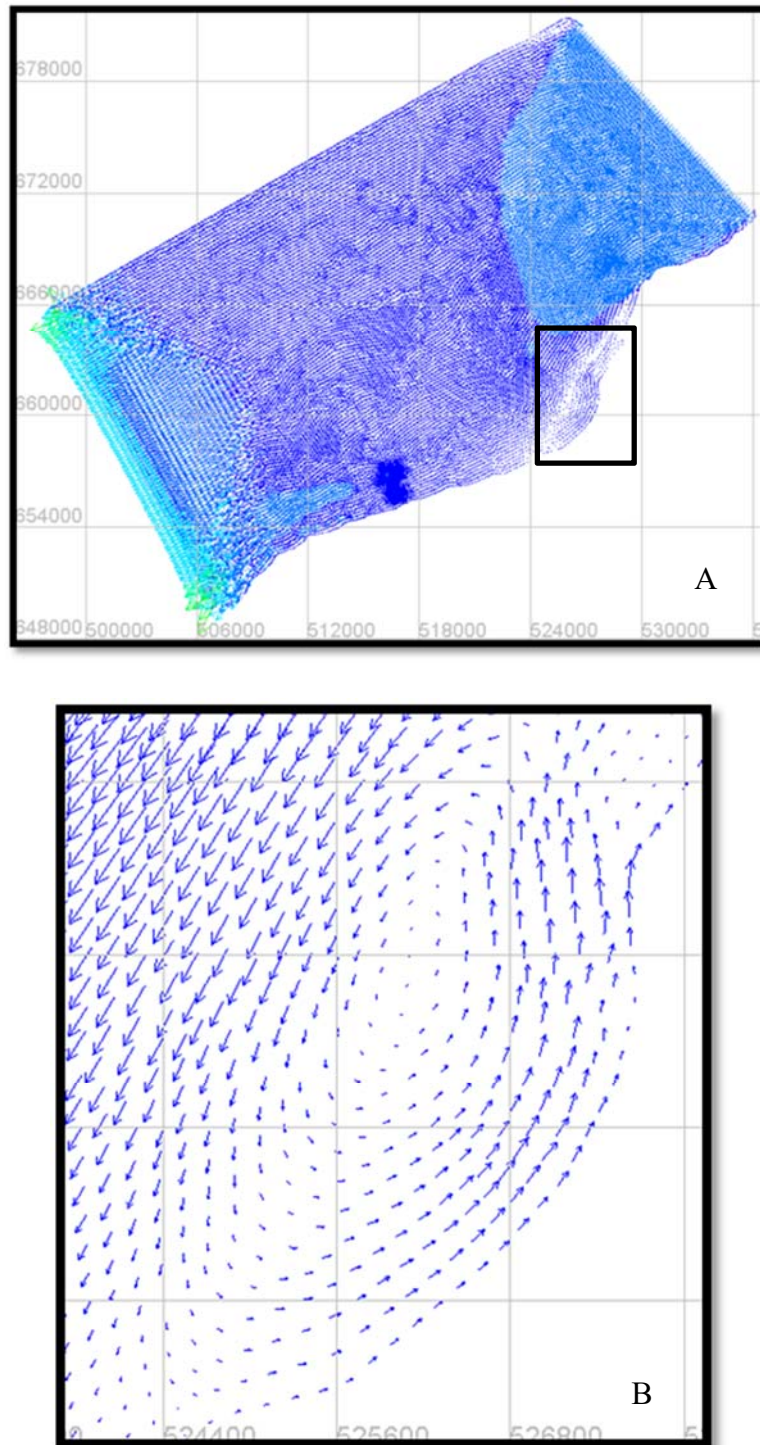


Figure 3. Courantologie dans tout le domaine d'étude (A), zoom sur la zone d'étude (B).

3.3 Discussion

Les images satellites ont permis d'analyser la circulation littorale des turbidités. En particulier en comparant les valeurs intégrées sur une bande littoral, il est possible de caractériser l'étendue cross shore des zones littorales propices aux fortes turbidités et celle

présentant de fortes variabilités (figure 6). Les zones de fortes variabilités concernent une zone restreinte de la bande littorale, la turbidité décroît ensuite vers le large dans une bande de plusieurs centaines de mètres.

Le modèle hydrodynamique a pu représenter correctement la réalité des écoulements côtiers et, en particulier, les lâchers tourbillonnaires issus de la Pointe des Sept Caps. Ce résultat est compatible avec les images relatives à la turbidité (figure 4). Les tourbillons ont un impact sur les champs des vitesses induits par les ondes de marée et les courants généraux. Dans notre expérience, la présence des recirculations a également un impact significatif sur la dilution des saumures.

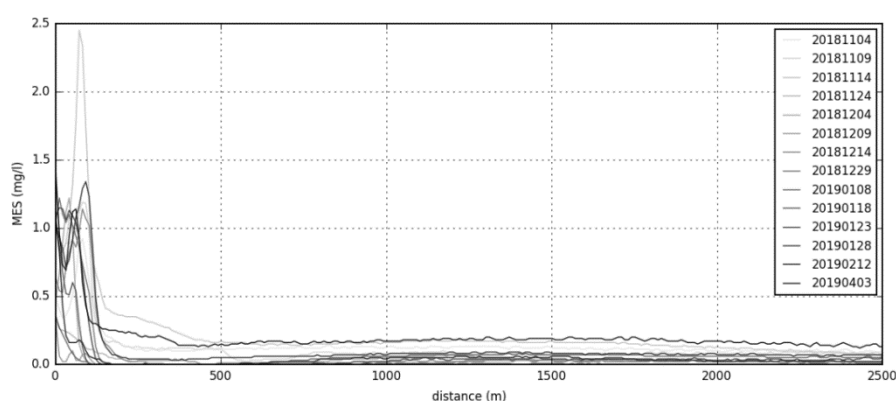


Figure 6. Profils cross shore de turbidité.

4. Conclusion

L'application combinée de mesures in situ, de modélisation numérique et d'observations satellites a permis d'analyser la courantologie côtière dans une zone *a priori* simple. La présence de singularité côtière a pour effet de modifier le schéma général de circulation. Les images satellite ont permis de mettre en évidence la présence de tourbillons dans le sillage d'un cap, que la modélisation numérique a pu reproduire. Cet article illustre l'intérêt d'associer des approches complémentaires pour la caractérisation de site et permet en particulier de déjouer les pièges des idées reçues.

5. Références bibliographiques

- HAN B., LOISEL H., VANTREPOTTE V., MERIAUX X., BRYERE P., OUILLON S., DESSAILLY D., XING Q., ZHU J. (2016). *Development of a semi-analytical algorithm for the retrieval of suspended particulate matter from remote sensing over clear to very turbid waters*. Remote Sensing, Vol. 8(3), 211. <https://doi.org/10.3390/rs8030211>
- HERVOUET J.-M. (2007). *Hydrodynamics of free surface flows: Modelling with the finite element method*, Wiley on line library. <https://doi.org/10.1002/9780470319628>

Thème 3 – Instrumentation, mesures, imagerie et télédétection