



Réponse hydrodynamique d'un système récif-lagon au forçage combiné houle et marée

Damien SOUS^{1,2}, Cristele CHEVALIER^{1,2}, Jean-Luc DEVENON^{1,2},
Marc PAGANO^{1,2}, Jean BLANCHOT^{1,2}, Gilles ROUGIER^{1,2}

1. Université de Toulon, CNRS/INSU, IRD, Mediterranean Institute of Oceanography (MIO), UM 110, 83041 Toulon Cedex 09, France.
2. Aix Marseille Université, CNRS/INSU, IRD, Mediterranean Institute of Oceanography (MIO), UM 110, 13288 Marseille, France.
*sous@univ-tln.fr ; cristele.chevalier@mio.osupytheas.fr ;
{jean-luc.devenon ; marc.pagano ; jean.blanchot ; gilles.rougier}@univ-amu.fr*

Résumé :

Cette communication présente l'analyse combinée de deux campagnes de mesure *in-situ* sur le système récif lagonaire de Ouano, Nouvelle Calédonie, ayant eu lieu en 2013 et 2015. Les mesures combinent la caractérisation de la dynamique trans-récifale avec l'analyse des échanges entre le lagon de Ouano, l'océan ouvert et les lagons adjacents. Les mesures réalisées ont mis en évidence les rôles prépondérants de la marée et de la houle sur la dynamique du système. L'analyse des courants détidés et moyennés sur la verticale ont démontré l'existence de 4 schémas de circulation essentiels qui englobent à eux quatre plus de 90% des observations réalisées. La houle, par sa hauteur significative et sa direction, contrôle en grande partie la bascule entre ces différents schémas de circulation.

Mots-clés :

Lagon chenal, Récif barrière, Flux trans-récifaux, Passes, Houle, Marée, Circulation.

1. Introduction

Les lagons récifaux sont emblématiques de nombreux milieux littoraux tropicaux. Séparés de l'océan par un récif barrière corallien, ils sont une figure morphologique caractéristique des littoraux tropicaux sténohalins, notamment de ceux des îles et des atolls de la zone intertropicale du Pacifique. Ils représentent autour de 10 % des littoraux mondiaux, en particulier ceux du littoral ultramarin français, et leurs écosystèmes à forte biodiversité, rendent des services essentiels aux populations, notamment, la pêche, l'aquaculture et le tourisme.

Les systèmes récifo-lagonaires sont des sujets d'étude extrêmement riches, sur une variété d'aspects hydrodynamiques, chimiques, biologiques, écologiques et sociétaux. Les travaux réalisés sur les barrières récifales ont mis en avant l'importance des interactions entre la marée, la houle et le vent dans le contrôle de la qualité des biotopes récifaux liée aux processus de mélange, oxygénation, nutriments, turbulence, etc.

Thème 1 – Hydrodynamique côtière

(MONISMITH, 2007) et dans la génération des flux trans-récifaux qui affectent la circulation et le temps de renouvellement des eaux du lagon (KRAINES *et al.*, 1998 ; ANGWENYI & RYDBERG, 2005 ; TAEBI *et al.*, 2011).

Cette communication s'inscrit dans la poursuite des travaux engagés à l'Institut Méditerranéen d'Océanologie (MIO UM110) depuis plusieurs années sur le lagon de Ouano, Nouvelle Calédonie (voir par ex. CHEVALIER *et al.*, 2012 & 2015). Notre effort de recherche a pour objectif de caractériser les échanges entre le lagon et l'océan ouvert afin d'évaluer, dans une perspective de plus long terme, la résilience de l'écosystème lagonaire aux impacts du changement climatique et d'une pression anthropique croissante. Le site atelier de Ouano a été sélectionné car il constitue un cas typique de lagon chenal soumis au forçage combiné de la houle, de la marée et du vent, comme l'essentiel des zones récifo-lagunaires des îles hautes du Pacifique. La spécificité de ce travail par rapport aux travaux précédents réside dans l'intégration de la totalité des données disponibles (au total plus de six mois de données) pour fournir, pour la première fois, une caractérisation des schémas de circulation dans le lagon de Ouano.

2. Site d'étude et expériences

2.1 Le lagon de Ouano

L'archipel néo-calédonien regroupe l'un des plus grandes structures récifales au monde, en partie inscrite au patrimoine mondial de l'UNESCO en 2008 (GRENZ *et al.*, 2013). Le lagon de Ouano (plus largement décrit dans CHEVALIER *et al.*, 2015) est un lagon chenal typique, approximativement long de 30 km, large de 10 km et profond de 10 m. Il est principalement exposé aux houles du sud pacifique, aux alizés et à un régime mésotidal. Il est ouvert sur l'océan *via* les passes de Ouarai et Isié et également connecté aux lagons voisins (voir Fig. 1).

Dans le cadre de cette expérience, le domaine d'étude a été restreint à un système clairement délimité avec une topographie assez simple. Il s'étend de la passe de N'Digoro au nord à la passe de Ténia au sud. L'instrumentation a été ainsi disposée pour analyser les échanges avec l'océan, *via* la passe d'Isié ou par dessus la barrière (F à marée basse), et avec les lagons voisins à travers les passes de N'Digoro et Ténia. Le volume de cette zone d'étude est environ $1,3 \times 10^9 \text{ m}^3$.

2.2 Les expériences

Deux campagnes de mesures ont été réalisées, la première du 28 août au 4 décembre 2013 et la seconde du 10 janvier au 15 avril. La première campagne a été partiellement analysée pour produire une paramétrisation des flux trans-récifaux et les intégrer dans un modèle de circulation côtière (voir CHEVALIER *et al.*, 2015). Les données des deux campagnes sont ici agrégées et analysées afin de comprendre la réponse

hydrodynamique du système lagon/récif de Ouano sur une large gamme de conditions externes de vagues, marées et vents.

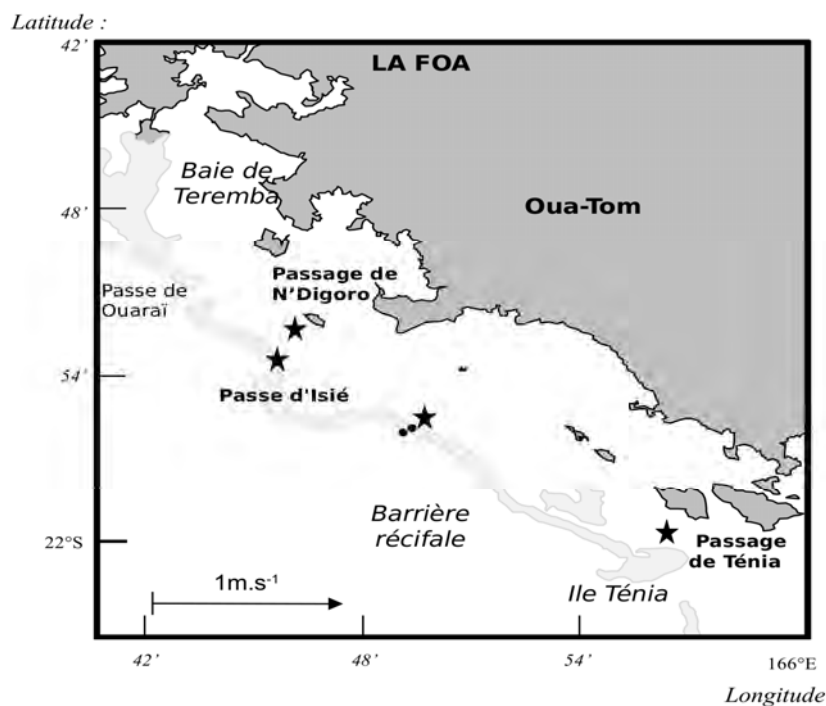


Figure 1. Système lagon-récif de Ouano. Les ronds et les étoiles noires représentent respectivement les capteurs de pression et les profileurs de courant.

Quatre profileurs de courants (ADCP) ont été déployés, trois dans les passes et un sur la partie interne du plateau récifal. Les profondeurs de déploiement sont pour les sites N'Digoro, Isié, Platier et Ténia: 14,84 m, 16,80 m, 3,53 m, 13,89 m pour 2013 et 15,71 m, 16,19 m, 3,31 m, 14,2 m pour 2015. La dynamique des vagues sur le récif est mesurée par des capteurs de pression autonomes (non reliés à une centrale), le premier déployé sur le tombant (à 14,4 m et 12 m pour 2013 et 2015) et le second sur le plateau pour la campagne 2013 (1,13 m de profondeur, indisponible en 2015). La hauteur significative de la houle H_s est obtenue, *via* la théorie linéaire de la houle d'Airy, sur des fenêtres temporelles de 30 min. La direction de la houle ne peut pas être obtenue par un tel dispositif expérimental, nous utilisons donc les données offshore fournies par le modèle WAVEWATCH III, version 4.04.

Durant les deux campagnes de mesure, la direction des houles incidentes est restreinte à au secteur 140 - 215°. La période pic moyenne est de 11,7 s, indiquant la présence de houles longues du Pacifique sud. La hauteur significative moyenne mesurée sur le tombant de la barrière récifale est de 0,67 m et la hauteur maximale atteinte est 2,2 m.

Thème 1 – Hydrodynamique côtière

La grande majorité des fortes houles ($H_s > 1,2$ m) montre une direction autour de 200° , soit une incidence presque orthogonale par rapport à l'axe de la barrière récifale.

Les données météorologiques proviennent de la station météorologique de l'aéroport de Tontouta. Les vents sont typiquement des alizés, modulés par la brise thermique et guidés par le relief de la Nouvelle Calédonie. La grande majorité des vents, et en particulier les vents forts (mesurés jusqu'à 12 m/s), proviennent du sud-est. Les vents sont minimaux pendant la nuit (essentiellement < 1 m/s) et à peu près de terre (provenant du secteur nord à nord-est). Durant la journée, leur intensité augmente alors qu'ils tournent vers l'est, le sud-est puis finalement vers le sud/sud-ouest en faiblissant en fin d'après-midi. La valeur moyenne mesurée en milieu d'après-midi est 5,2 m/s.

Une analyse statistique des données de courants moyennés sur la profondeur a mis en évidence deux caractéristiques essentielles pour la suite de l'analyse :

- i) On observe une forte chenalisation des courants dans les passes due aux contraintes bathymétriques. Sur le platier, les courants montrent une plus grande variabilité directionnelle mais une orientation préférentielle est aussi clairement identifiée. Nous utilisons ces propriétés pour définir une composante principale, i.e. la projection du courant sur sa direction préférentielle, et une composante transverse. La convention de signe est qu'un courant entrant dans le lagon est considéré positif.
- ii) L'analyse spectrale des courants moyennés sur la profondeur a mis en avant la forte influence des composantes de marée dans les signaux de vitesse. Par ordre d'importance décroissante, la composante M2 (12h25) combinée avec S2 (12h), puis K1 (23h56), M4 (6h12) et M6 (4h08). Les courants sans composante tidale, appelés par la suite courants détidés, peuvent alors obtenus en appliquant une série de filtres stop-bandes sur les signaux bruts autour des composantes tidales observées.

3. Résultats

3.1 Vue d'ensemble

Le moteur dominant de la circulation dans le lagon et des échanges avec l'océan ouvert et les lagons adjacents est la marée. Pour s'affranchir de l'effet tidal et comprendre le rôle des autres forçages, la première partie de l'analyse présentée ici est réalisée sur les courants moyennés sur la colonne d'eau et moyennés sur 24h. La figure 2 représente, pour les 2 campagnes de mesures, les composantes principales des courants moyens pour les 4 sites de mesures en regard des caractéristiques de la houle.

On observe en premier lieu que le courant sur la barrière est systématiquement entrant, plutôt sortant à Isié et N'Digoro et assez variable à Ténia. Sur le récif, l'intensité du courant est en lien direct avec l'énergie de la houle incidente et son déferlement sur la barrière, comme mis en évidence par la paramétrisation des flux trans-récifaux proposée par CHEVALIER *et al.* (2015). Sur les autres sites, le lien entre l'intensité du courant et la houle peut également être observé, quoique moins évident.

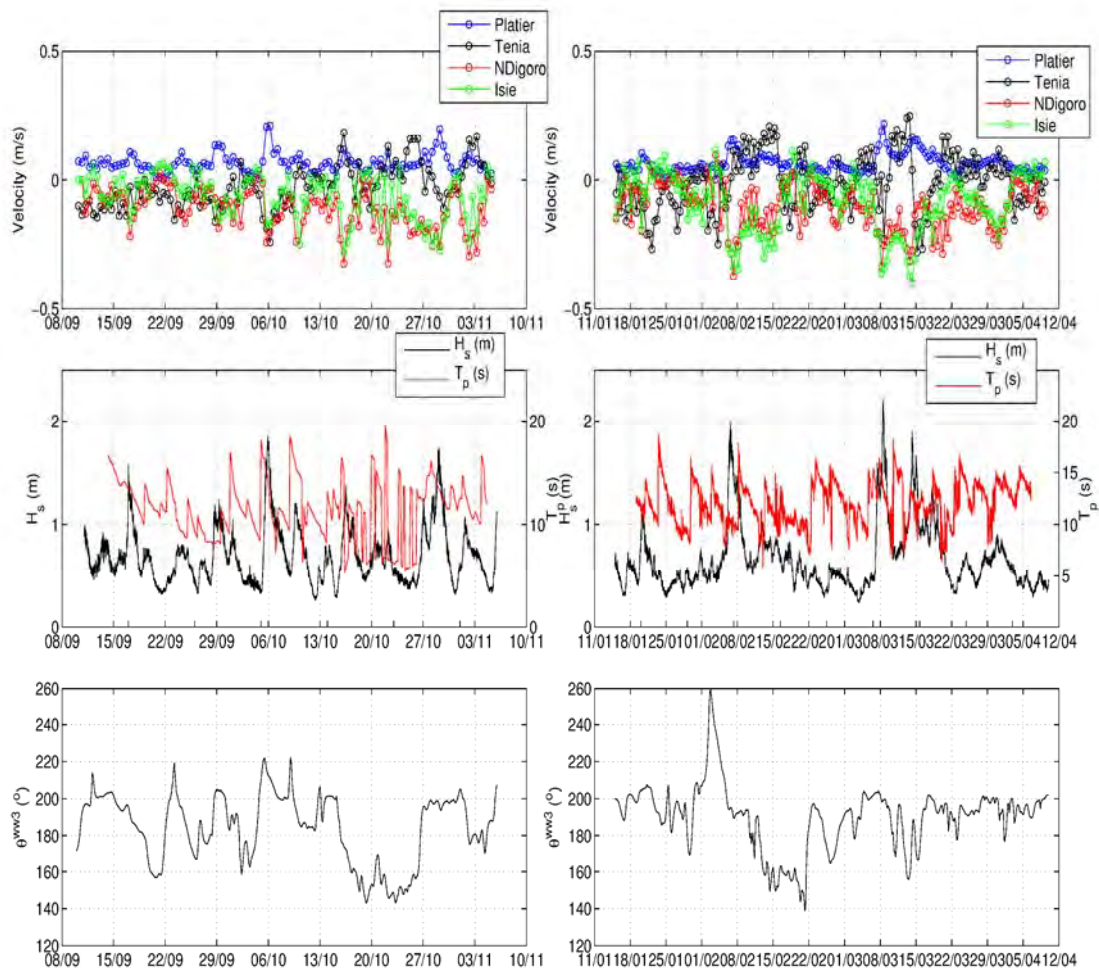


Figure 2. De haut en bas : les courants moyennés sur 24h pour les 4 sites de mesure, les caractéristiques de la houle sur le tombant et la direction de la houle au large fournie par le modèle WaveWatch III. Gauche : campagne 2013 et droite : campagne 2015.

Afin d'établir les liens quantitatifs entre les forçages externes et les échanges sur chaque site, nous avons calculé le coefficient de détermination linéaire entre les courants détidés (composantes principales) et les différents paramètres houle et vent sur l'ensemble des deux campagnes de mesures (voir tableau 1).

On note en premier lieu la très forte corrélation entre les sites Isié, N'Digoro et Platier. Une dépendance marquée est aussi observée entre Ténia et N'Digoro (et Isié dans une moindre mesure). En revanche, aucun lien statistique n'est observé entre Ténia et Platier.

On observe ensuite que, à l'exception de Ténia, tous les courants montrent une forte dépendance à la hauteur significative : les fortes houles tendent à générer des courants entrants sur le récif et sortant ailleurs (avec une dépendance plus moyenne sur

Thème 1 – Hydrodynamique côtière

N'Digoro). A Ténia, les fortes houles peuvent être associées à des courants sortants (voir par ex. le 6 octobre 2013 sur la figure 2) ou entrants (14 mars 2015), ce qui explique en grande partie le faible coefficient de détermination.

Tableau 1. Coefficients de détermination linéaire (en %) entre les courants détidés aux forçages externes. H_s et T_p sont les hauteurs significatives et périodes pic mesurées sur le tombant du récif, θ^{ww3} est la direction de la houle calculée par WaveWatch III, W et θ^w sont les intensité et direction du vent.

	Isié	Platier	N'Digoro	Ténia	H_s	T_p	θ^{ww3}	W	θ^w
Isié		-70,6	70,1	-40,9	-69,7	-6,1	10,1	-30,3	8,8
Platier	-70,6		-63,8	-2,2	87,5	17,2	6,5	17,5	-4,4
N'Digoro	70,1	-63,8		-53,4	-58,7	-3,6	12,8	-23,8	9,6
Ténia	-40,9	-2,2	-53,4		-4,6	-13,7	-37,2	28,2	-12,9

La période de la houle n'apparaît pas être un facteur important dans la dynamique du lagon. En revanche, un lien plus marqué est observé entre la direction de la houle et le courant à Ténia. Ce lien est détaillé sur la figure 3. On note une tendance générale : plus la houle est orientée à l'ouest, plus le courant à Ténia tend à être sortant.

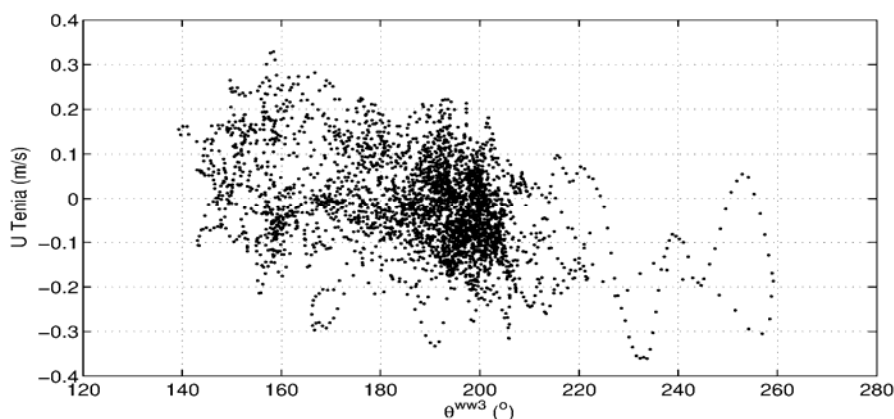


Figure 3. Relation entre la composante principale du courant détidé mesuré à Ténia et la direction de la houle au large calculée par WaveWatch III.

Le vent apparaît jouer un rôle modéré sur la dynamique des courants détidés, les forts vents (toujours originaires de l'est-sud-est) montrent cependant une tendance à entraîner les masses d'eau lagunaires vers l'ouest, engendrant des courants négatifs à Isié et N'Digoro et positif à travers Ténia.

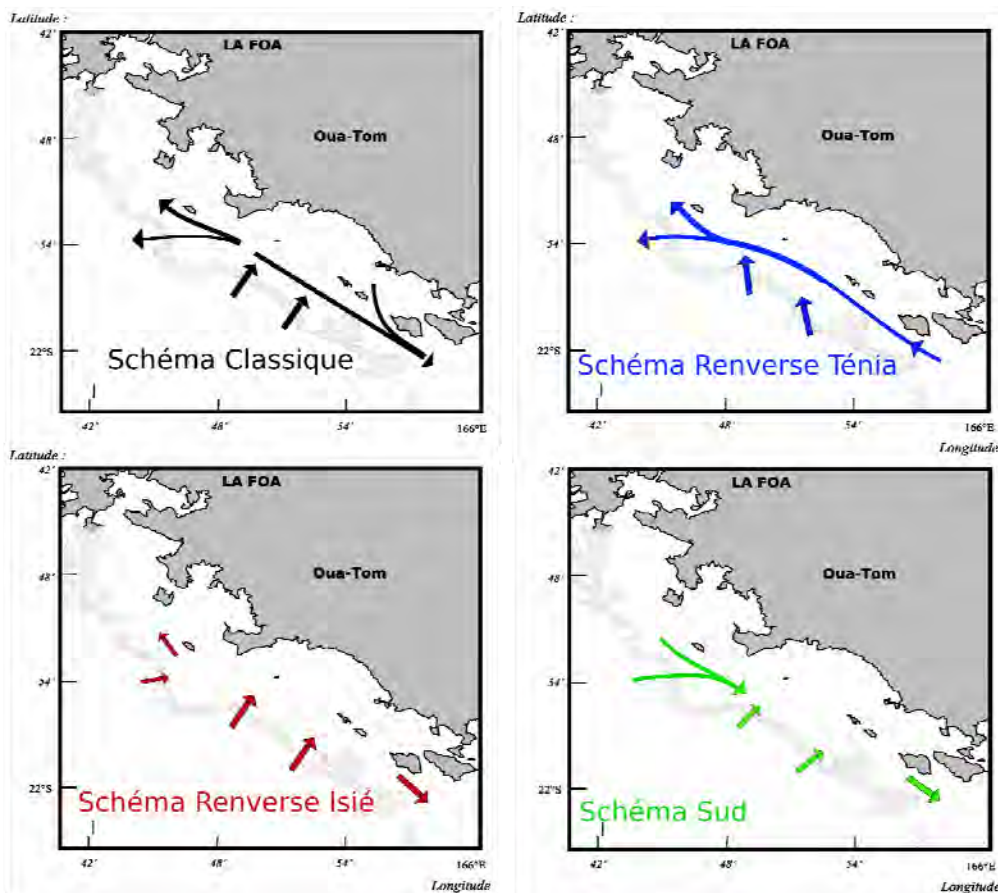


Figure 4. Schémas de circulation observés dans le lagon de Ouano.

3.2 Schémas de circulation

L'analyse complète des données, qui ne peut être totalement déroulée ici faute de place, a permis d'identifier la présence de schémas de circulation caractéristiques au sein du lagon de Ouano. Ces quatre schémas principaux, représentés dans la figure 4, sont décrits ci-dessous :

- Le Schéma Classique. Il est caractérisé par un flux entrant sur le récif et sortant dans les autres sites. Il représente 53,6% des observations réalisées, c'est le schéma de circulation dominant dans le lagon. Il est systématiquement observé lorsque $H_s > 1,3$ m et favorisé par la marée descendante.
- Le Schéma Renverse Ténia. La différence avec le Schéma Classique est le renversement du courant à Ténia, on observe donc un mouvement en bloc des eaux lagonaires vers l'ouest. Il représente 28% des observations réalisées. Il est favorisé par les houles de secteur sud-est et par les vents forts (provenant de l'est-sud-est).
- Le Schéma Renverse Isié et le Schéma Sud qui représentent respectivement 15,8% et 5,4% des observations réalisées. Ces deux schémas de circulation n'apparaissent que durant les conditions de petite houle et de vent faible. Ils ne sont pas très stables, les périodes de temps calme sont souvent caractérisées par l'alternance de SRP et SS.

4. Conclusions

Cette communication présente l'analyse des mesures réalisées durant deux campagnes *in-situ* dans le lagon de Ouano en Nouvelle Calédonie. L'objectif du travail est de caractériser la réponse de la circulation dans le lagon et des échanges avec l'océan et les lagons voisins aux variations des forçages externes, marée, houle et vent. Au total, plus de 6 mois de mesures de courants et de caractéristiques de la houle en entrée du système ont été réalisées. Elles ont démontré l'importance prépondérante de la houle et de la marée sur la dynamique du système, le vent ayant une influence plus faible sur les courants intégrés verticalement à l'échelle du lagon. Nous avons pu mettre en évidence la présence de schémas de circulation typiques au sein du lagon, dont le développement dépend en premier lieu des caractéristiques de la houle, sa hauteur et sa direction. La houle a ainsi un effet primordial, *via* la mise en place de différents schémas de circulation, sur les temps de résidence et le renouvellement des eaux du lagon. Le travail en cours permettra de poursuivre l'analyse de ces données et établir une caractérisation pertinente des conditions d'apparition des schémas de circulation, permettant à terme la comparaison avec les modèles numériques en développement (CHEVALIER *et al.*, 2015).

5. Références bibliographiques

- ANGWENYI C.M., RYDBERG L. (2005). *Wave-driven circulation across the coral reef at Bamburi lagoon, Kenya*. Estuarine, Coastal and Shelf Science, Vol. 63(3), pp 447-454. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecss.2004.12.008>
- CHEVALIER C., DEVENON J.L., REY V. (2012). *Impact of cross-reef fluxes on the Ouano lagoon circulation*. 12th International Coral reef symposium.
- CHEVALIER C., SOUS D., DEVENON J. L., PAGANO M., ROUGIER, G., BLANCHOT J. (2015). *Impact of cross-reef water fluxes on lagoon dynamics: a simple parameterization for coral lagoon circulation model, with application to the Ouano Lagoon, New Caledonia*. Ocean Dynamics, Vol. 65(11), pp 1509-1534. <http://dx.doi.org/10.1007/s10236-015-0879-x>
- GRENZ C., LE BORGNE R., TORRETON J.P., FICHEZ R. (2013). *New Caledonia Lagoon: a threatened paradise under anthropogenic pressure*. Lagoons: Habitat and Species, Human Impacts and Ecological Effects. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00807828/>
- KRAINES S.B., YANAGI T., ISOBE M., KOMIYAMA H. (1998). *Wind-wave driven circulation on the coral reef at Bora bay, Miyako island*. Coral Reefs. Vol. 17(2), pp 133-143. <http://dx.doi.org/10.1007/s003380050107>
- MONISMITH S.G. (2007) *Hydrodynamics of coral reefs*. Annu. Rev. Fluid Mech. Vol. 39: 37-55. <http://dx.doi.org/10.1146/annurev.fluid.38.050304.092125>
- TAEBI S., LOWE R.J., PATTIARATCHI C.B., IVEY G.N., SYMONDS G., BRINKMAN R. (2011). *Nearshore circulation in a tropical fringing reef system*. Journal of Geophysical Research: Oceans, Vol. 116(C2). <http://dx.doi.org/10.1029/2010JC006439>