

Écologie / Ecology

Hétérogénéité spatiale du forçage du vent : fonctionnement des récifs artificiels et circulation des eaux dans la baie sud de Marseille

Marie-Aude Pradal*, Bertrand Millet

Laboratoire d'océanographie et de biogéochimie, UMR 6535 CNRS–université de la Méditerranée, campus de Luminy, Case 901, 13288 Marseille cedex 9, France

Reçu le 8 février 2006 ; accepté le 12 février 2006

Disponible sur Internet le 9 juin 2006

Présenté par Lucien Laubier

Résumé

Notre étude se situe dans le cadre du plus grand projet français d'immersion de récifs artificiels, lancé par la ville de Marseille en 2001, et décrit la typologie hydrodynamique de la zone d'immersion par modélisation numérique 3D. Les résultats conduisent à préciser les statistiques du vent local, quantifier les champs de courants de fond et décrire les trajectoires associées. La connaissance des connexions hydrodynamiques entre les zones sources ou cibles de particules dérivantes liées aux récifs permet de diagnostiquer le succès ou l'échec de leur fonctionnement. En outre, les résultats confirment l'hétérogénéité spatiale du vent et démontrent l'erreur commise par l'utilisation d'une direction de vent moyenne, mais irréaliste. **Pour citer cet article : M.-A. Pradal, B. Millet, C. R. Biologies 329 (2006).**

© 2006 Publié par Elsevier SAS pour l'Académie des sciences.

Abstract

Spatial heterogeneity of wind forcing: application to artificial reef functioning influenced by the circulation in the Bay of Marseilles, France. In the frame of the largest French project of artificial production reefs, initiated by the city of Marseilles in 2001, the present study aimed at describing the hydrodynamic pattern of the coastal area considered, by the use of a 3D numerical modelling. Results were local wind statistics, bottom current fields and drifting particle maps. The knowledge of the hydrodynamic connexions between particle (such as larvae) sources or targeted areas linked to the reefs, allows us to explain the success or failure of the reefs' colonizing. Moreover, the study confirms the wind spatial variability and demonstrates the error resulting from the use of an average but locally absent wind direction. **To cite this article: M.-A. Pradal, B. Millet, C. R. Biologies 329 (2006).**

© 2006 Publié par Elsevier SAS pour l'Académie des sciences.

Mots-clés : Modèle numérique ; Champ de courant ; Trajectoires de particules ; Récifs artificiels ; Colonisation ; Baie de Marseille

Keywords: Numerical modelling; Current field; Particle drifting; Artificial reefs; Colonization; Bay of Marseilles

Abridged English version

The Bay of Marseilles is divided into two basins, unequally urbanized. The commercial harbour is located

* Auteur correspondant.

Adresse e-mail : pradal@com.univ-mrs.fr (M.-A. Pradal).

on the coast of the northern bay, whereas the southern bay is more preserved, as its coasts are beaches. The city of Marseilles started in 2001 the largest French programme on artificial reef deployment. By the end of 2006, 35 000 m³ of concrete and steel will be deployed on the – almost desert – sea floor of the Southern Bay and then offer new habitats to the local fauna and flora.

The area of deployment was chosen for several criteria, such as short distance from the reefs to the natural productive places and a time- and wind-varying hydrodynamic surrounding, as pointed out by a previous study. For years, this previous work remained the reference study on hydrodynamics in the Bay of Marseilles. This study, based on a few measurements, had to be enhanced. The purpose of Marie-Aude Pradal's PhD was to exhaustively describe the wind-induced hydrodynamic pattern of the bay and to help pointing out the most effective areas for reef functioning and deployment.

Indeed, while it was important to deploy reefs geographically close to potentially productive areas of the Bay, it was also important to be sure that these areas were hydrodynamically connected to the targeted reef area. This can be done by numerical simulations of drifting particle trajectories. As the model used in this study (Princeton Ocean Model, POM) is only forced by wind, the first step was to identify the local dominant wind regime (northwest and southeast) provided by the closest station (Pomègues Island, 3 km away from the reef area).

The wind statistics at Pomègues were compared to the major wind station statistics (Marseilles Airport at Marignane, 21 km northwest from the reef site). This comparison showed that, on a yearly scale, winds at Pomègues blow more often stronger. The most interesting results are a different distribution of southern winds and the disappearing of a major wind direction (SE 140°) at the local station of Pomègues, whereas this wind direction remains at the distant station of Marignane. Thus, the wind rose measured at Pomègues allowed us to identify the efficient local wind situations.

Based on these wind forcings, the bottom currents in the Bay were computed using the 3D numerical model POM. Maps of the wind-induced bottom circulation show that northern NW wind (320°) and NW (340°) generate similar hydrodynamic structures. Therefore, it is possible to only consider the major NW wind (340°) to describe northern winds. The remarkable hydrodynamic structures that appear with NW wind (340°) are: an upwelling and a downwelling on the southern and the northern coasts of Frioul Islands, respectively; gyres in the vicinity of the reef area; strong southwestward cur-

rents along the coast of the Bay, and a large northeastward current coming from offshore. The maps of bottom currents generated by southern winds show that the two main winds SE 120° and 160° present drastic differences on current pattern. Thus, it is no longer possible to consider only one direction of southern wind. SE wind (120°) induces a downwelling and an upwelling on the southern and the northern coast of Frioul, respectively. Two main jets appear in the Bay: a northeastward one and a southwestward one. Rotating systems appear along the coast close to the Endoume and Cap Croisette capes. By SE wind (160°), the circulation in the bay follows the same pattern as for NW wind (340°), but all currents are in opposite directions.

Knowing the bottom circulation in the Bay allows us to calculate drifting particle trajectories. As southeastern winds present the greater range of variations in currents, the trajectories of particles drifting by these wind directions were of particular interest. Several maps show the trajectories followed by particles coming from the surrounding productive areas, but also from the reef area itself as, once colonized, it shall become a productive area too.

As it would be unrealistic to present trajectories from all the source points, maps presented in this paper show three-day-long particle trajectories, coming from three sources located respectively on coralligen rocky bottom close to Frioul Islands (station 1), in the sea grass near the Prado beaches (station 2) and in the artificial reef area itself (station R). These SE wind-induced maps show that trajectories induced by SE wind (140°) from both stations 1 and R present similar pattern as when induced by SE wind (160°) (southwestward and northward, respectively), but opposite pattern when induced by SE wind (120°), southeastward. Inversely, trajectories of particles drifting from station 2 present similar pattern when induced by both SE winds (120° and 140°), gyres, but a quite different direction when induced by SE wind (160°), southwestward.

In addition, the comparison between the trajectories respectively induced by the existing SE winds (120° and 160°) and the SE wind (140°), which does not exist in the southern bay, emphasizes the drastic necessity to consider the information representative of the local wind forcing, rather than information recorded at a distant station, even at the major regional meteorological station. For instance, our results show that considering the averaged SE (140°) wind as representative of all the Southeast winds would lead to describe only half of the total information on the local circulation sensitivity to wind variability.

1. Problématique de l'étude

La baie de Marseille est divisée en deux bassins (nord et sud), qui sont concernés par des activités humaines et des usages différents. Les côtes de la baie nord sont extrêmement urbanisées et sont le lieu d'activités humaines polluantes (port autonome de Marseille), tandis que les côtes de la baie sud sont orientées vers des activités récréatives (plages et site classé des calanques) et sont l'objet d'une attention particulière quant à la qualité des eaux et le niveau de biodiversité. Dans ce but, la Direction de la Qualité de Vie Partagée de la ville de Marseille (DQVP) a lancé un programme de recolonisation et de repeuplement des fonds quasi désertiques de la baie sud [1], et la ville de Marseille est depuis 2001 le maître d'ouvrage du plus grand programme français d'immersion de récifs artificiels de production. Cette opération Récifs Prado 2006 prévoit l'immersion de 35 000 m³ de structures artificielles spécifiquement conçues pour la restauration des habitats et des écosystèmes de la baie sud. À terme, les résultats escomptés sont une augmentation de la ressource biologique et la pérennité de la pêche et du tourisme marseillais. La zone d'immersion présentée sur la Fig. 1 a été retenue par la DQVP, en concertation avec les usagers du milieu, selon les critères suivants :

- facilité d'accès et de surveillance
- protection offerte par l'archipel du Frioul contre les houles du large ;
- possibilité de réhabilitation d'anciennes zones d'herbiers aujourd'hui disparus et présentant de vastes fonds plats propices à l'installation des récifs ;
- présence de courants intenses et variables en fonction des vents dominants (NW et SE) [2] ;

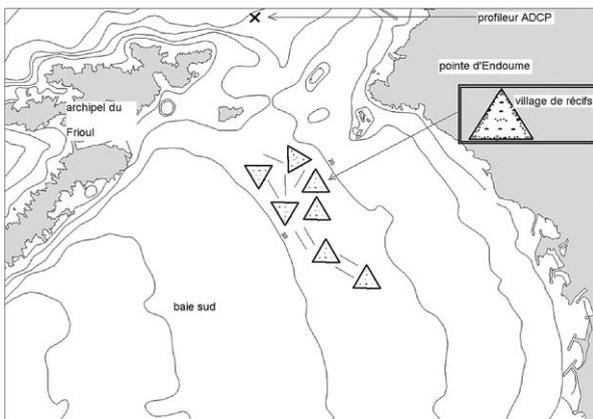


Fig. 1. Carte du domaine d'étude dans la baie sud de Marseille, avec la zone d'immersion des récifs artificiels constituée de sept « villages » juxtaposés.

- proximité d'un vaste herbier de posidonies et d'importantes zones naturelles rocheuses, gages d'une colonisation rapide par la flore et par la faune sous marine locale par le biais du recrutement de larves [3] ;
- présence sur toute la bande côtière d'importantes nourriceries de poissons.

Ces deux derniers critères de sélection soulignent l'importance des connexions hydrodynamiques entre les zones naturelles potentiellement sources d'œufs, de larves ou de juvéniles et les nouveaux habitats artificiels. Depuis une quinzaine d'années, les études relatives au transport larvaire par les courants se multiplient [4,5] et montrent l'utilité de connaître l'hydrodynamisme local avant de procéder à l'immersion de récifs artificiels [6]. De plus il s'avère indispensable d'étudier le réseau de connexions entre les enrochements, nourriceries de poissons, herbiers (zones sources) et les récifs (zones cibles) dans le but de comprendre le succès de la colonisation de ces structures artificielles. Puis, en faisant l'hypothèse d'une colonisation réussie des récifs, il devient intéressant d'étudier l'impact retour que ces structures artificielles sont susceptibles d'avoir sur les communautés naturelles par l'intermédiaire des connexions hydrodynamiques existantes entre les récifs (devenus zones sources) et les enrochements naturels périphériques (devenus zones cibles). La connaissance de la circulation dans la baie de Marseille repose actuellement sur la seule étude expérimentale, menée par Castelbon [7] à partir de l'extrapolation de profils verticaux de courants mesurés de manière instantanée en neuf stations réparties à travers la baie et sur huit niveaux verticaux, pour quatre régimes de vent. Il devenait essentiel de compléter cette première étude expérimentale par une modélisation numérique de circulation 3D, afin de décrire les champs de courants de manière continue sur l'ensemble de la baie de Marseille, et typologique quant aux régimes dominants du vent local.

Cet article présente le travail de thèse de Marie-Aude Pradal et met en évidence des connexions hydrodynamiques (aller-retour) entre les récifs artificiels et le reste de la baie, selon une approche typologique et sous la forme de champs 3D de courants et de tracés de trajectoires lagrangiennes de particules.

2. Matériels et méthodes

2.1. Données bathymétriques

La grille bathymétrique a été obtenue par numérisation et interpolation de la carte SHOM au 1/50 000^e [8].

Cette grille couvre un domaine de 25 km × 35 km, avec une résolution horizontale de 100 m, après interpolation. Il est important de noter la présence de nombreux îlots, pointes et seuils, qui sont autant d'accidents topographiques susceptibles de contraindre localement la circulation des masses d'eau.

2.2. Données météorologiques

La baie de Marseille est entourée au nord par la chaîne de la Nerthe (ou chaîne de l'Estaque), culminant à 337 m, à l'est par la colline de la Garde (143 m) et au sud-est par le massif de Marseilleveyre (432 m) et celui des Calanques (Puget 564 m). L'ensemble de ces reliefs, bien que peu élevés, modifie les trajectoires des vents soufflant sur la baie. La station de mesure du vent à considérer dans notre étude a été choisie en fonction des critères suivants : la proximité de la baie sud et de la zone d'immersion des récifs ; une relative indépendance par rapport au tissu urbain et aux reliefs.

La station Météo-France répondant au mieux à ces critères est la station du Sémaphore de l'île de Pomègues, située à 3 km de la zone d'immersion des récifs artificiels. Les données de vent sont disponibles sous la forme d'enregistrements du vent moyen tri-horaire pour la période 1976–1998 (date de fermeture de la station).

2.3. Données courantologiques

Dans le cadre d'une étude sur la qualité des eaux de baignade, la direction de l'Eau et de l'Assainissement de la Ville de Marseille a commandé en 2003 une campagne de trois mois de mesures de profils de courants dans la baie. Les profils obtenus au point de mesure situé au nord de la passe d'Endoume (Fig. 1) ont permis d'effectuer la validation du modèle numérique. Le profileur ADCP a enregistré la vitesse et la direction du courant sur la verticale pendant trois mois (d'octobre à fin décembre 2003) à la fréquence d'une mesure toutes les 10 min. Plusieurs séries de mesures, correspondant aux scénarios de vent caractéristiques considérés par la modélisation numérique, ont été extraites de la base complète des enregistrements.

2.4. Modèle numérique de circulation

Le modèle numérique de circulation choisi pour cette étude est le modèle 3D POM (*Princeton Ocean Model*) développé à l'université de Princeton (New Jersey, États-Unis) [9,10]. Il s'agit d'un modèle aux équations

primitives 3D et aux coordonnées sigma, qui a été appliqué sur la baie de Marseille à l'aide d'un maillage régulier de 100 m de côté, 11 niveaux verticaux, un forçage limité à un vent homogène et stationnaire en direction et intensité et des conditions de frontières libres et radiatives aux limites ouvertes du domaine.

3. Résultats

3.1. Typologie du vent

Les statistiques de vent calculées à partir des mesures tri-horaires à la station de Pomègues ont permis d'établir la rose fréquentielle des vents de vitesse supérieure à 4 m s⁻¹, c'est-à-dire à la vitesse suffisante pour induire un mouvement stationnaire de la masse d'eau. Ce calcul met en évidence la prédominance de deux secteurs de vents : NW et SE, et il est intéressant de noter que chacun de ces secteurs est décrit par deux azimuts préférentiels : 320° et 340° pour le secteur NW ; 120° et 160° pour le secteur SE. Les fréquences d'occurrence de chacun des deux secteurs principaux de vent sont de 27% et de 12%, respectivement pour le secteur NW et le secteur SE.

La Fig. 2 présente la rose des vents mesurés à Pomègues et caractéristique de la baie sud de Marseille, définie à partir des quatre directions suivantes : SE 120° ; SE 160° ; NW 320° et NW 340°.

La Fig. 3 présente la rose des vents mesurés à la station Météo-France de référence de l'aéroport de Marseille Marignane. En effet, cette station offre la plus longue série temporelle de mesure du vent sur la région marseillaise, mais est éloignée du site d'immersion des récifs artificiels de 21 km. Les roses représentent les fréquences d'occurrence des épisodes de vent supérieurs à 4 m s⁻¹, en pourcentage de jours ventés et pour chaque secteur de vent.

La comparaison des Figs. 2 et 3 montre que deux différences majeures apparaissent dans les régimes de vents mesurés localement à la station de Pomègues (baie sud) et à 21 km vers le nord-ouest à la station de Marignane : le renforcement général en intensité des vents et plus particulièrement des vents de secteur SE, et surtout l'inexistence du secteur SE 140° à la station de Pomègues, du fait de l'impact orographique de la chaîne de Marseilleveyre.

En effet, une attention toute particulière doit être portée à la représentation des vents du secteur SE, qui pourraient être raisonnablement décrits par le seul secteur moyen SE 140° à partir de la seule analyse des enregistrements de Marignane, mais qui exigent la prise en compte des deux secteurs SE 120° et SE 160° à la

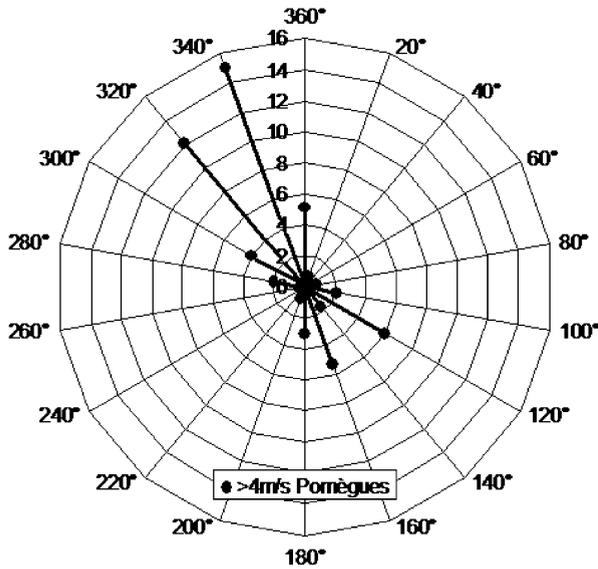


Fig. 2. Rose fréquentielle d'occurrence des vents de vitesse supérieure à 4 m s^{-1} mesurés au sémaphore de Pomègues de 1976 à 1998.

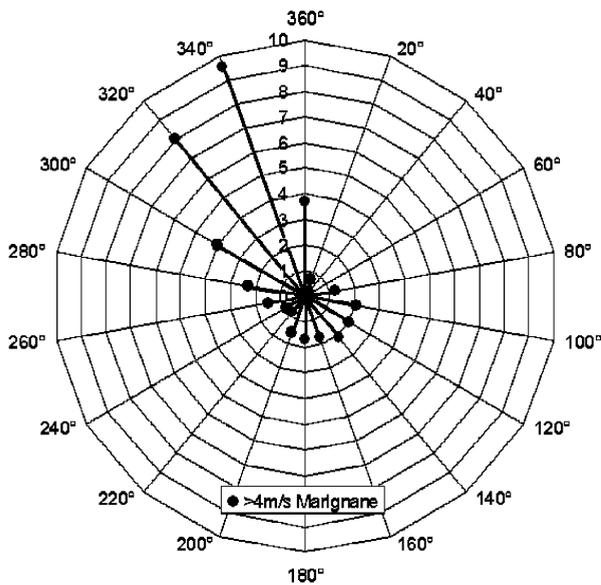


Fig. 3. Rose fréquentielle d'occurrence des vents de vitesse supérieure à 4 m s^{-1} mesurés à l'aéroport de Marignane de 1971 à 2000.

vue des enregistrements de la station de Pomègues. Par conséquent, il apparaît intéressant d'utiliser l'outil de modélisation numérique de circulation pour montrer la sensibilité du champ de courant dans la baie sud de Marseille à l'hétérogénéité spatiale des vents de secteur SE, et ainsi de mettre en évidence l'erreur qui risque d'être commise sur la connaissance de la circulation au voisinage des récifs artificiels en considérant un vent de direction SE 140° , qui n'existe pas localement.

3.2. Validation du modèle

À partir des trois mois de mesures de courant disponibles au profileur ADCP de la passe d'Endoume (Fig. 1), il est possible d'extraire les directions de trois circulations forcées par un vent de secteur NW (M1, M2 et M3) et trois circulations forcées par un vent de secteur SE (S1, S2 et S3).

La Fig. 4 montre, de manière comparative, la superposition des profils mesurés et des profils calculés par le modèle. Ces résultats peuvent être interprétés comme une assez bonne validation du modèle en termes de direction des courants.

Bien que le code POM calcule les champs de courant sur 11 niveaux verticaux, seules les cartes des champs de courants au voisinage du fond correspondant au niveau d'immersion des récifs artificiels dont la hauteur moyenne est de 5 m sont retenues. Les Figs. 5 et 6 présentent les champs de courant au voisinage du fond sous les forçages des vents de NW 320° et NW 340° respectivement, soufflant à la vitesse stationnaire de 10 m s^{-1} .

Ces figures mettent en évidence la présence d'un *upwelling* côtier au niveau de la côte sud de l'île de Pomègues et, à l'inverse, d'un *downwelling* sur la côte nord des îles de Pomègues et Ratonneau.

De plus, la baie sud est alimentée par un courant venant du large, qui porte vers le nord-est. Ce courant rencontre, au centre de la baie sud, un courant portant vers le sud-est, qui présente une accélération au niveau de la passe d'Endoume, ainsi qu'au voisinage de la côte au niveau du cap Croisette. Ce courant atteint des vitesses maximales de l'ordre de 20 cm s^{-1} . La rencontre de ces deux courants donne naissance à un gyre au large de la pointe Rouge. Il est intéressant de noter la présence de trois autres gyres de plus petites dimensions au voisinage du fond et à proximité de l'île de Ratonneau, de la pointe d'Endoume et des plages du Prado.

Enfin, ces figures montrent un type de circulation similaire pour les deux secteurs NW 320° et NW 340° . Toutefois, il faut noter que les centres des gyres se déplacent de quelques centaines de mètres en fonction du secteur considéré et que la vitesse maximale du courant est supérieure de 2 cm s^{-1} pour un vent de direction NW 340° .

En conclusion, il est possible de considérer que les vents de secteur NW ne génèrent qu'un type de circulation dans la baie et de ne retenir que la typologie hydrodynamique induite par la direction du vent NW dominant : NW 340° .

D'une manière similaire, les Figs. 7 et 8 présentent les champs de courant au voisinage du fond sous les forçages des vents de SE 120° et SE 160° , respective-

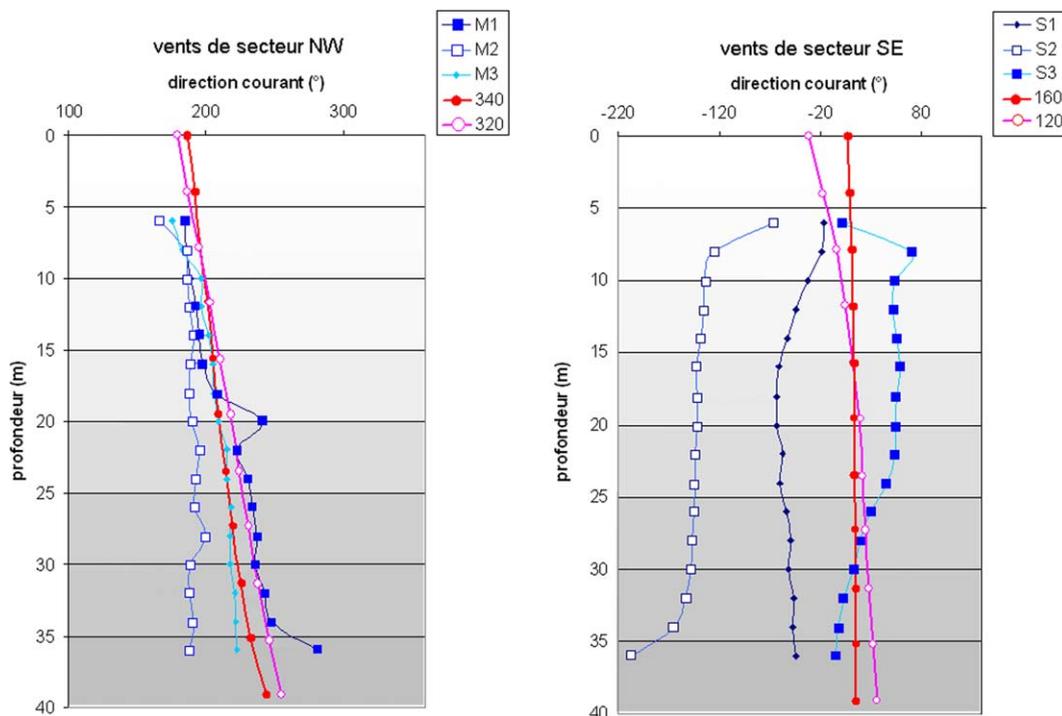


Fig. 4. Validation en direction des profils des courants simulés par vents de NW (320°, 340°) et SE (120°, 160°) par comparaison avec les courants mesurés par vents de NW (M1, M2, M3) et SE (S1, S2, S3) respectivement.

ment, soufflant à la vitesse stationnaire de 10 m s^{-1} . Les Figs. 7 et 8 montrent que par vent de secteur SE, le système *upwelling/downwelling* du Frioul est inversé : un *downwelling* apparaît sur la côte sud de Pomègues, alors qu'un *upwelling* apparaît sur sa côte nord. Le courant dans la passe d'Endoume porte vers le nord, ce qui est inversé par rapport à la situation de vent de secteur NW, et atteint des vitesses de l'ordre de 10 cm s^{-1} .

Dans le cas d'un forçage de vent de direction SE 120° (Fig. 7), il apparaît, au centre de la baie sud, un courant portant vers le sud est. La baie sud est alimentée par un courant provenant de l'extrémité sud est du domaine, présentant des intensités pouvant dépasser 10 cm s^{-1} au voisinage de la côte, et qui donne naissance à un gyre lors de son passage devant le cap Croisette. Plusieurs gyres de plus petites dimensions apparaissent au niveau de la pointe d'Endoume.

Dans le cas d'un forçage par le vent de direction SE 160° (Fig. 8), contrairement au cas précédent, il apparaît au centre de la baie sud un courant portant vers le sud-ouest. La baie sud n'est plus alimentée par le courant provenant de l'extrémité sud-est du domaine. Le gyre du cap Croisette est très réduit et deux gyres cycloniques se forment au centre de la baie sud et devant les plages du Prado.

En conclusion, il est possible de considérer que les vents de secteur SE génèrent dans la baie sud de Marseille deux types de circulation bien différenciés, correspondant respectivement aux directions SE 120° et SE 160°.

3.3. Trajectoires des particules dérivantes

Les cartes de distribution des particules dérivantes ont été établies par calcul lagrangien des trajectoires. Seules les cartes relatives aux vents de secteur SE seront retenues dans cette partie de l'étude, afin de souligner l'erreur susceptible d'être faite par l'utilisation du secteur SE 140° qui n'existe pas dans la baie sud de Marseille.

Les points sources considérés dans la baie sud pour le calcul des trajectoires, correspondent à des sites caractéristiques et connus pour leur importance écologique : les enrochements coralligènes du Frioul et les nourriceries de l'herbier de posidonies situé dans la partie orientale de la baie au large des plages du Prado. De plus, les récifs artificiels, une fois colonisés, sont également considérés, dans la présente étude, comme une troisième source d'émission de particules.

Les Figs. 9–11 montrent les trajectoires des particules entraînées par les courants générés par des vents

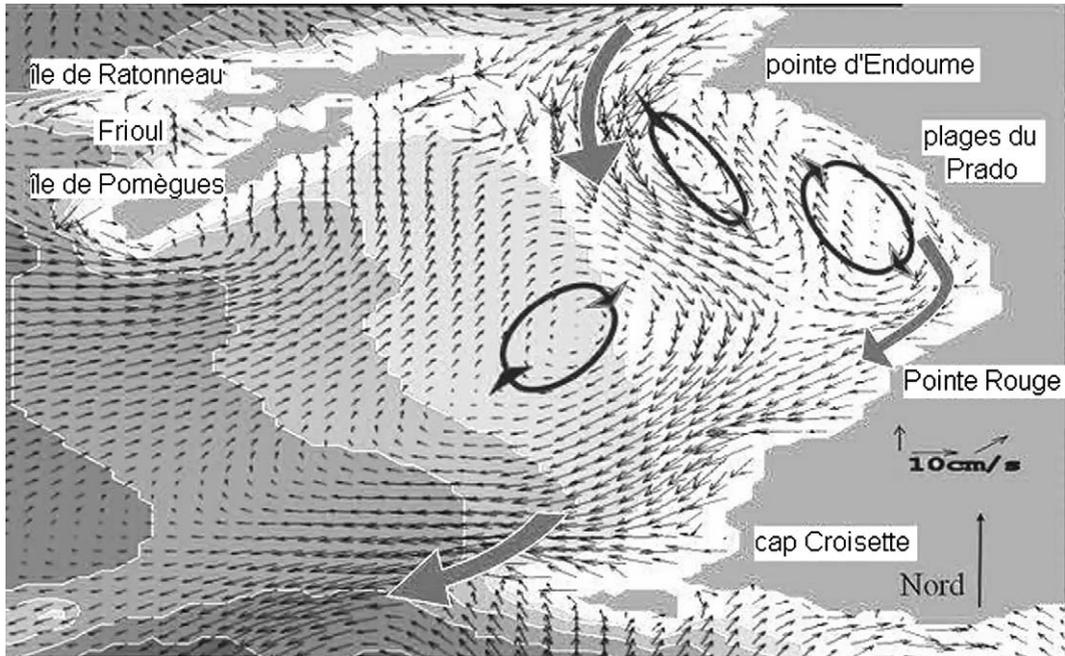


Fig. 5. Carte des courants de fond induits par un vent de NW $320^\circ - 10 \text{ m s}^{-1}$.

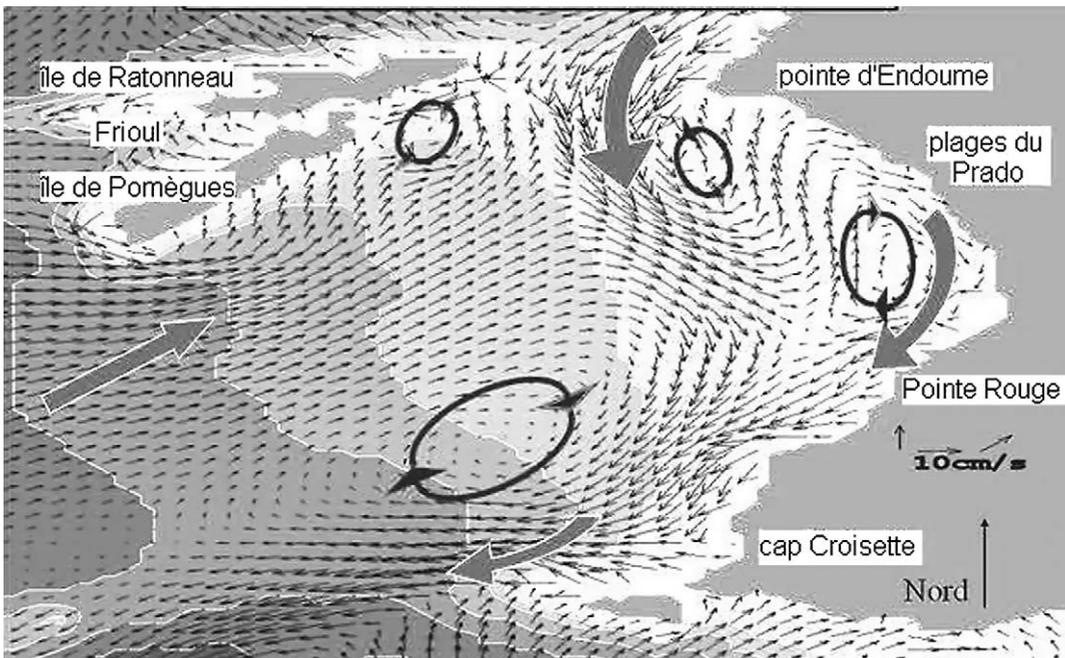


Fig. 6. Carte des courants de fond induits par un vent de NW $340^\circ - 10 \text{ m s}^{-1}$.

de SE 120° , SE 160° et SE 140° respectivement, à partir de trois points source situés : au niveau des enrochements coralligènes de la côte sud de l'archipel du Frioul (station 1), dans la partie nord de l'herbier de posidonies situé au large des plages du Prado (station 2), au niveau de la zone d'immersion des récifs artificiels (station R).

Chaque trajectoire correspond au tracé suivi par une particule émise par rejet instantané au niveau de chaque station considérée et sur une durée cumulée de 3 jours.

Dans le cas d'un vent de SE 120° (Fig. 9), les particules émises à la station 1 (Frioul) sont entraînées vers le sud-est à travers la baie vers les plages du Prado,

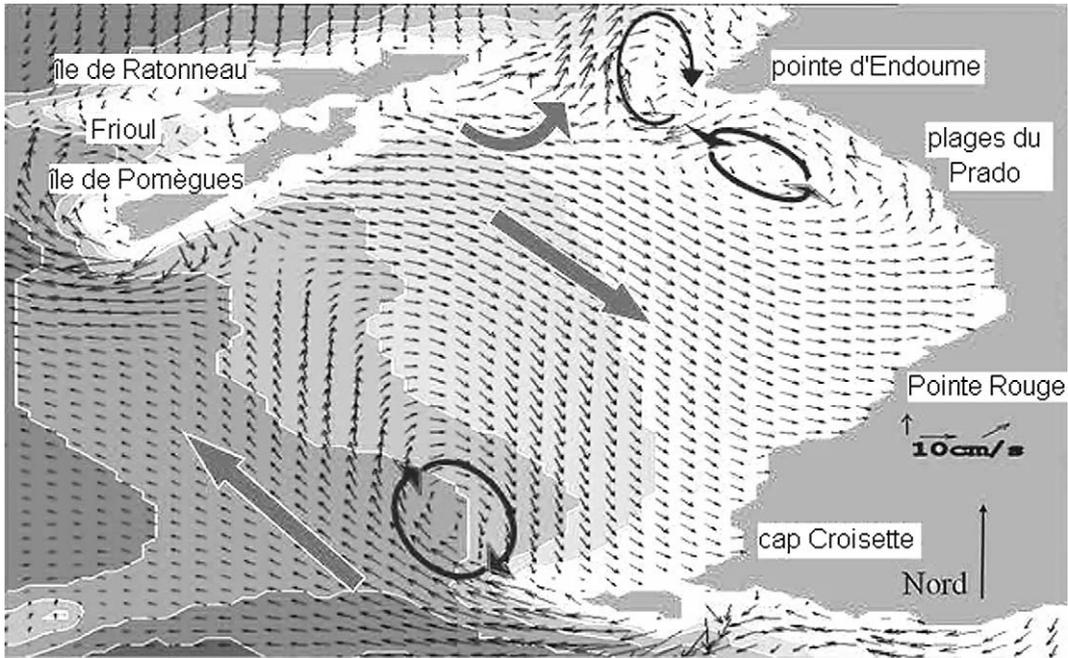


Fig. 7. Carte des courants de fond induits par un vent de SE $120^\circ - 10 \text{ m s}^{-1}$.

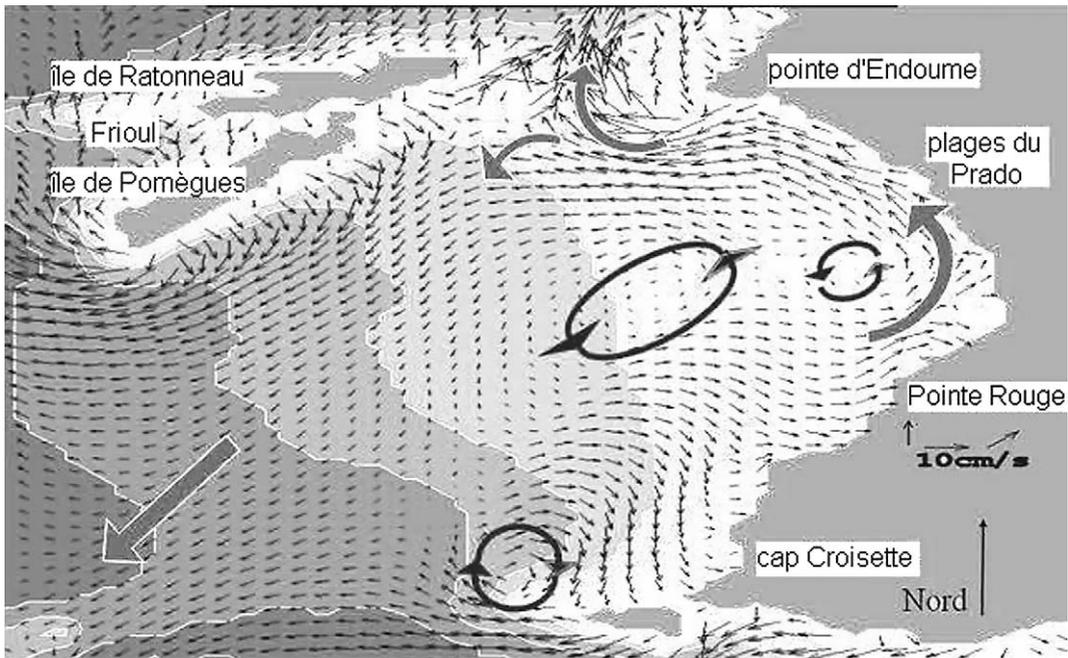


Fig. 8. Carte des courants de fond induits par un vent de SE $160^\circ - 10 \text{ m s}^{-1}$.

en traversant la partie sud de la zone d'immersion des récifs, ce qui met en évidence une connexion hydrodynamique potentielle pour la colonisation et le fonctionnement des structures artificielles. Les particules émises à la station 2 (herbier) sont entraînées de manière assez spectaculaire dans un gyre localisé au sud de la pointe

d'Endoume (au voisinage du fond) et qui augmente le temps de résidence de ces particules dans cette région, qui est toutefois limitrophe de la zone des récifs artificiels, dont deux villages peuvent être concernés. Les résultats montrent en outre que toute particule qui ne se serait pas déposée au cours de son tracé giratoire se trou-

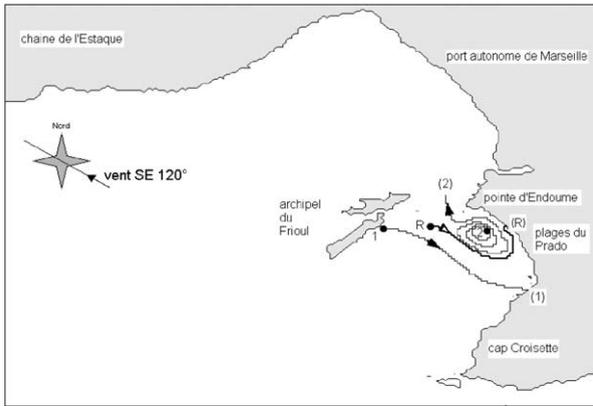


Fig. 9. Trajectoires des particules émises sur le fond sous un vent de SE $120^\circ - 10 \text{ m s}^{-1}$. R et (R) : points de départ et d'arrivée des particules émises au niveau des récifs, 1 et (1) : points de départ et d'arrivée des particules émises à l'est du Frioul, 2 et (2) : points de départ et d'arrivée des particules émises au niveau de l'herbier de posidonies du Prado.

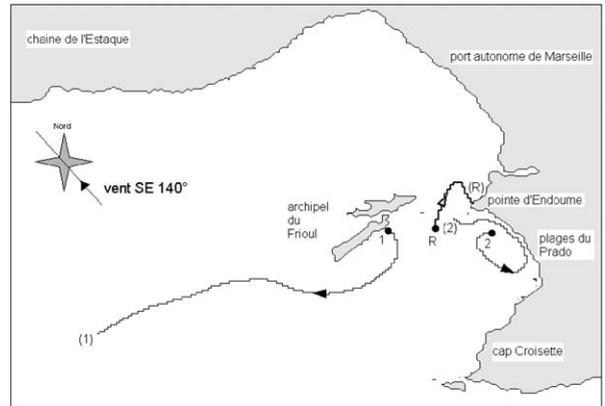


Fig. 11. Trajectoires des particules émises sur le fond sous un vent de SE $140^\circ - 10 \text{ m s}^{-1}$. R et (R) : points de départ et d'arrivée des particules émises au niveau des récifs, 1 et (1) : points de départ et d'arrivée des particules émises à l'est du Frioul, 2 et (2) : points de départ et d'arrivée des particules émises au niveau de l'herbier de posidonies du Prado.

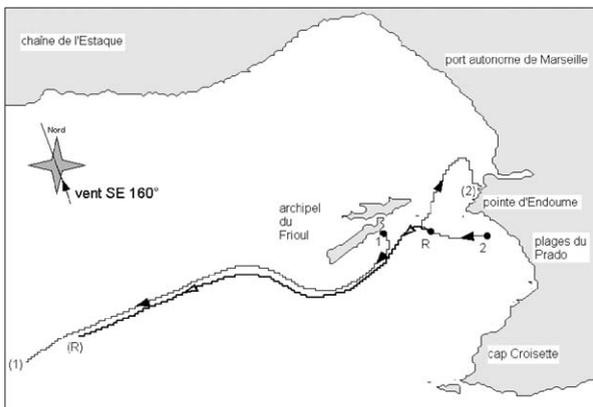


Fig. 10. Trajectoires des particules émises sur le fond sous un vent de SE $160^\circ - 10 \text{ m s}^{-1}$. R et (R) : points de départ et d'arrivée des particules émises au niveau des récifs, 1 et (1) : points de départ et d'arrivée des particules émises à l'est du Frioul, 2 et (2) : points de départ et d'arrivée des particules émises au niveau de l'herbier de posidonies du Prado.

verait transportée au-delà de la passe d'Endoume vers la baie nord de Marseille. Les particules émises à la station R (récifs) sont entraînées également vers le sud-est pour atteindre la côte au nord des plages du Prado en traversant la zone d'herbier, qui peut être bénéficiaire de cette influence en provenance des récifs.

Dans le cas d'un vent de SE 160° (Fig. 10), les particules émises à la station 1 (Frioul) sont entraînées vers le sud-ouest, au large, et ne peuvent donc pas participer au fonctionnement des récifs artificiels. Au contraire, les particules émises à la station 2 (herbier) sont également entraînées vers l'ouest en direction de l'archipel du Frioul, puis du large, mais traversent la partie sud

de la zone d'immersion des récifs, ce qui met en évidence ici encore une connexion hydrodynamique potentielle pour la colonisation et le fonctionnement des structures artificielles. Les particules émises à la station R (récifs) sont entraînées directement vers la baie nord pour atteindre les enrochements de la côte au nord de la pointe d'Endoume, susceptibles de bénéficier de cette influence en provenance des récifs.

Enfin, dans le cas hypothétique d'un vent de SE 140° (Fig. 11), les particules émises à la station 1 (Frioul) seraient entraînées à nouveau vers le sud-ouest, au large, comme par un vent de SE 160° , sans influence possible sur les récifs. Les particules émises à la station 2 (herbier) seraient quant à elles entraînées dans un gyre, comme par un vent de SE 120° , mais en restant confinées au niveau de l'herbier et en étant beaucoup plus rapidement entraînées vers la baie nord, sans influence notable sur les récifs. Les particules émises à la station R (récifs) seraient entraînées directement vers la baie nord pour atteindre les enrochements au nord de la pointe d'Endoume, comme par un vent de SE 160° .

Il est intéressant d'évaluer, à la vue de ces derniers résultats, induits par un secteur de vent inexistant sur le site d'étude (SE 140°), les erreurs d'interprétation qui pourraient être commises si, au lieu de décomposer le secteur SE en ses deux directions réellement observées SE 120° et SE 160° , il avait été choisi de se contenter de leur seule direction moyenne SE 140° , irréaliste localement, mais confirmée par les enregistrements effectués à station météorologique distante de Marignane.

En effet, les trajectoires issues des stations 1 (Frioul) et R (récifs) considérées par un vent de SE 140°

(Fig. 11), sont semblables à celles obtenues par un vent de SE 160° (sud-ouest et nord respectivement), mais radicalement différentes de celles obtenues par un vent de SE 120° (sud-est). Inversement, les trajectoires issues de la station 2 (herbier) considérée par un vent de SE 140°, sont semblables à celles obtenues par un vent de SE 120° (gyre, puis nord), mais radicalement différentes de celles obtenues par un vent de SE 160° (ouest, puis sud-ouest). Ainsi, les résultats montrent que l'erreur faite en choisissant de décrire les effets des vents de secteur SE par le seul secteur moyen de SE 140° conduirait à ne décrire que la moitié de l'information sur la sensibilité de la circulation à la variabilité des vents de secteur SE dans cette région de la baie sud de Marseille.

4. Conclusion

Cette étude présente un exemple d'utilisation d'un outil de modélisation numérique 3D du fonctionnement hydrodynamique d'une zone côtière faisant l'objet d'un projet d'immersion de récifs artificiels.

D'une part, les champs de courant ont permis de souligner la variabilité spatiotemporelle de l'hydrodynamisme de la baie sud, puisque les simulations confirment que d'un régime de vent à l'autre, la circulation des masses d'eau peut s'inverser, les gyres se déplacer et leurs sens de rotation s'opposer, les écoulements verticaux (*upwelling/downwelling*) s'inverser.

D'autre part, les tracés des trajectoires ont permis de mettre en évidence la sensibilité au vent des trajectoires des particules et organismes dérivant dans la baie sud de Marseille et de montrer quelques exemples de la façon dont une même zonation écologique pouvait successivement, en fonction du régime des vents, contribuer ou non au succès du fonctionnement des récifs artificiels et se comporter comme une source ou une cible vis-à-vis de ces structures immergées.

De plus, il ressort de ces cartes de trajectoires que la zone d'immersion des récifs elle-même ne devait pas être considérée comme homogène, mais que chaque « village » constitutif de cette zone de récifs était susceptible de recevoir des influences différentes en provenance du reste de la baie, selon leur localisation et le régime des vents.

Enfin, la comparaison des régimes des vents observés à deux stations séparées d'une vingtaine de kilomètres a confirmé la sensibilité du vent à la topographie et l'orographie locale. Ainsi, le choix des secteurs du vent à prendre en compte dans toute étude située dans un tel site côtier mérite d'être arrêté avec beaucoup

d'attention. En effet, nos résultats montrent l'erreur qui pourrait être commise en prenant en compte une direction moyenne de vent (SE 140° par exemple dans notre étude), évidente au regard de la station météorologique distante (Marignane), mais inexistante au regard d'enregistrements effectués sur site (station de Pomègues par exemple dans notre étude).

Il est fort probable que cette mise en garde puisse s'appliquer à beaucoup d'autres régions de la rade de Marseille et à tout autre site côtier, et qu'elle doive contribuer désormais à affiner l'expertise environnementale associée aux futures études côtières.

Remerciements

Nous remercions le conseil régional Provence–Alpes–Côte d'Azur, qui a intégralement financé ce travail, et la ville de Marseille, pour son soutien tout au long de l'étude.

Références

- [1] S. Sartoretto, B. Caillard, D. Collard, P. Francour, M. Bourcier, E. Guyot, S. Devanne, P. Serantoni, Opération « Récifs Prado 2006 » : Études état zéro du milieu. Lot 3 : peuplements biologiques et exploitation halieutique. Marché n° 02/248 ville de Marseille–Safège CETIIS, 2002.
- [2] P. Lefevre, H.-J. Ceccaldi, E. Delort, D. Marty, Optimisation des récifs artificiels de la baie du Prado : définition des espèces cibles, structures et formes efficaces améliorations des matériaux et des coûts, contrat ville de Marseille, direction de l'Environnement et des Déchets & HydroM Environnement, 2000.
- [3] G. Bernard, P. Bonhomme, E. Charbonnel, Valorisation de la baie Sud de Marseille – Aménagements en récifs artificiels de la baie du Prado, contrat ville de Marseille, direction de l'Environnement et des Déchets & GIS Posidonies, GIS Posidonies Publ., Marseille, 1999.
- [4] A. Abelson, M. Denny, Settlement of marine organisms in flow, *Annu. Rev. Ecol. Syst.* 28 (1997) 317–339.
- [5] L. Xie, D.B. Eggleston, Computer simulations of wind induced estuarine circulation patterns and estuary-shelf exchange processes: the potential role of wind forcing on larval transport, *Estuarine Coastal Shelf Sci.* 49 (1999) 221–234.
- [6] Y.P. Sheng, Physical characteristics and engineering at reef sites, in: W. Seaman (Ed.), *Artificial reef evaluation: with application to natural marine habitat*, CRC Press LLC, 2000, pp. 51–94.
- [7] C. Castelbon, Étude de la circulation des masses d'eau dans le golfe de Marseille, *Tethys* 4 (1972) 269–312.
- [8] SHOM, Carte 6767 au 1/50 000^e, 1981.
- [9] A.F. Blumberg, G.L. Mellor, A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model, in: N. Heaps (Ed.), *Three-Dimensional Coastal Ocean Models*, American Geophysical Union, 1987.
- [10] G.L. Mellor, User's guide for a three-dimensional, primitive equation, numerical ocean model, in: *Prog. Atmos. Ocean. Sci.*, Princeton University, NJ, États-Unis, 1992.