

NOTE EXPLICATIVE 02 : RAPPORT RELATIF A L'ETUDE
DE COURANTOLOGIE ET DE SEDIMENTATION
PHASE DIAG - JUIN 2021

ANSE DU PHARO - MARSEILLE
Maîtrise d'œuvre pour l'opération création d'un village d'entreprises nautiques
SOLEAM

ARTELIA - PANORAMA ARCHITECTURE





PERSPECTIVE AÉRIENNE



Création d'un village d'entreprises nautiques à l'anse du Pharo

Mission de Maîtrise d'Œuvre - Phase d'études de diagnostic

RAPPORT RELATIF A L'ETUDE DE COURANTOLOGIE ET DE SEDIMENTATION



Création d'un village d'entreprises nautiques à l'anse du Pharo

Mission de Maîtrise d'Œuvre - Phase d'études de diagnostic

Société Locale d'équipement et d'aménagement de l'aire métropolitaine

RAPPORT RELATIF A L'ETUDE DE COURANTOLOGIE ET DE SEDIMENTATION

VERSION	DESCRIPTION	ÉTABLI PAR	VÉRIFIÉ PAR	APPROUVÉ PAR	DATE
Rev 0	Première émission	D. Le Bris F. Gandilhon	L. Guisier	A. Goupil	04/06/2021

ARTELIA Eau & Afrique, Moyen-Orient
6 rue de Lorraine, 38130 Echirolles, France – TEL + 33 (0) 4 76 33 40 00

SOMMAIRE

CONTEXTE ET OBJET DU DOCUMENT	6
SYNTHÈSE ET CONCLUSIONS	7
A. PRESENTATION DU SITE D'ETUDE	8
1. L'ANSE DU PHARO.....	9
1.1. Situation générale	9
1.2. Le plan de masse actuellement envisagé	9
2. CONTEXTE OCÉANO-MÉTÉOROLOGIQUE	11
3. SCÉNARIOS D'ANALYSE	13
3.1. Scénario « Mistral ».....	13
3.2. Scénario « Marin »	14
3.3. Scénario « Calme ».....	15
B. PRESENTATION DU MODELE NUMERIQUE	16
1. SYSTÈME DE MODÉLISATION	17
2. DESCRIPTION DU MODÈLE.....	18
2.1. Emprise et bathymétrie.....	18
2.2. Maillage	20
2.3. Conditions aux limites	21
C. EXPERTISE SEDIMENTAIRE	22
1. INTRODUCTION.....	23
2. CONTEXTE SÉDIMENTAIRE.....	24
2.1. Nature du littoral	24
2.2. Caractéristiques des fonds marins	24
2.2.1. Nature et origine des fonds marins aux environs du site	24
2.2.2. Prélèvements de sédiment dans l'anse du Pharo	25
2.2.3. Matières en suspension (MES).....	29

3.	EVOLUTION DU TRAIT DE COTE	30
4.	MOUVEMENTS SÉDIMENTAIRES	32
4.1.	Généralités	32
4.2.	Dynamique dans la rade de Marseille	32
5.	RISQUES D'ÉROSION ET DE DÉPOT DANS L'ANSE DU PHARO	37
5.1.	Impact de l'aménagement sur les courants	37
5.1.1.	Condition de Mistral	37
5.1.2.	Condition de Marin	39
5.1.3.	Temps calme	41
5.2.	Mise en mouvements des sédiments a l'interieur de l'Anse dans sa configuration future	43
6.	CONCLUSIONS	46
D.	ETUDE DU RENOUVELLEMENT D'EAU	47
1.	MÉTHODOLOGIE	48
1.1.	Théorie	48
1.2.	Application à l'anse du Pharo	48
2.	EXPLOITATION DU MODÈLE	49
3.	RÉSULTATS DES SIMULATIONS	50
3.1.	Condition de Mistral	50
3.2.	Condition de Marin	53
3.3.	Temps calme	55
3.4.	Conclusion	57
	REFERENCES	58

TABLEAUX

Tableau 1 – Répartition granulométrique des échantillons de sédiments prélevés	27
Tableau 2 – Diamètre médian des échantillons de sédiments prélevés	28
Tableau 3 – Récapitulatif des temps de renouvellement pour chaque scénario	57

FIGURES

Figure 1 – Bathymétrie actuelle dans l'anse du Pharo	9
Figure 2 – Vue en plan à but illustratif du plan de masse envisagé	10
Figure 3 - Modélisation du plan de masse et des aménagements envisagés	10

Figure 4 – Analyse des données de vent (1996-2010) - Série temporelle (en haut), rose des vents (milieu) et corrélogramme intensité/direction (en bas).....	12
Figure 5 - Conditions de vent (en haut) et de houle (en bas) – Scénario « Mistral ».....	13
Figure 6 - Conditions de vent (en haut) et de houle (en bas) – Scénario « Marin »	14
Figure 7 - Conditions de vent (en haut) et de houle (en bas) – Scénario « Calme »	15
Figure 8 - Emprise du modèle numérique	18
Figure 9 – Bathymétrie du modèle global et zoom sur l’entrée Sud du port de Marseille	19
Figure 10 – Bathymétrie actuelle dans l’anse du Pharo	19
Figure 11 – Bathymétrie projet dans l’anse du Pharo	19
Figure 12 - Maillage du modèle global et zoom sur l’entrée Sud du port de Marseille	20
Figure 13 – Maillage de l’anse du Pharo – Configuration actuelle	20
Figure 14 - Maillage de l’anse du Pharo – Configuration aménagée.....	20
Figure 15 – Nature du littoral (Source : Ministère en charge de l’Environnement).....	24
Figure 16 – Nature des fonds – Carte au 1/50 000 (Source : SHOM).....	25
Figure 17 – Localisation des prélèvements de sédiments – Mars 2021	26
Figure 18 – Répartition granulométrique des échantillons de sédiments prélevés	27
Figure 19 – Répartition des diamètres médians des échantillons de sédiments prélevés	28
Figure 20 – Type de sédiment sur la plage – Visite du 14 janvier 2021 (ARTELIA).....	29
Figure 21 – Evolution de la MES entre mai 2019 et avril 2021 – Surface (en haut) et Fond (en bas).....	29
Figure 22 – Evolution du trait de côte (Source : Ministère en charge de l’Environnement)	30
Figure 23 – Vue aérienne et trait de côte (source : Google Earth)	31
Figure 24 – Roses de houle au large de Marseille	33
Figure 25 – Cartographies du champ de houle (vue globale à droite, zooms sur l’entrée Sud du port et l’anse du Pharo à gauche) – Houle de Sud-Est	34
Figure 26 – Cartographies du champ de courant associé à une houle de Sud-Ouest et un vent de Sud-Est.....	34
Figure 27 – Cartographies du champ de houle (vue globale à droite, zooms sur l’entrée Sud du port et l’anse du Pharo à gauche) – Houle d’Ouest.....	35
Figure 28 – Cartographies du champ de courant associé à une houle d’Ouest et un vent de Nord-Ouest.....	36
Figure 29 – Série temporelle du vent et présentation des temps d’extraction des cartes de courant (en vert)	37
Figure 30 – Cartographies des champs de courant à différents instants – Condition de Mistral (état actuel à gauche, état projet à droite)	38
Figure 31 – Série temporelle du vent et présentation des temps d’extraction des cartes de courant (en vert)	39
Figure 32 – Cartographies des champs de courant à différents instants – Condition de Marin (état actuel à gauche, état projet à droite).....	40
Figure 33 – Série temporelle du vent et présentation des temps d’extraction des cartes de courant (en vert)	41
Figure 34 – Cartographies des champs de courant à différents instants – Temps calme (état actuel à gauche, état projet à droite).....	42
Figure 35 – Vitesse de cisaillement maximale.....	44
Figure 36 – Temps de dépassement de la vitesse de cisaillement pour les 2 seuils de mise en mouvement (D50 entre 300 et 500 μm à gauche et D50 entre 650 et 700 μm à droite– Scénario « Mistral ».....	45
Figure 37 – Temps de dépassement de la vitesse de cisaillement pour les 2 seuils de mise en mouvement (D50 entre 300 et 500 μm à gauche et D50 entre 650 et 700 μm à droite– Scénario « Marin »	45
Figure 38 – Temps de dépassement de la vitesse de cisaillement pour les 2 seuils de mise en mouvement (D50 entre 300 et 500 μm à gauche et D50 entre 650 et 700 μm à droite– Scénario « Calme »	45
Figure 39 – Limite d’imposition du traceur passif	48
Figure 40 – Cartographies du taux de renouvellement à différents instants – Condition de Mistral (état actuel à gauche, état projet à droite)	50
Figure 41 – Evolution temporelle du taux de renouvellement moyen dans l’anse – Scénario « Mistral » ..	51
Figure 42 – Temps de renouvellement à 63% (à gauche) et à 95% (à droite) – Condition de Mistral.....	52
Figure 43 – Cartographies du taux de renouvellement à différents instants – Condition de Marin (état actuel à gauche, état projet à droite)	53
Figure 44 – Evolution temporelle du taux de renouvellement moyen dans l’anse – Condition de Marin ..	54
Figure 45 – Temps de renouvellement à 63% (à gauche) et à 95% (à droite) – Condition de Marin	54

Figure 46 – Cartographies du taux de renouvellement à différents instants – Temps calme (état actuel à gauche, état projet à droite).....	55
Figure 47 – Evolution temporelle du taux de renouvellement moyen dans l'anse – Temps calme	56
Figure 48 – Cartes du temps de renouvellement à 63% (à gauche) et à 95% (à droite) – Temps calme	56

CONTEXTE ET OBJET DU DOCUMENT

La SOLEAM (Société Locale d'Équipement et d'Aménagement de l'aire Métropolitaine) souhaite créer un village d'entreprises nautiques dans l'anse du Pharo à Marseille, sur un site où historiquement plusieurs chantiers navals ont été implantés par le passé. Ce projet prévoit la construction de bâtiments, de terre-pleins incluant une zone de carénage, ainsi que pour le volet maritime l'aménagement de deux digues, d'un môle de grutage, l'implantation de pontons flottants et la réalisation de travaux de dragage permettant l'accès nautiques des navires à destination des entreprises du site.

La réalisation de la Maîtrise d'Œuvre du Projet a été confié au groupement ARTELIA - PANORAMA ARCHITECTURE. Dans ce contexte, ARTELIA a notamment à mener plusieurs études et reconnaissances durant la phase dite de diagnostics actuellement en cours. C'est dans le cadre de cette phase que s'inscrit l'étude décrite dans le présent rapport et dont l'objectif est de caractériser la courantologie du site.

De manière plus spécifique, ce rapport présente les résultats de l'expertise hydro-sédimentaire préliminaire et l'examen du renouvellement d'eau à l'intérieur de l'anse. Ce travail est basé sur un modèle de courantologie développé spécifiquement. Ce modèle permet d'établir des cartographies de courants, de contraintes de cisaillement et d'évolution du taux de renouvellement.

Le rapport s'articule ainsi :

- Présentation du site et du contexte océano-météorologique ;
- Description du modèle de courantologie ;
- Expertise hydrosédimentaire. Cette dernière vise à estimer de manière qualitative la propension du plan d'eau, en configuration aménagée, à voir certaines zones s'éroder ou à être l'objet de dépôts de sédiments ;
- Etude du renouvellement d'eau qui permet d'estimer, en fonction des conditions océano-météorologiques, le temps de renouvellement de l'eau de l'anse dans sa configuration future et ainsi d'avoir un avis quant aux éventuels risques de stagnation voire d'eutrophisation du plan d'eau.

SYNTHESE ET CONCLUSIONS

Sur la base de l'analyse du contexte océano-météorologique du site, 3 situations représentatives des conditions de houles et de vent sont retenues dans le cadre de la présente étude :

- Une condition de Mistral ;
- Une condition de Marin ;
- Une période de temps calme (vitesse du vent inférieure à 3 m/s).

Des modélisations dédiées de courantologie basées sur le système TELEMAC ont été réalisées pour chacune de ces situations. Ces simulations, associées à une expertise menée sur la base de la bibliographie disponible permettent de dégager les conclusions suivantes concernant le contexte hydro-sédimentaire du site et du projet d'aménagement :

- Le trait de côte ne semble pas subir d'évolution notable ;
- Aucune sédimentation contraignante de l'intérieur de l'anse n'est attendue ;
- Des survitesses autour des futurs ouvrages portuaires seraient présentes ponctuellement (à l'extérieur de l'Anse, le long des digues de protection) et pourraient générer potentiellement des zones d'affouillement. Néanmoins, ce risque d'éventuels affouillements sera limité du fait de la présence de la butée de pied de l'ouvrage de protection ;

Concernant le sujet du renouvellement d'eau dans le nouveau bassin, il ressort les principales conclusions suivantes :

- Dans la configuration actuelle de l'anse, le renouvellement des eaux est très bon (le temps de renouvellement complet est inférieur à 1 jour) quelles que soient les conditions hydro-météorologiques. En effet l'entrée de l'anse est suffisamment large pour permettre une bonne circulation des eaux ;
- Le projet d'aménagement et les deux digues qui vont être construites à l'entrée de l'anse réduisent les échanges entre l'anse et l'avant-port. Pour l'état projet le renouvellement des eaux est alors plus dépendant des conditions hydro-météorologiques. Le renouvellement des eaux est meilleur sur des périodes de vent relativement fort que pour un temps calme.
- Dans l'état projet, le renouvellement des eaux peut être considéré comme homogène sur l'anse, il n'existe pas de zone d'eau stagnante ;
- Au final, en présence des aménagements envisagés (état projet), le renouvellement en eau de l'Anse du Pharo peut être considéré comme satisfaisant.

A. PRESENTATION DU SITE D'ETUDE

1. L'ANSE DU PHARO

1.1. SITUATION GENERALE

L'Anse du Pharo est située dans la zone sud de la rade de Marseille, en contrebas de la pointe du Pharo et à proximité de l'entrée du Vieux Port de Marseille.

L'entrée de l'anse est orientée en direction du Nord. Par conséquent, elle est exposée davantage au vent du secteur Nord/Nord-Ouest (Mistral) qu'au Marin (secteur Sud-Est).

Concernant les houles du large, l'anse est essentiellement exposée aux houles d'Ouest. En effet, elle est relativement protégée des houles du secteur Sud-Ouest et Sud-Est par la digue des Catalans et par la présence des îles du Frioul plus au large. Les houles de Nord-Ouest, peu fréquentes, sont atténuées par la présence de la digue Sainte Marie située à environ 300 m au Nord de l'entrée de l'anse.

Les fonds évoluent avec une pente régulière entre -6 m IGN69 à l'entrée de l'anse et 0 m IGN 69 au fond de l'anse. Il est à noter la présence d'une zone découvrante à l'Est de l'anse avec des fonds supérieurs à 0 m IGN69 (Figure 1).

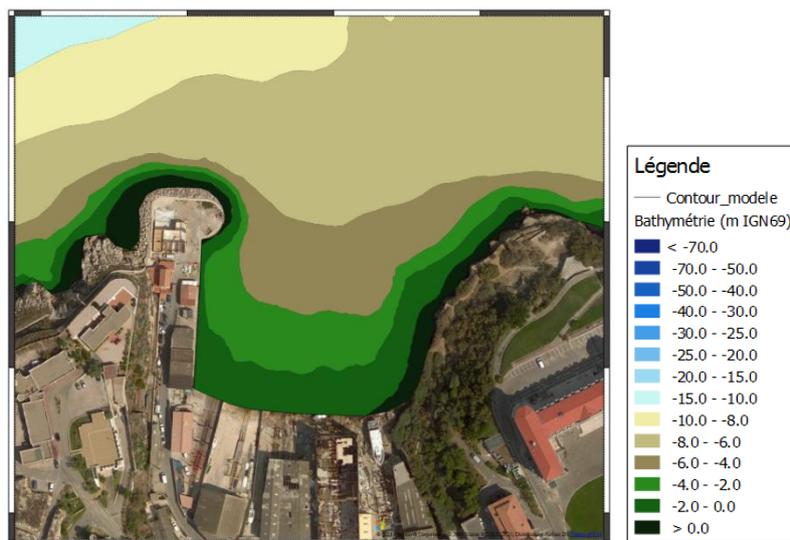


Figure 1 – Bathymétrie actuelle dans l'anse du Pharo

1.2. LE PLAN DE MASSE ACTUELLEMENT ENVISAGE

La Figure 2 ci-dessous présente une vue à but illustratif des aménagements projetés à ce stade. On peut ainsi y voir que les aménagements maritimes envisagés consistent en :

- Deux digues de protection visant à limiter l'agitation à l'intérieur du nouveau bassin ;
- Un môle de grutage situé sur la partie sud du plan d'eau, qui permettra le levage de bateaux jusqu'à 18 m de longueur et ensuite la manutention vers le terre-plein et l'aire de carénage adjacents ;
- Au nord et dans le prolongement de ce môle de grutage, une première panne flottante sera implantée, qui sera dédiée à l'accueil des bateaux de longueur comprise entre 12 et 16 m ;

- Sur la partie Est du site, une seconde panne flottante permettra d'accueillir des bateaux de 8 à 12 m de longueur.



Figure 2 – Vue en plan à but illustratif du plan de masse envisagé

Il est par ailleurs à noter que sur toute la partie ouest du plan d'eau, aucun aménagement n'est programmé. En effet, il est prévu que l'activité des chantiers actuellement sur le site (et qui implique notamment l'utilisation des deux slipways encore en service et schématisés sur la figure ci-dessus) soit maintenue dans le cadre du projet d'aménagement de l'Anse.

La figure suivante présente une vue des aménagements modélisés avec la bathymétrie utilisée. Le modèle mis en œuvre intègre notamment une zone draguée à la cote -3,50 m NGF sur la partie sud-est de l'anse ainsi qu'une passe d'entrée de 25 m de large environ.

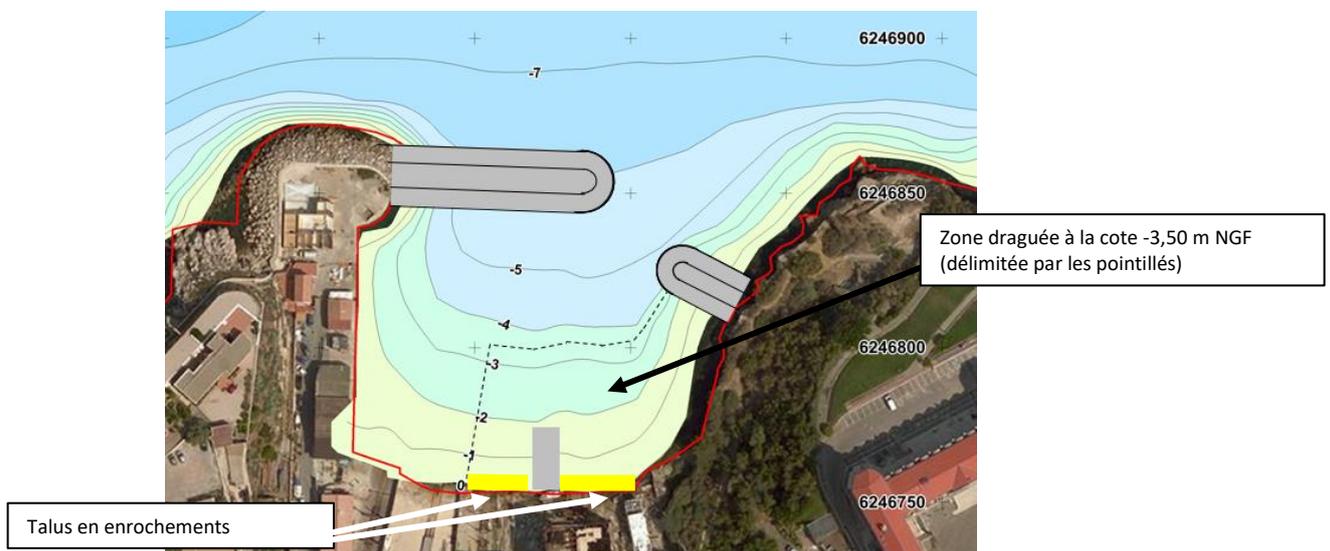


Figure 3 - Modélisation du plan de masse et des aménagements envisagés

Quelques légers ajustements concernant ces aménagements (notamment en termes d'emprise de la zone draguée et de la cote associée) seront sans doute réalisés dans le cours du projet (lors d'étapes ultérieures de conception).

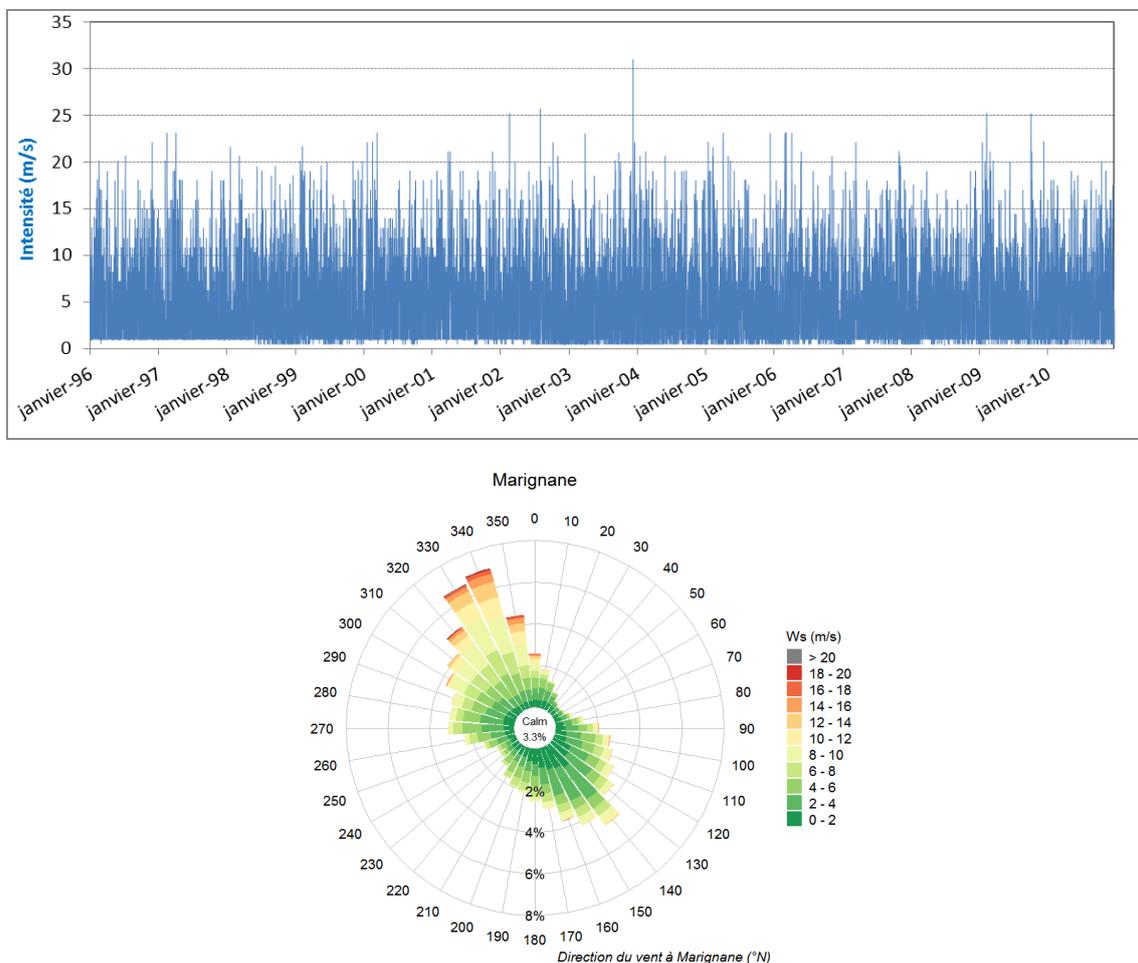
2. CONTEXTE OCEANO-METEOROLOGIQUE

Cette section présente les conditions hydrodynamiques représentatives du site.

La circulation hydraulique dans la rade de Marseille et dans l'anse du Pharo est principalement liée à l'action du vent sur la masse d'eau. L'effet de la houle peut se faire sentir près des côtes où le déferlement des vagues génère un courant littoral. La sélection des scénarios représentatifs se base donc sur l'analyse des vents présents dans la zone d'étude.

La chronique de vent analysée est issue de mesures à l'aéroport de Marignane de janvier 1996 à décembre 2010. Ces mesures de vent sont des valeurs relatives à une hauteur de 10 m et moyennées sur une durée de 10 minutes. Les rafales (vitesses pouvant dépasser très largement la valeur moyenne sur 10 minutes) n'apparaissent donc pas sur ces mesures, mais sont bien réelles.

La Figure 4 montre la série temporelle de l'intensité du vent sur toute la période (en haut), la rose des vents (au milieu) et le corrélogramme intensité du vent/direction du vent (en bas) issus de l'analyse de la série temporelle.



		Direction du vent												Total
		0 - 30	30 - 60	60 - 90	90 - 120	120 - 150	150 - 180	180 - 210	210 - 240	240 - 270	270 - 300	300 - 330	330 - 360	
Vitesse du vent (m/s)	[0 - 3[	1.9%	1.5%	1.5%	2.6%	5.4%	6.2%	3.0%	1.8%	1.7%	3.1%	2.5%	1.8%	33.1%
	[3 - 6[	2.5%	0.8%	0.8%	2.9%	3.3%	3.0%	2.3%	2.1%	1.8%	4.4%	3.5%	4.1%	31.3%
	[6 - 9[	1.3%	0.1%	0.3%	1.7%	1.9%	2.1%	1.7%	0.8%	0.9%	1.7%	3.7%	5.9%	21.9%
	[9 - 12[	0.6%	0.0%	0.1%	0.5%	0.5%	0.5%	0.1%	0.0%	0.1%	0.3%	1.6%	4.3%	8.6%
	[12 - 15[	0.3%	0.0%	0.0%	0.1%	0.1%	0.1%	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%	0.4%	2.6%	3.6%
	[15 - 18[	0.1%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%	0.8%	1.0%
	[18 - 21[	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.3%	0.4%
	[21 - 24[	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
	[24 - 30[	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
	Total	6.7%	2.4%	2.6%	7.7%	11.2%	11.8%	7.1%	4.7%	4.5%	9.5%	11.9%	19.8%	100.0%

Figure 4 – Analyse des données de vent (1996-2010) - Série temporelle (en haut), rose des vents (milieu) et corrélogramme intensité/direction (en bas)

L'analyse des figures précédentes met en évidence les points suivants :

- Il existe deux secteurs de vent dominants dans la zone d'étude :
 - les vents de secteur Nord-Ouest (de 270° à 30°), représentatifs d'une condition de Mistral. Leur pourcentage d'apparition est de 47,9% ;
 - les vents de secteur Sud-Est (de 90° à 210°) , représentatifs d'une condition de Marin. Leur pourcentage d'apparition est de 37,8%,
- Les vents de Mistral sont plus forts que les vents de Marin,
- La vitesse des vents est inférieure à 3 m/s environ un tiers du temps (33,1%).

3. SCENARIOS D'ANALYSE

A partir du contexte océano-météorologique et des analyses précédentes, les 3 conditions de vents suivantes sont envisagées pour l'examen du taux de renouvellement et de l'expertise sédimentologique :

- Une condition de Mistral ;
- Une condition de Marin ;
- Une période de temps calme (vitesse du vent inférieure à 3 m/s).

Trois chroniques réelles d'une dizaine de jours chacune et représentatives de ces trois conditions de vent ont été extraites afin de forcer le modèle. Les conditions de houle extraites aux mêmes dates au large du site et issues de l'étude d'agitation (Réf [1]) sont associées à ces conditions de vent. La simulation de ces trois chroniques permettra de représenter la majorité des conditions hydro-météorologiques existantes dans la zone d'étude.

3.1. SCENARIO « MISTRAL »

Ce scénario est illustré par les conditions du 6 au 16 mars 2010. La vitesse moyenne du vent sur cette période est de 5,2 m/s. Cette valeur est dépassée 50% du temps lors d'une condition de Mistral (vent compris entre N270° et N30°), les conditions de mistral représentant quant à elles 47,9% du temps toutes directions confondues. La vitesse maximale dans la chronique est de 13,4 m/s. Cette valeur est dépassée 3% du temps total soit environ 11 jours par an (toutes directions confondues). Les vitesses supérieures à 13,4 m/s ne sont pas présentes dans la chronique de vents car elles représentent des conditions extrêmes de vent. Ces dernières sont donc moins représentatives des conditions usuelles du site et elles sont plus favorables à un bon renouvellement des eaux.

Sur la même période, la hauteur significative moyenne de la houle au large est de 0,6 m, avec un maximum à 1,35 m atteint le 08/03/2010. Sur les deux premiers jours de simulation, la houle vient du Nord, puis du Sud-Est sur les deux jours suivants. Dans la suite du scénario, la houle vient de l'Ouest.

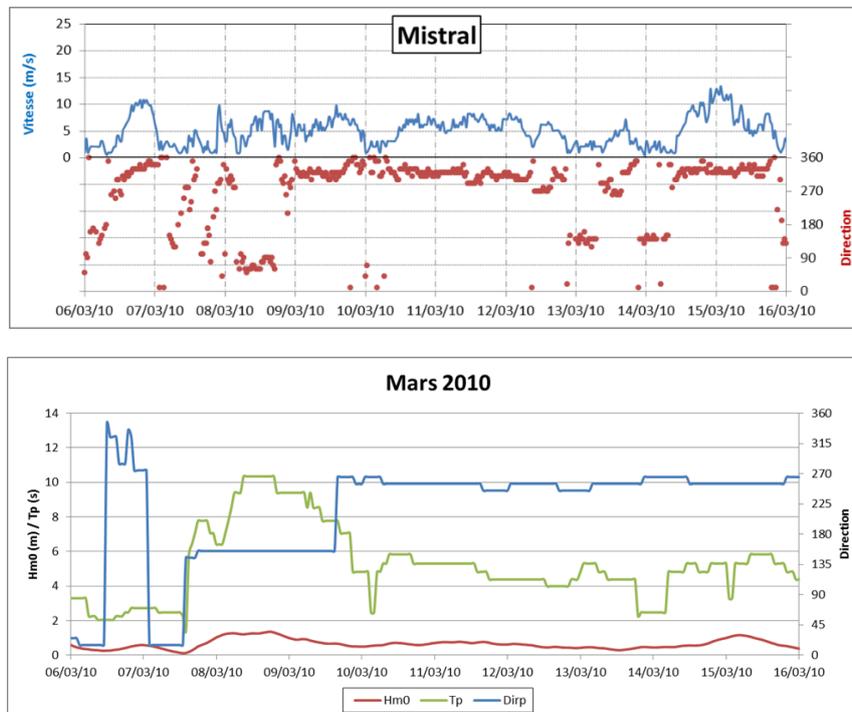


Figure 5 - Conditions de vent (en haut) et de houle (en bas) – Scénario « Mistral »

3.2. SCENARIO « MARIN »

Ce scénario illustre les conditions du 15 au 24 avril 1996. La vitesse moyenne du vent sur cette période est de 4,2 m/s. Cette valeur est dépassée 35% du temps lors d'une condition de Marin (vent compris entre N90° et N210°), les conditions de marin représentant quant à elles 37,8% du temps toutes directions confondues. La vitesse maximale dans la chronique est de 9,8 m/s. Cette valeur est dépassée 4% du temps des conditions de Sud-Est. Les vents sur cette chronique sont plus faibles (en moyenne et en valeur maximale) que pour la chronique de Mistral, ce qui est cohérent avec les observations sur la période globale.

Sur cette période, la hauteur significative moyenne de la houle est de 0,8 m, avec un maximum à 2 m atteint le 23/04/1996. Sur toute la période, la houle provient du secteur Sud-Ouest à Sud-Est (225° à 155°).

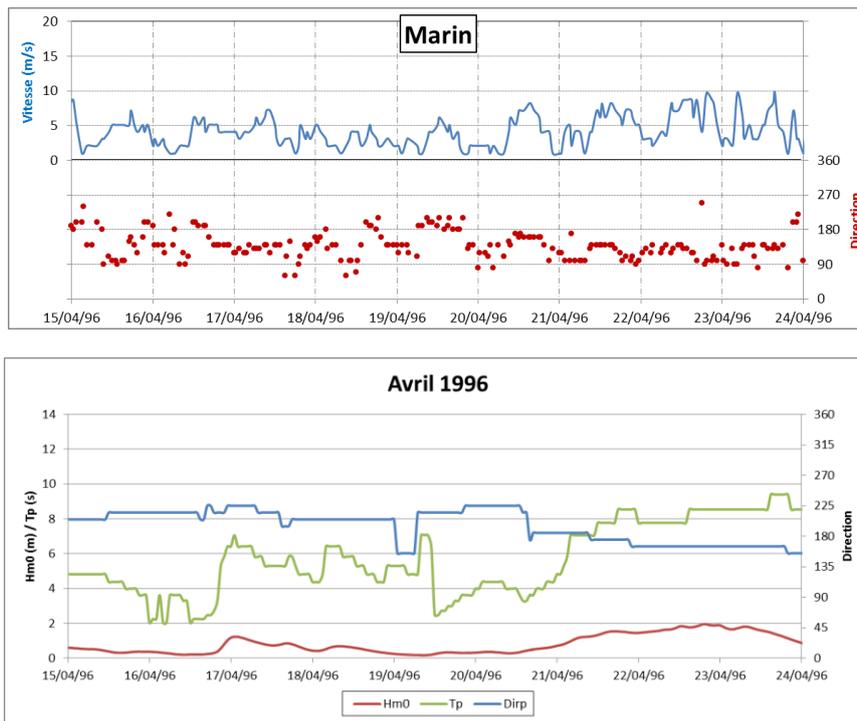
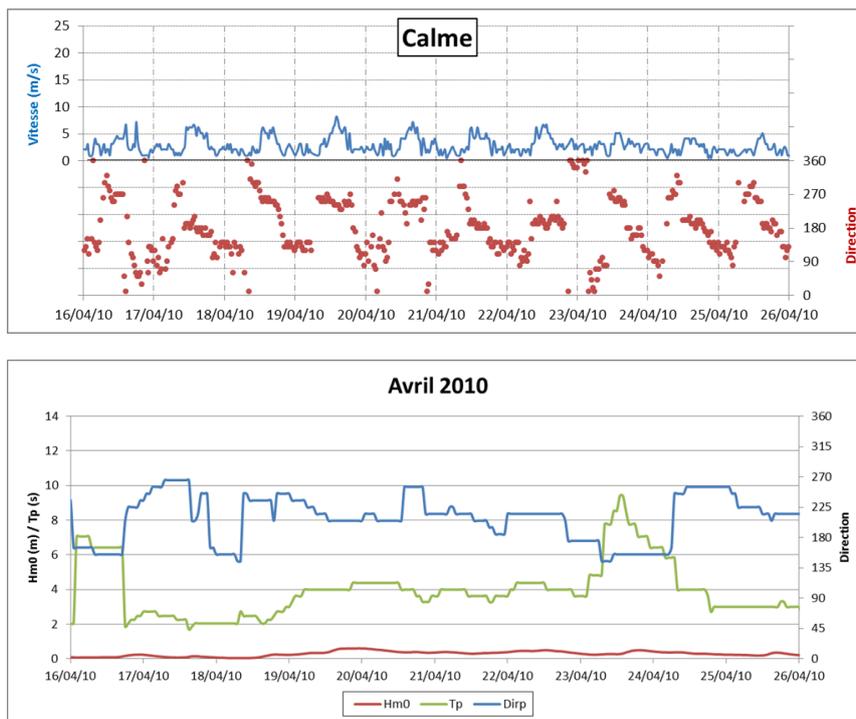


Figure 6 - Conditions de vent (en haut) et de houle (en bas) – Scénario « Marin »

3.3. SCENARIO « CALME »

Ce scénario (du 16 au 26 avril 2010) illustre des conditions de brise thermique avec des vents plus forts et venant du large (270°) en journée et qui faiblissent la nuit. La vitesse moyenne du vent sur cette période est de 2,9 m/s.

Sur cette période, la houle au large est aussi très faible avec une hauteur significative moyenne de 0,3 m et un maximum de 0,6 m. Elle provient des secteurs Ouest à Sud-Est (de 265° à 155°).



B. PRESENTATION DU MODELE NUMERIQUE

1. SYSTEME DE MODELISATION

Les modèles construits et exploités dans le cadre de cette étude sont basés sur le système TELEMAC, propriété d'EDF. En tant que membre du consortium de partenaires, ARTELIA contribue notamment au développement et à la diffusion du système disposant ainsi d'une maîtrise parfaite de l'outil (pour plus d'information, se référer au site <http://www.opentelemac.org>).

Dans le cadre de la présente étude, 2 modules sont plus particulièrement utilisés et présentés ci-après.

Le module TELEMAC-3D résout les équations tridimensionnelles (Navier-Stokes) pour de l'hydraulique à surface libre. Il calcule en tout point du maillage les champs de vitesse dans les trois directions, et la cote de la surface libre qui évolue spatialement et dans le temps. Il permet de traiter notamment les phénomènes physiques suivants :

- Frottement sur le fond (variable en espace) ;
- Influence de la turbulence ;
- Influence du vent ;
- Zones découvrantes ;
- Prise en compte des courants de déferlement ;
- Effets de densité ;
- Etc.

Le module TOMAWAC (modèle spectral de 3ème génération), qui calcule la propagation et la génération de houle, permet de prendre en compte les phénomènes physiques suivants :

- Propagation de la houle dans le temps et dans l'espace, réfraction due aux courants et à la profondeur, déplacement de fréquence dû aux courants et à la marée ;
- Redistribution de l'énergie de la houle sur le spectre par les interactions non-linéaires comprenant l'interaction de trois et quatre ondes (triades et quadruplets) ;
- Frottement sur le fond et déferlement dû à la profondeur et à la cambrure ;
- Contraintes de radiation ;
- Génération de mer de vent...

En milieu côtier, les courants peuvent avoir une influence significative sur la propagation de la houle et inversement, il est donc impératif d'en tenir compte. Ils peuvent influencer significativement l'hydrodynamique. Il a ainsi été choisi de coupler ces deux modules afin de tenir compte de l'interaction mutuelle houle-courant :

- Prise en compte des courants sur la propagation de la houle : les courants peuvent avoir une influence significative sur la propagation de la houle;
- Prise en compte des courants de houle dus au déferlement dans l'hydrodynamique (courant littoral).

2. DESCRIPTION DU MODELE

2.1. EMPRISE ET BATHYMETRIE

Le modèle construit pour les besoins de l'étude représente la rade de Marseille dans sa totalité, du Cap Méjean au nord-ouest au Cap Croisette au sud-est. Les îles du Frioul sont également prises en compte. Les dimensions caractéristiques du modèle sont de l'ordre de 21,5 km selon l'axe Nord/Sud et 15,5 km selon l'axe Est/Ouest (Figure 8).

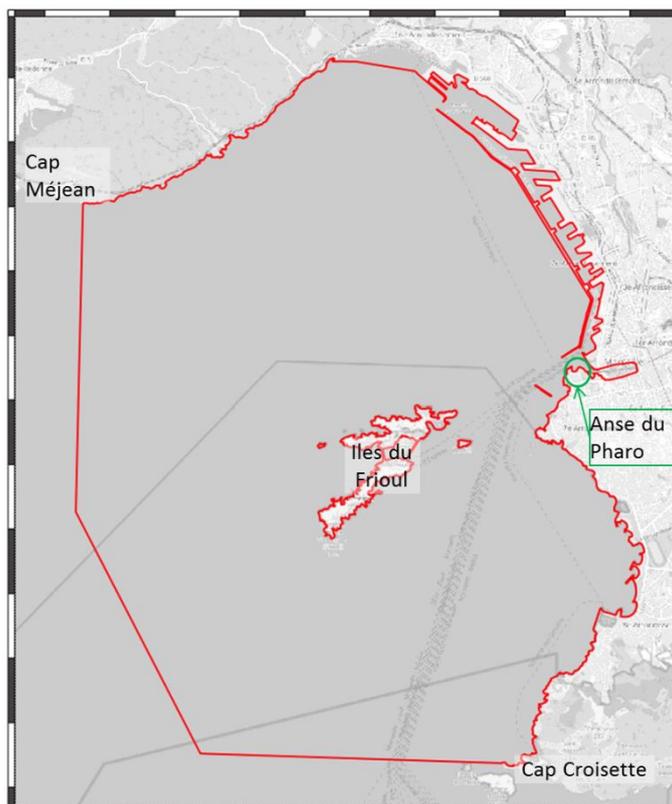


Figure 8 - Emprise du modèle numérique

Dans un premier temps, la géométrie de l'anse du Pharo a été reproduite dans son état actuel, afin de servir d'état de référence aux calculs. Par la suite, les ouvrages suivants ont été intégrés au modèle (selon le plan de la Figure 2):

- Digues d'entrée Est et Ouest ;
- Mole de grutage ;
- Zone draguée à -3.5 m IGN69.

Le modèle numérique de Terrain (représentation numérique de la bathymétrie) a été construit à partir des données issues de :

- la base de données HOMONIM¹ du SHOM (Service Hydrographique et Océanographique de la Marine) au large (résolution de 100 m) ;
- la base de données LITTO3D-PACA2015 du SHOM sur le littoral (résolution de 5 m) ;

¹ SHOM, 2015. MNT Bathymétrique de façade Golfe du Lion – Côte d'Azur (Projet Homonim)

- une carte marine pour la bathymétrie dans le port de Marseille.

Des vues de la bathymétrie finale sont présentées sur les Figure 9 et Figure 10 pour l'état actuel et Figure 11 pour l'état aménagé.

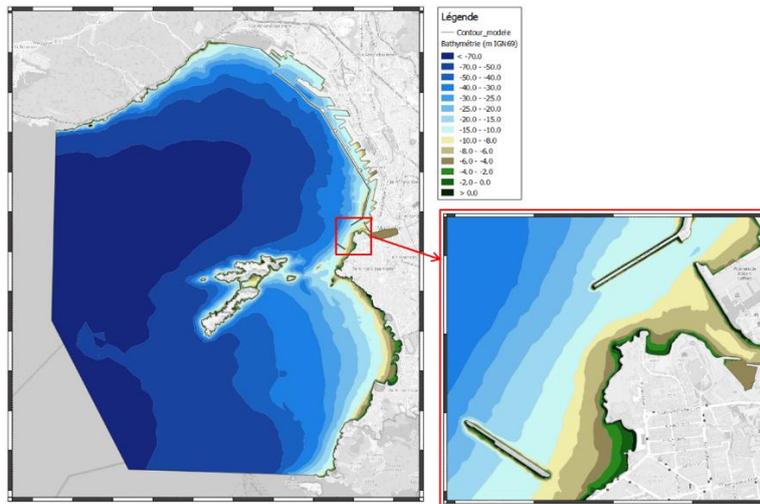


Figure 9 – Bathymétrie du modèle global et zoom sur l'entrée Sud du port de Marseille

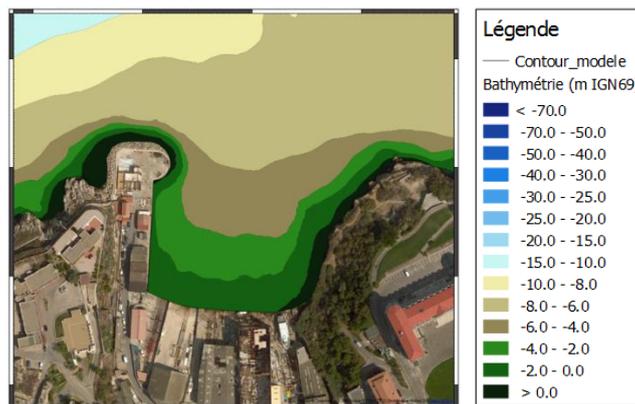


Figure 10 – Bathymétrie actuelle dans l'anse du Pharo

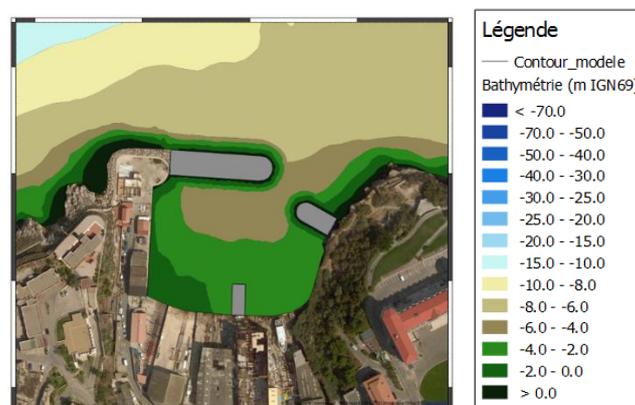


Figure 11 – Bathymétrie projet dans l'anse du Pharo

2.2. MAILLAGE

Le maillage horizontal du modèle est composé de mailles triangulaires de taille variable permettant de représenter précisément les fonds du modèle et les zones d'intérêt. La taille de maille varie de 400 m à la frontière maritime à 3 m dans l'anse du Pharo pour un total d'environ 21 900 nœuds et 41 600 éléments.

Ce maillage horizontal est ensuite reproduit sur la verticale afin de créer le maillage tridimensionnel qui est donc constitué d'éléments prismatiques à base triangulaire. Le plan inférieur suit la bathymétrie tandis que le plan supérieur suit l'évolution de la surface libre au cours du temps.

Des vues du maillage sont présentées sur les Figure 12 et Figure 13 pour l'état actuel et Figure 14 pour l'état aménagé.

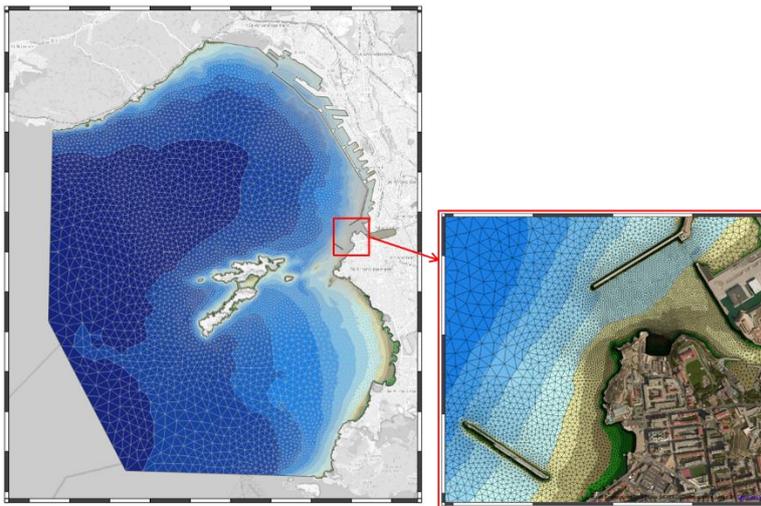


Figure 12 - Maillage du modèle global et zoom sur l'entrée Sud du port de Marseille

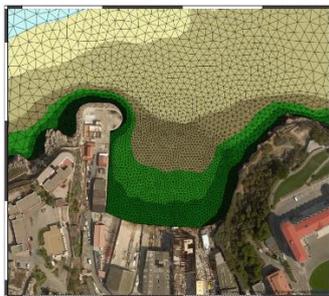


Figure 13 – Maillage de l'anse du Pharo – Configuration actuelle



Figure 14 - Maillage de l'anse du Pharo – Configuration aménagée

2.3. CONDITIONS AUX LIMITES

Les courants au niveau de l'anse du Pharo sont générés essentiellement par la houle et les vents.

Par conséquent, le modèle est forcé par :

- Une condition de houle, à la frontière maritime, variable temporellement et définie par une hauteur significative, une période et une direction de pic ;
- Un champ de vent, homogène spatialement et variable dans le temps, appliqué à la surface du modèle ;
- Un niveau d'eau, variable temporellement,

La variation du niveau d'eau (niveau de marée), faible, est intégrée.

Pour cette étude, il a été décidé de simuler des chroniques réelles de vent et de houle, représentatives des conditions observées sur site. Le choix de ces chroniques et leurs caractéristiques sont présentés au chapitre précédent.

C. EXPERTISE SEDIMENTAIRE

1. INTRODUCTION

Il est procédé à une expertise hydro-sédimentaire préliminaire afin d'estimer de manière qualitative la propension du plan d'eau, en configuration aménagée, à voir certaines zones s'éroder ou à être l'objet de dépôts de sédiments.

Cette expertise est alimentée par :

- La bibliographie disponible aux alentours de la zone d'étude ;
- Les prélèvements de sédiments et analyses granulométriques réalisées dans le cadre du projet d'aménagement ;
- Le modèle de courantologie décrit précédemment.

Cette analyse pourra être complétée ultérieurement si nécessaire par des études hydro-sédimentaires plus quantitatives basées sur des données de calibration (mesures de courant, levés bathymétriques existants et différentiels permettant de calibrer les évolutions des fonds marins dans la zone d'étude).

2. CONTEXTE SEDIMENTAIRE

2.1. NATURE DU LITTORAL

Le littoral avoisinant le site d'étude est formé par une côte relativement escarpée et très découpée qui laisse place à un grand nombre de baies et de petites anses. L'anse du Pharo est située à la jonction entre 2 types de littoral (Figure 15) :

- Au Nord, apparaît une côte très artificialisée (Port de Marseille, Estaque, Vieux Port...);
- Dès la pointe du Pharo et plus au Sud, le littoral est composé essentiellement de falaises et côtes rocheuses à l'exception de quelques zones sableuses correspondant aux « plages de poches » (Prado, sud de Pointe Rouge).

Données géographiques en mer et sur le littoral : trait de côte et risques



Figure 15 – Nature du littoral (Source : Ministère en charge de l'Environnement)

2.2. CARACTERISTIQUES DES FONDS MARINS

2.2.1. Nature et origine des fonds marins aux environs du site

Le SHOM met à disposition la carte de nature des fonds (Carte G) précise et détaillée (Figure 16). Cette dernière fournit des informations sur l'anse du Pharo et le secteur sud uniquement.

L'anse du Pharo est essentiellement couverte de vases graviers. Au sud de la pointe du Pharo et jusqu'au Cap Croisette, une alternance de roche et de sables apparait sur une bande côtière de 200 à 800 m de large en fonction des secteurs. Plus au large (jusqu'à 1 à 1,5 km du littoral), du cailloutis graviers et des roches couvrent les fonds marins et au-delà, la couverture sédimentaire est essentiellement composée de sables vaseux.

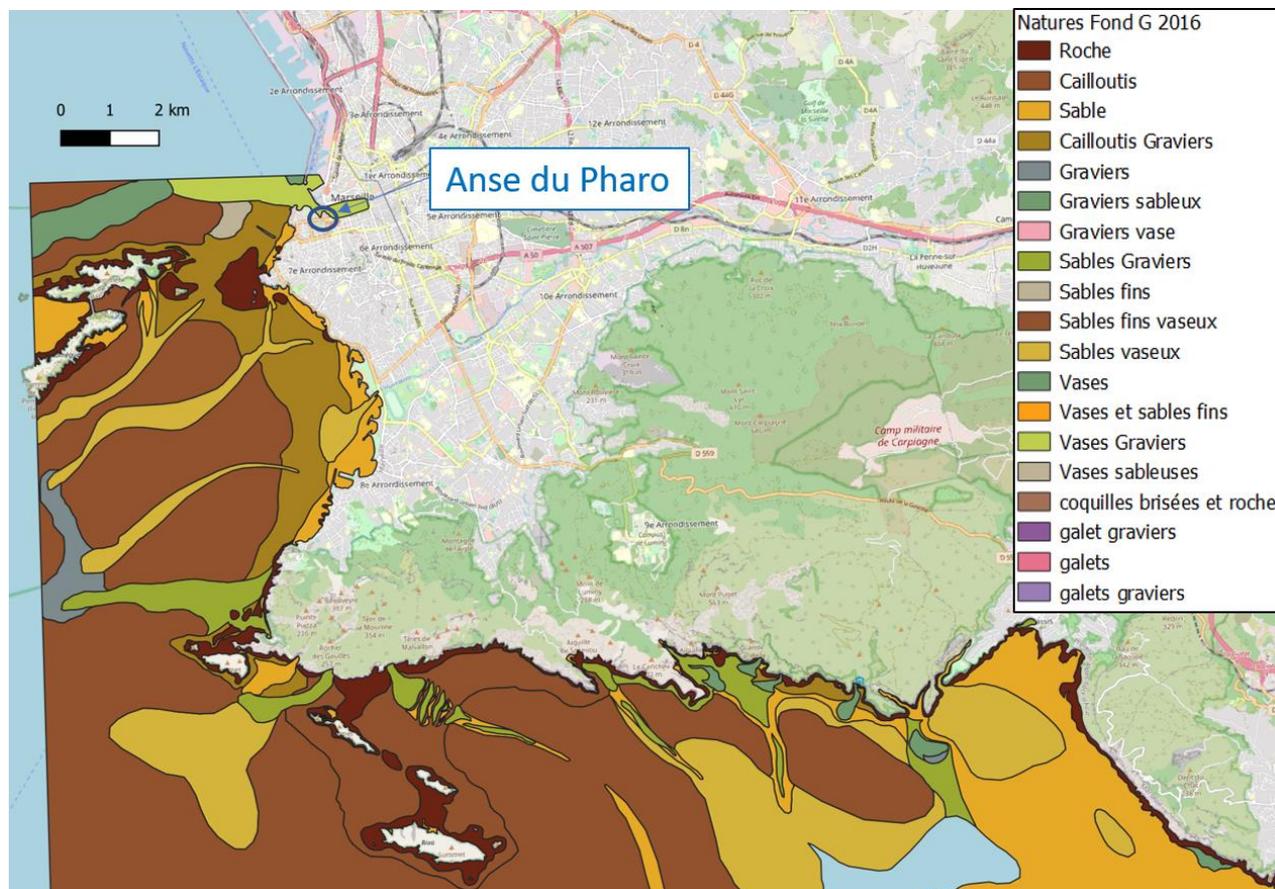


Figure 16 – Nature des fonds – Carte au 1/50 000 (Source : SHOM)

Les sédiments sont d'origine diverses : apports fluviaux, apports marins, apports terrestres, apports humains.

Les apports terrestres sont dus à l'érosion des falaises soit sous l'effet des ruissellements ou infiltrations soit sous l'effet des vagues.

Les apports fluviaux sont drainés par les bassins versants des rivières. Au niveau de l'anse, le seul apport pourrait provenir de l'Huveaune qui débouche dans la baie du Prado, apports très réduits et éloignés (environ 5 km au-delà de la pointe du Pharo). Des apports en matières en suspension pourraient aussi provenir des exutoires.

Les apports humains concernent les apports artificiels en lien avec des rechargements de plage par exemple ou en période de travaux (ports de plaisance, construction de terres pleines...). A ce jour, aucuns travaux récents ne sont recensés aux abords de l'anse du Pharo.

2.2.2. Prélèvements de sédiment dans l'anse du Pharo

Dans le cadre du projet d'aménagement, des prélèvements de sédiments ont été réalisés à l'intérieur de l'anse du Pharo (Réf. [2]).

Ces prélèvements sont localisés sur la Figure 17. Des analyses granulométriques ont été réalisées sur 4 échantillons moyens (PHARO 1, PHARO 2, PHARO 3, PHARO 5), formés à partir de 2 à 3 échantillons élémentaires (représentés par des ronds de couleur sur la figure suivante).

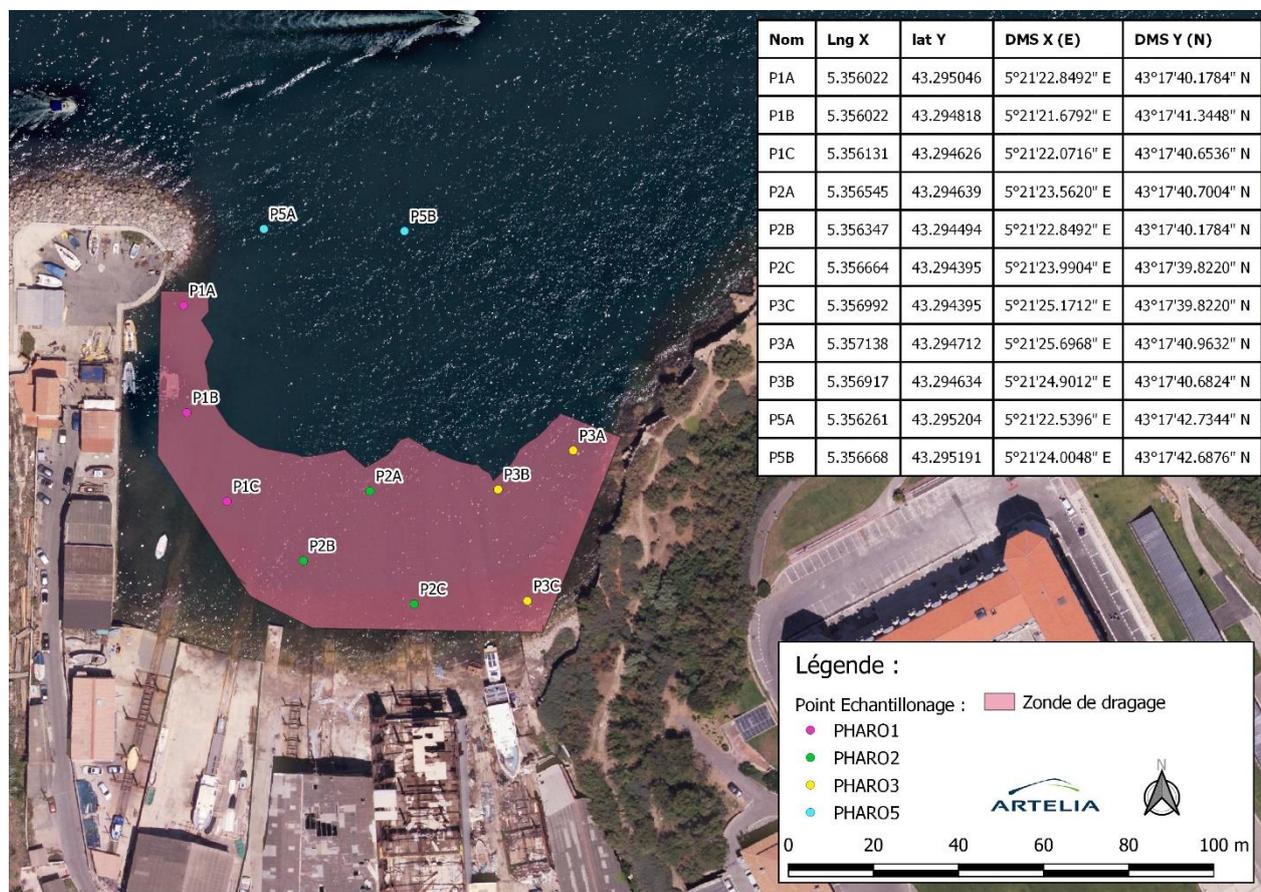


Figure 17 – Localisation des prélèvements de sédiments – Mars 2021

Le Tableau 1 et la Figure 18, ci-après, présentent les répartitions granulométriques des échantillons. Les échantillons sont constitués en majorité de sables moyens à grossiers (de 77% pour le PHARO2 au centre de l'anse à plus de 90% au PHARO 3, à l'Est de l'anse). La proportion de fines (fraction < 63 µm, argiles + limons) est mineure et reste inférieure à 10%. C'est l'échantillon à l'Ouest de l'anse (PHARO 1) qui en contient le plus.

Tableau 1 – Répartition granulométrique des échantillons de sédiments prélevés

	Nature des sédiments	Pharo 1	Pharo 2	Pharo 3	Pharo 5
Fraction 0,02 - 2 μm	argiles	1	1	1	1
Fraction 2 - 20 μm	limons fins	6	4	3	4
Fraction 20 - 63 μm	limons grossiers	3	3	2	2
Fraction 63 - 200 μm	sables fins	11	15	2	4
Fraction 200 - 2000 μm	sables moyens à grossiers	79	77	92	90

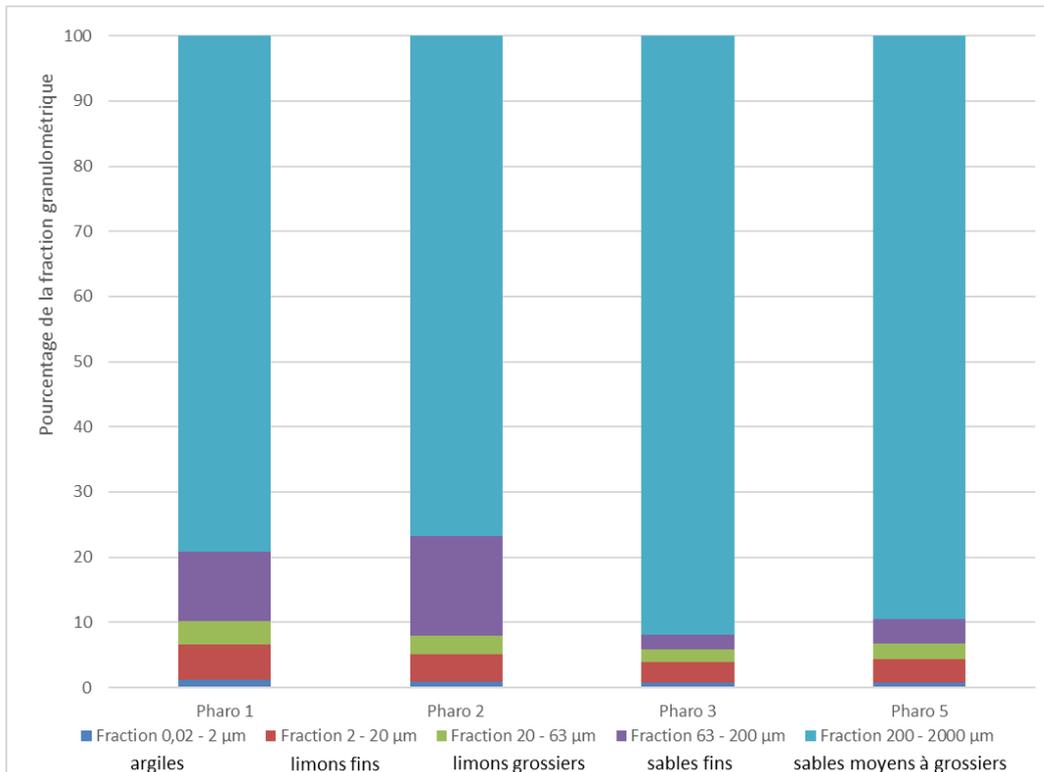


Figure 18 – Répartition granulométrique des échantillons de sédiments prélevés

Les D50 (diamètre médian) sont compris entre 300 et 700 μm (Tableau 2 et Figure 19). Le centre et l'ouest de l'anse sont composés de sables moyens ($D50 < 500 \mu\text{m}$) alors que le secteur Est voit apparaître des sables grossiers ($D50 > 600 \mu\text{m}$). Les sédiments en place au niveau de la future digue (PHARO 5) sont également des sables grossiers.

Tableau 2 – Diamètre médian des échantillons de sédiments prélevés

	Pharo 1	Pharo 2	Pharo 3	Pharo 5
D50 (µm)	484	305	697	663
	sables moyens	sables moyens	sables grossiers	sables grossiers

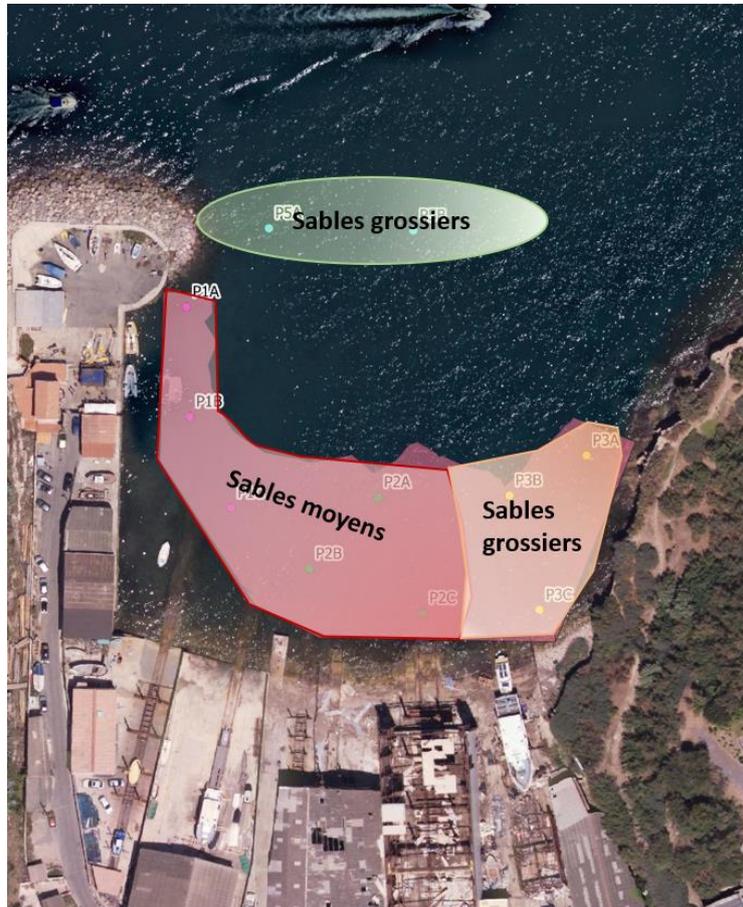


Figure 19 – Répartition des diamètres médians des échantillons de sédiments prélevés

La figure suivante confirme que les sédiments présents sur la plage sont grossiers (cailloux, gros sables).



Figure 20 – Type de sédiment sur la plage – Visite du 14 janvier 2021 (ARTELIA)

2.2.3. Matières en suspension (MES)

Aucune mesure de MES n'est disponible dans l'anse.

La Figure 21 présente l'évolution de la Matière en Suspension fournie par le Service d'Observation en Milieu Littoral (SOMLIT²) à la station du Frioul située au sud des îles du Frioul. Sur cette période et quel que soit la profondeur, la MES reste faible, inférieure à 1 mg/l sur la période. Les périodes de fortes pluies peuvent induire des apports plus importants.

Il est d'ailleurs à noter que le secteur Sud du port de Marseille, à proximité de l'anse du Pharo, ne fait pas l'objet de dragage d'entretien.

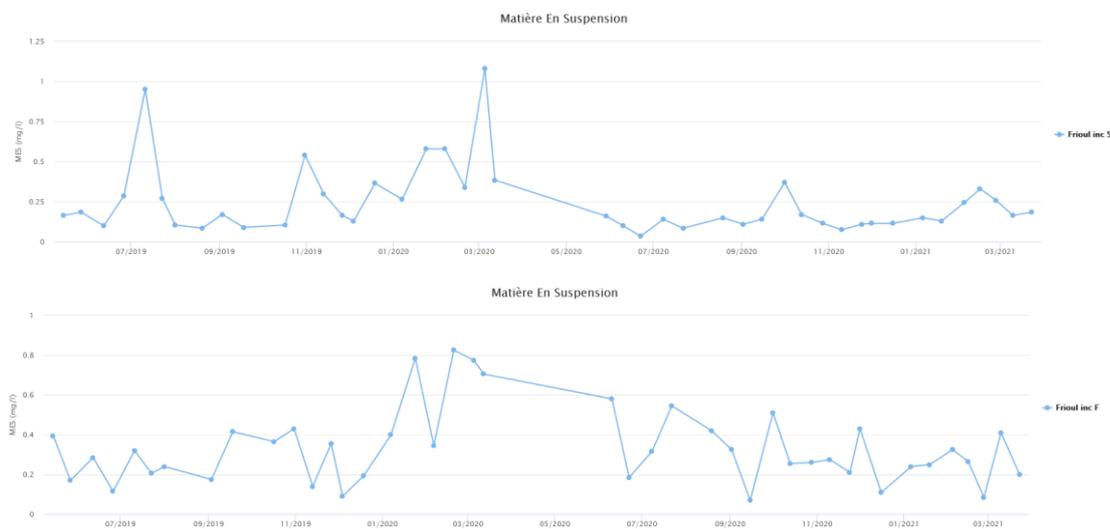


Figure 21 – Evolution de la MES entre mai 2019 et avril 2021 – Surface (en haut) et Fond (en bas)

² <https://www.somlit.fr>

3. EVOLUTION DU TRAIT DE COTE

Comme le montre la Figure 22 ci-après, le trait de côte est relativement stable sur l'ensemble du linéaire d'étude. Les seules évolutions notables (avancée du trait de côte) sont localisées plus au sud dans la baie du Prado.



Figure 22 – Evolution du trait de côte (Source : Ministère en charge de l'Environnement)

Afin de poursuivre le travail d'évolution du trait de côte à une échelle plus locale, les traits de côte des années 2014 et 2020 ont été comparées sur l'anse du Pharo (Figure 23). Les traits de côte ont été repérés et tracés sur chacune des photographies puis leurs positions ont été superposées. Il ressort globalement une stabilité du trait de côte entre les 2 années de comparaison. Nous précisons que cette analyse est basée sur 2 photographies aériennes, prises chacune à un instant différent de l'année qui peut correspondre à une situation particulière (après une tempête par exemple). Malgré cette limitation, cette comparaison des images satellites au niveau de l'anse du Pharo confirme bien la tendance de stabilité de trait de côte.



Mars 2020



Aout 2014

Figure 23 – Vue aérienne et trait de côte (source : Google Earth)

4. MOUVEMENTS SEDIMENTAIRES

4.1. GENERALITES

Les mouvements sédimentaires sont générés par :

- La houle :
 - Soit par perte de matériaux dans le profil, perpendiculairement au rivage pour les houles frontales ou présentant une faible obliquité.
 - Soit par le transit littoral (transport longitudinal) parallèlement au trait de côte : ce transit apparaît lorsque les houles se présentent avec une certaine obliquité par rapport aux isobathes ou dans les zones d'expansion de la houle (à l'abri des ouvrages) générant un transport de matériaux parallèlement au rivage, dans le sens de propagation de la houle.
- Les courants généraux ou les courants engendrés par les vents pouvant créer des zones tourbillonnaires.

A l'échelle de la Méditerranée, la circulation générale est générée par le courant Ligure ou Liguro-Provençal, orienté d'Est en Ouest. Ce courant est très faible au voisinage de la côte et n'a pas d'influence sur les processus sédimentaires sur le site d'étude.

Seuls les courants engendrés par les vents peuvent engendrer des mouvements de masses d'eau localement sur le site et avoir un impact sur le transport de sédiment dans l'Anse du Pharo.
- Dans une moindre mesure, le transport éolien peut transporter des sédiments fins. Compte tenu du relief environnant et de la localisation de l'anse en zones urbaines, ce mode de transport semble négligeable dans l'anse. Ceci est confirmé par le type de sédiment présent sur la plage de l'anse (cailloutis, gros sables et absence de sédiments fins - Figure 20).

4.2. DYNAMIQUE DANS LA RADE DE MARSEILLE

Le littoral aux environs du secteur d'étude est rocheux et artificialisé à l'exception de rares plages. Le sens du transport longitudinal est essentiellement fonction de la houle et dans une moindre mesure des courants générés par le vent. Au large les houles prédominantes proviennent des directions Ouest, Sud-Ouest et Sud-Est. Les vents prédominants sont les vents du secteur Nord-Ouest (Mistral) et du secteur Sud-Est (Marin) (Voir chapitre A3).

Deux conditions typiques de houles (Ouest et Sud-Est) et de vent (Mistral et Marin) permettent de montrer le comportement hydrodynamique de la rade de Marseille (à but illustratif).

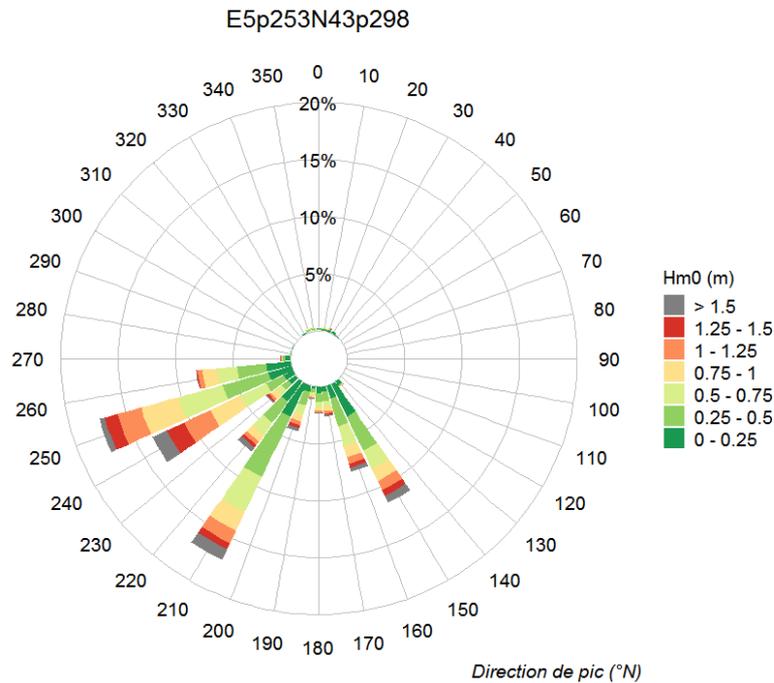


Figure 24 – Roses de houle au large de Marseille

Houle de Sud-Est

La Figure 25 illustre la propagation d’une houle de Sud-Est ($Hm_0=1,4$ m ; $T_p= 9.4s$; $165^\circ N$) à l’échelle de la rade de Marseille et de l’anse du Pharo. La propagation de la houle de Sud-Est est atténuée par la présence des îles du Frioul qui crée une zone d’ombre et d’atténuation de cette houle au Nord de la rade. La partie Nord de la digue du Large (digue principale qui protège le port de Marseille) est relativement protégée. L’entrée côté Vieux Port et anse du Pharo est protégée par la digue des Catalans et la hauteur significative de la houle qui entre dans l’anse est relativement faible (inférieure à 10 cm).

Les champs de courant (moyennés sur la hauteur d’eau) générés sous l’action de cette houle et d’un vent de Sud-Est (135°) de 7,5 m/s sont présentés sur la Figure 26. Pour cette condition, les courants sont très faibles (inférieurs à 0,05 m/s) dans toute la rade exceptée localement autour de la pointe d’Endoume ou des îles du Frioul. Le long du littoral au droit de la plage des Catalans, il apparait une veine de courants atteignant les 10 cm/s. La pointe du Pharo bloque la dynamique de cette veine de courants. Ainsi l’anse du Pharo est relativement protégée. Le transport longitudinal sédimentaire en provenance du Sud est très faible.

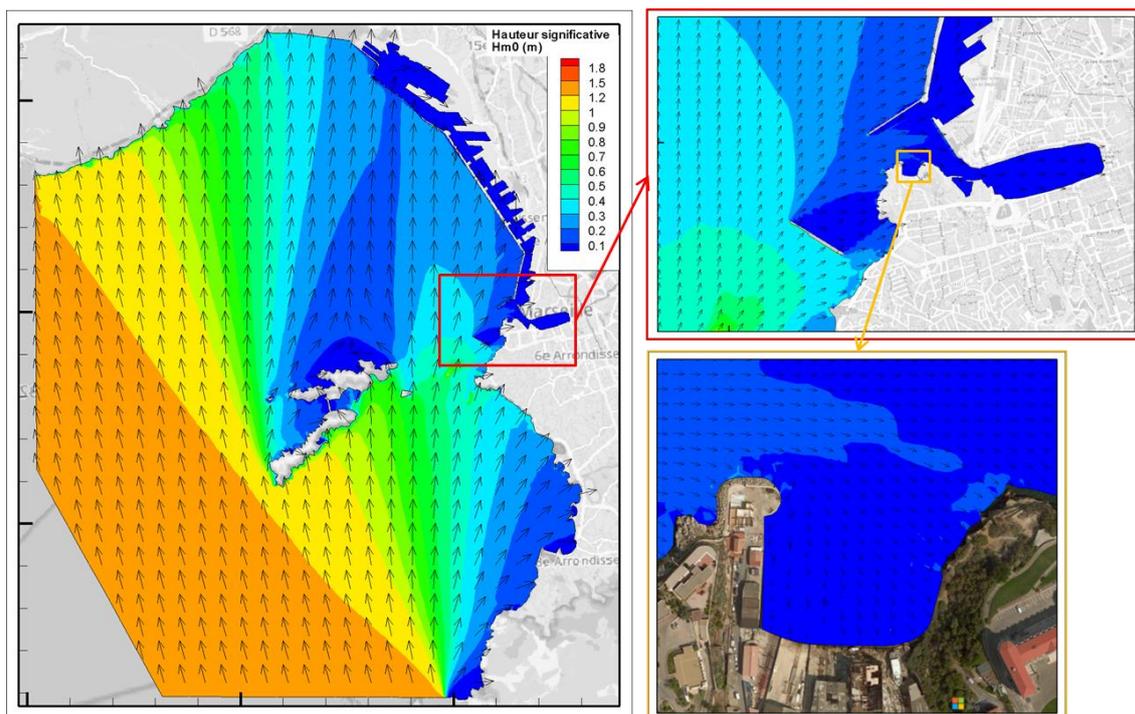


Figure 25 – Cartographies du champ de houle (vue globale à droite, zooms sur l'entrée Sud du port et l'anse du Pharo à gauche) – Houle de Sud-Est

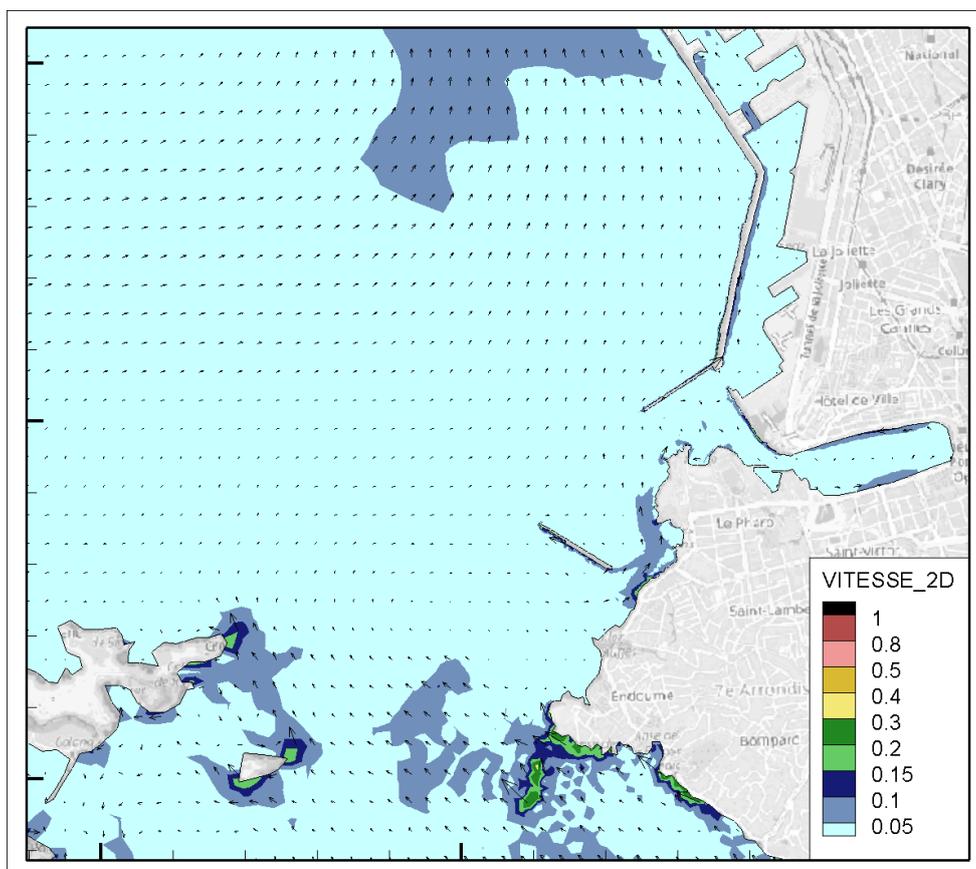


Figure 26 – Cartographies du champ de courant associé à une houle de Sud-Ouest et un vent de Sud-Est

Houle d'Ouest

Pour une condition d'Ouest (Figure 27), la houle d'Ouest ($H_{m0}=1,1m$; $T_p=5.3s$; $255^\circ N$) atteint frontalement la digue du Large et l'avant-port au sud côté Vieux Port. La digue Sainte-Marie protège l'accès au bassin Sud du port mais pas l'entrée de l'anse du Pharo. Les îles du Frioul protègent le littoral au sud de la pointe du Pharo. En revanche, la figure zoomée sur l'anse montre que la houle qui arrive de l'Ouest dans l'avant-port est diffractée par la pointe du Pharo et pénètre dans l'anse. Le secteur Est de l'anse est le plus exposé. Les houles d'Ouest sont susceptibles d'impacter l'anse d'un point de vue sédimentaire.

Les champs de courant (moyennés sur la hauteur d'eau) générés sous l'action de la houle et d'un vent de Nord-Ouest - Mistral (320°) de $7,2 m/s$ sont présentés sur la Figure 28. Pour cette condition, les courants sont plus importants que pour la condition précédente. Une veine de courant dirigée vers le Sud avec des vitesses pouvant atteindre $0,8 m/s$ longent la digue du Large. Elle est ensuite déviée vers l'Ouest par la digue Sainte-Marie qui protège l'entrée de l'anse. De larges recirculations sont visibles entre l'entrée Sud du port et les îles du Frioul. Au Sud, de la digue des Catalans, apparaît une veine de courant dirigée vers le Sud. L'avant-port et l'anse du Pharo restent, malgré tout, bien protégés des courants.

Néanmoins, nous verrons dans les chapitres suivants que des courants peuvent apparaître localement dans l'anse en fonction de la concomitance des conditions de houle d'Ouest et de Mistral.

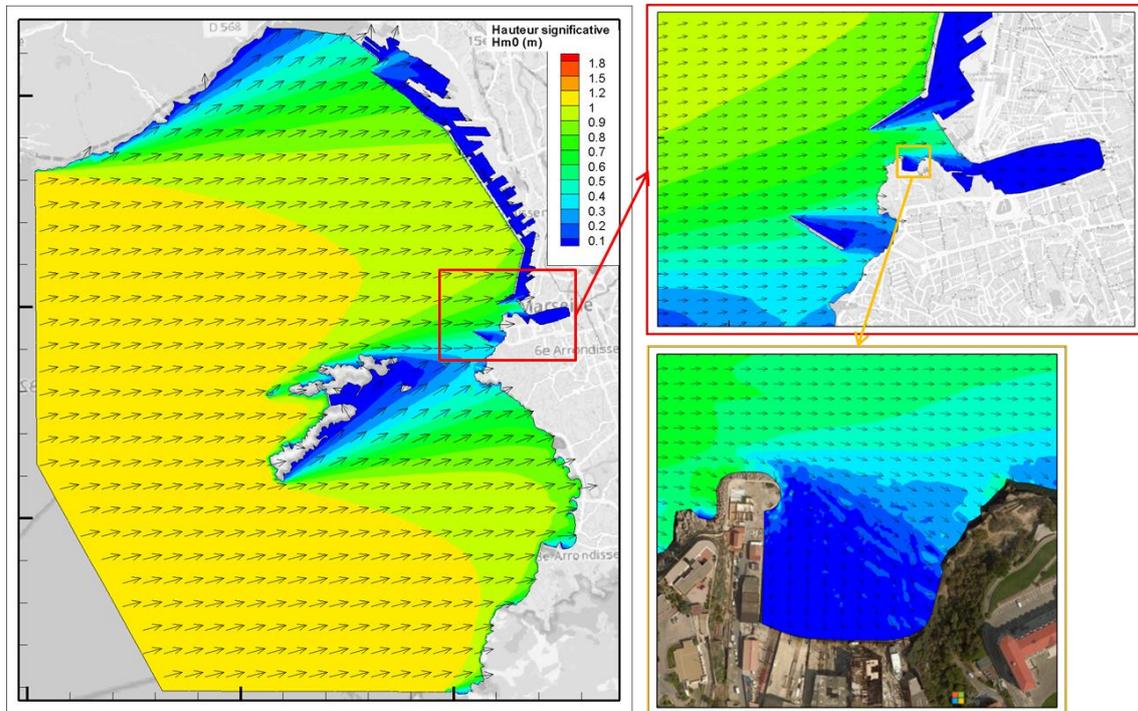


Figure 27 – Cartographies du champ de houle (vue globale à droite, zooms sur l'entrée Sud du port et l'anse du Pharo à gauche) – Houle d'Ouest

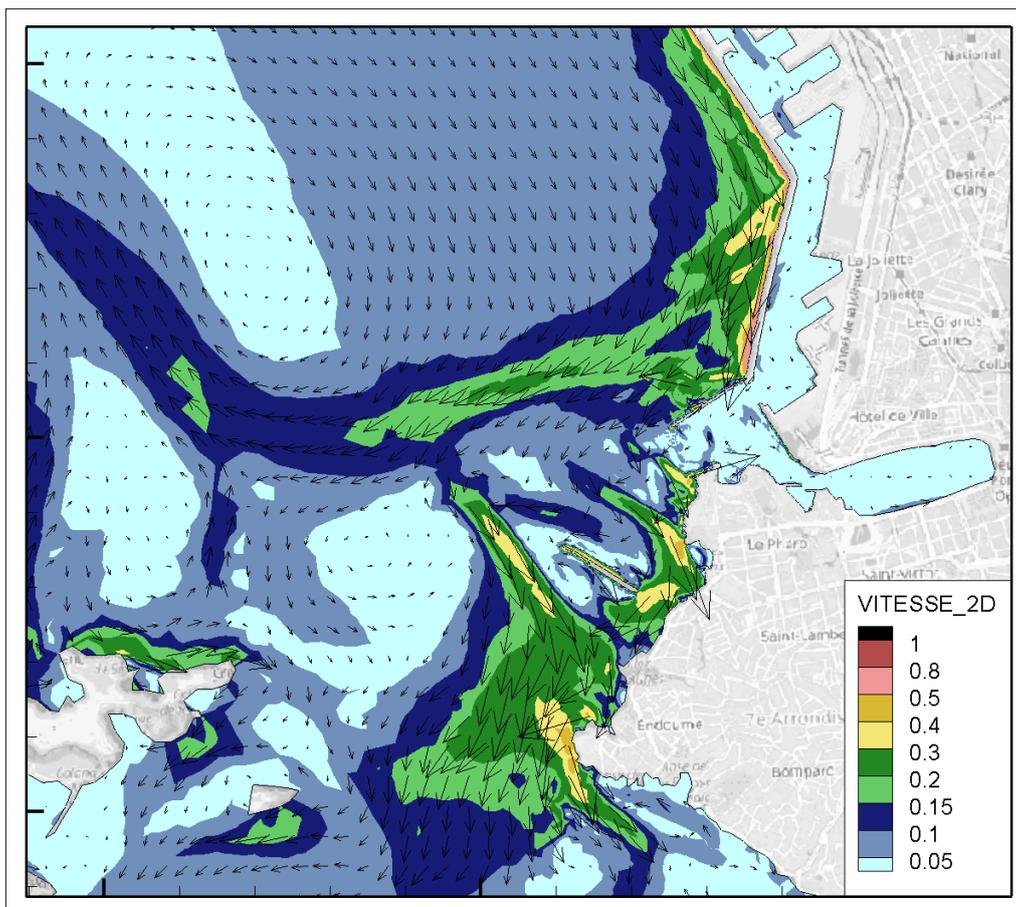


Figure 28 – Cartographies du champ de courant associé à une houle d’Ouest et un vent de Nord-Ouest

5. RISQUES D'ÉROSION ET DE DEPOT DANS L'ANSE DU PHARO

5.1. IMPACT DE L'AMENAGEMENT SUR LES COURANTS

5.1.1. Condition de Mistral

Les champs de courants dans l'anse du Pharo sont présentés pour la condition de Mistral tel que définie au chapitre A3.1 sur la Figure 30 pour les instants suivants :

- le 6/03/2010 19h correspond au premier pic de vent, avec une houle au large venant du nord ;
- le 10/03/2010 3h : vent faible (2,1 m/s) ;
- le 12/03/2010 2h vent moyen de 7,2 m/s ;
- le 15/03/2010 1h : maximum de vent sur la chronique simulée (13 m/s).

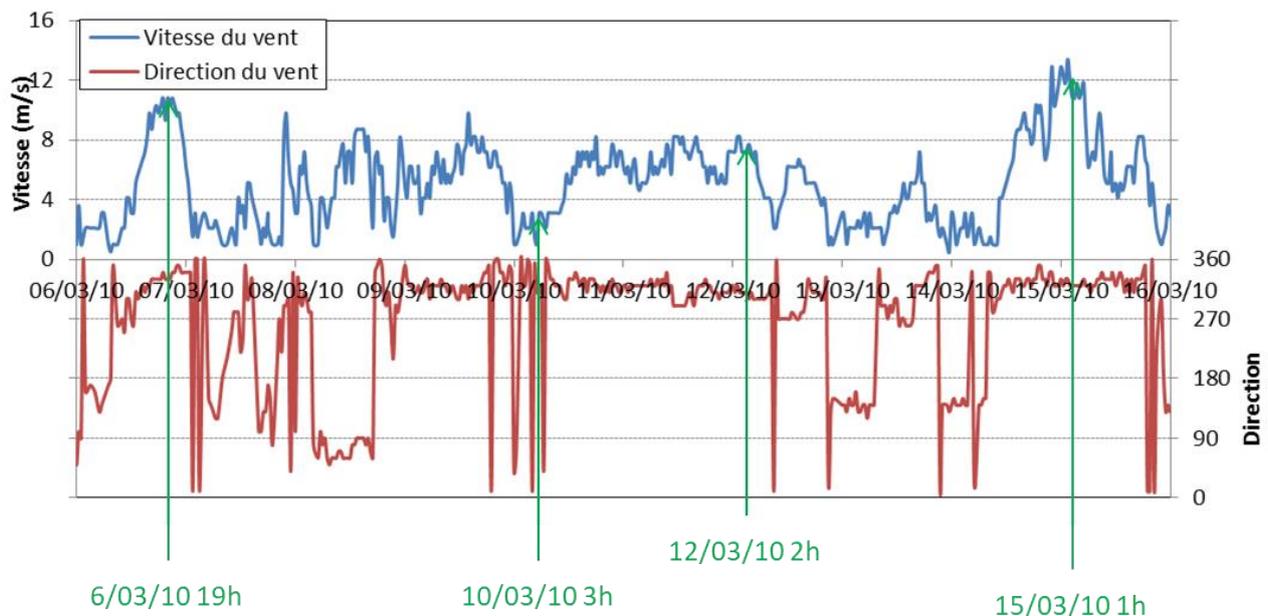


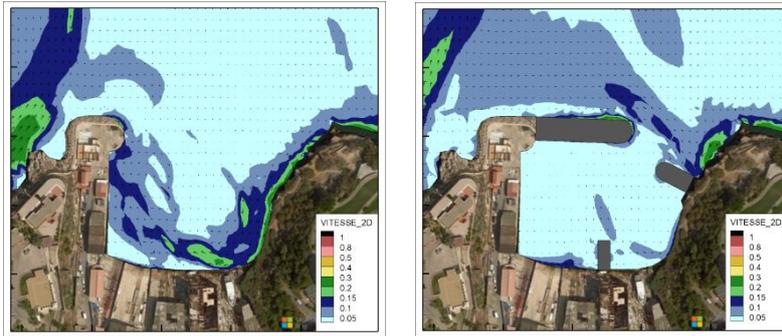
Figure 29 – Série temporelle du vent et présentation des temps d'extraction des cartes de courant (en vert)

La configuration actuelle de l'anse, très ouverte, permet de laisser entrer les courants à l'intérieur de l'anse. Selon l'intensité du vent, une recirculation dans le sens horaire se crée et les vitesses (moyennées sur la hauteur d'eau) à l'intérieur de l'anse peuvent atteindre 0,15 à 0,2 m/s. Ce type de courants est susceptible d'apporter des sédiments depuis le nord dans l'anse sous réserve d'avoir une source potentielle d'apport. Or comme précisé, l'anse est plutôt entourée par un littoral artificialisé ou par des falaises rocheuses.

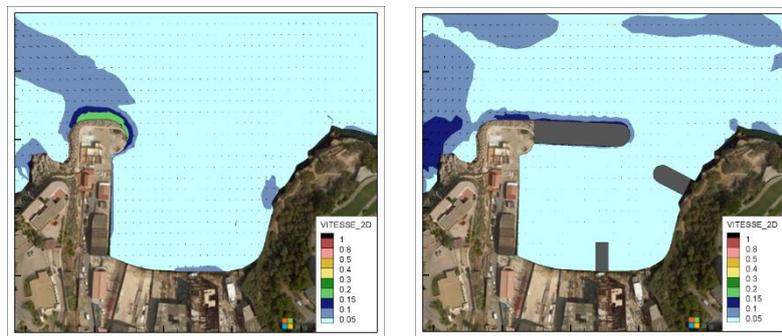
Dans l'état projet, les vitesses du courant dans l'anse sont quasiment nulles quelle que soit la vitesse du vent et la houle. Les courants générés à l'extérieur de l'anse longent la digue principale mais ne parviennent pas à entrer dans l'anse, protégée par les nouveaux ouvrages. Très peu de mouvements apparaissent dans l'anse à l'exception, ponctuellement, de faibles vitesses en fond de baie ou le long des digues.

En revanche l'extérieur de l'anse (au droit de la passe d'entrée) est un secteur plus exposé avec des courants plus importants qu'en l'état actuel.

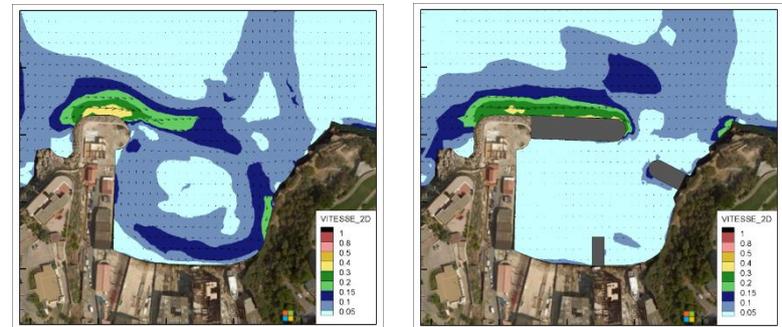
Le 06/03/2010 19h



Le 10/03/2010 3h



Le 12/03/2010 2h



Le 15/03/2010 1h

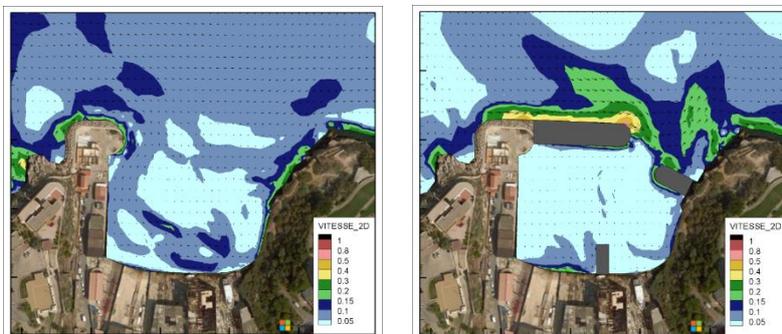


Figure 30 – Cartographies des champs de courant à différents instants – Condition de Mistral (état actuel à gauche, état projet à droite)

5.1.2. Condition de Marin

La Figure 32 présente les champs de courants dans l'anse du Pharo pour la condition de Marin tel que définie au chapitre A3.2 aux instants suivants :

- le 15/04/1996 16h correspond au premier pic de vent d'Est (5,1 m/s ; 100°) ;
- le 16/04/1996 9h30 : vent faible (2,1 m/s) ;
- le 20/04/1996 16h vent fort de Sud-Est (7,7 m/s ; 160°).

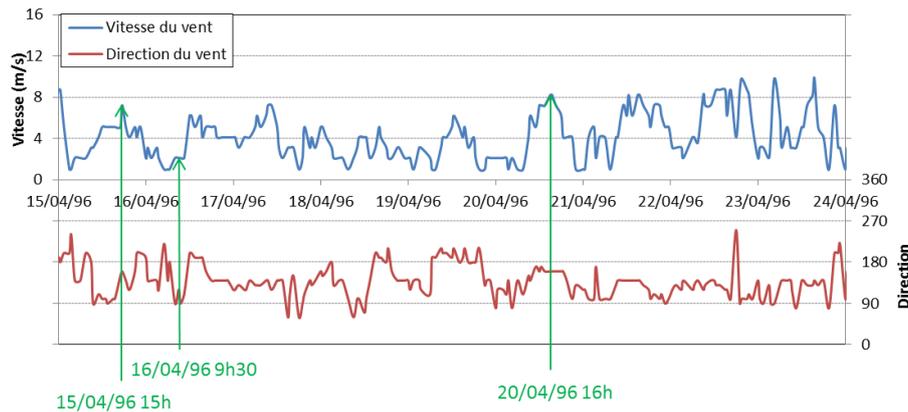


Figure 31 – Série temporelle du vent et présentation des temps d'extraction des cartes de courant (en vert)

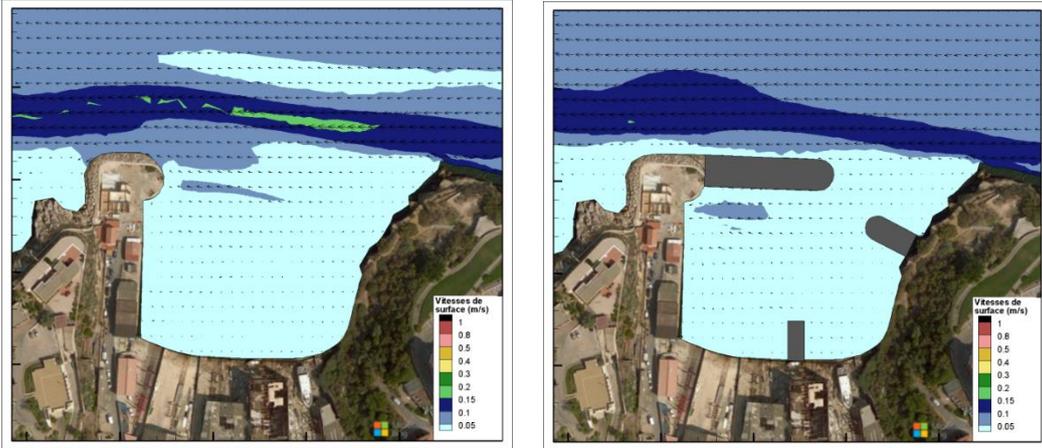
Pour cette condition, le champ de courant moyenné sur la hauteur d'eau est inférieur à 5 cm/s dans l'anse durant la quasi-totalité de la simulation. Comme explicité précédemment, cette condition (vent et houle de Sud-Est) n'est pas préjudiciable pour l'anse.

Même si les vitesses moyennes dans l'anse sont très faibles, l'action du vent permet tout de même de mettre en mouvement les couches d'eau de surface. Nous avons donc choisi de présenter les **courants de sub-surface** (coupe horizontale 50 cm sous la surface) pour affiner l'analyse.

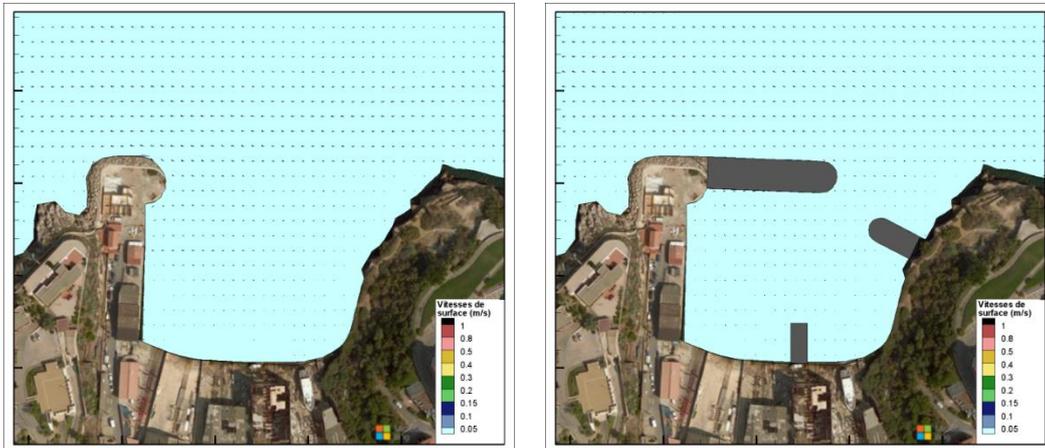
Pour l'état actuel, même si les vitesses moyennes dans l'anse sont très faibles, l'action du vent permet tout de même de mettre en mouvement les couches d'eau de surface. Pour ce scénario, les conditions de vents sont principalement d'Est à Sud. Les cartographies ci-dessus montrent que par vent d'Est, les eaux de surface sont entraînées vers l'Ouest et par vent de Sud, elles sont poussées vers l'extérieur de l'anse. La configuration actuelle de l'anse permet de laisser sortir les eaux de l'anse sur une largeur d'environ 130 m.

A contrario, dans l'état projet, la section de passage des eaux est réduite à 25 m et le vent de Sud peut générer légèrement plus de mouvements à l'intérieur de l'anse. Cette condition peut être favorable à la stagnation de fines qui serait apportées par une condition de Mistral ou un vent de Nord-Est (condition rare).

Le 15/04/1996 15h



Le 16/04/1996 9h30



Le 20/04/1996 16h

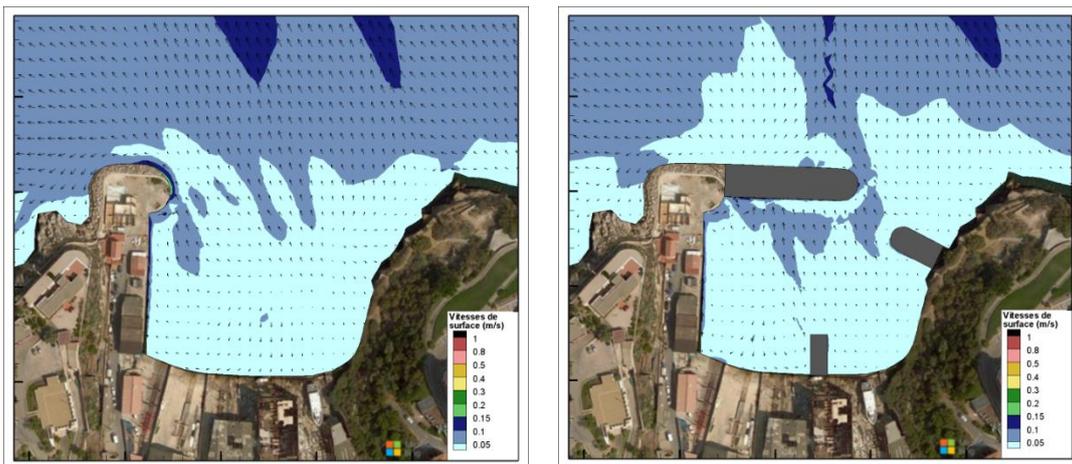


Figure 32 – Cartographies des champs de courant à différents instants – Condition de Marin (état actuel à gauche, état projet à droite)

5.1.3. Temps calme

Les champs de courants dans l'anse du Pharo sont présentés pour le scénario « calme » tel que définie au chapitre A3.3 sur la Figure 34 pour les instants suivants :

- le 16/04/2010 19h correspond au pic de vent du premier jour (7,2 m/s ; 50°) ;
- le 17/04/2010 à 3h correspond à un instant de vent faible (2,1 m/s) ;
- le 17/04/2010 13h40 correspond au pic de vent du deuxième jour (6,5 m/s ; 200°).

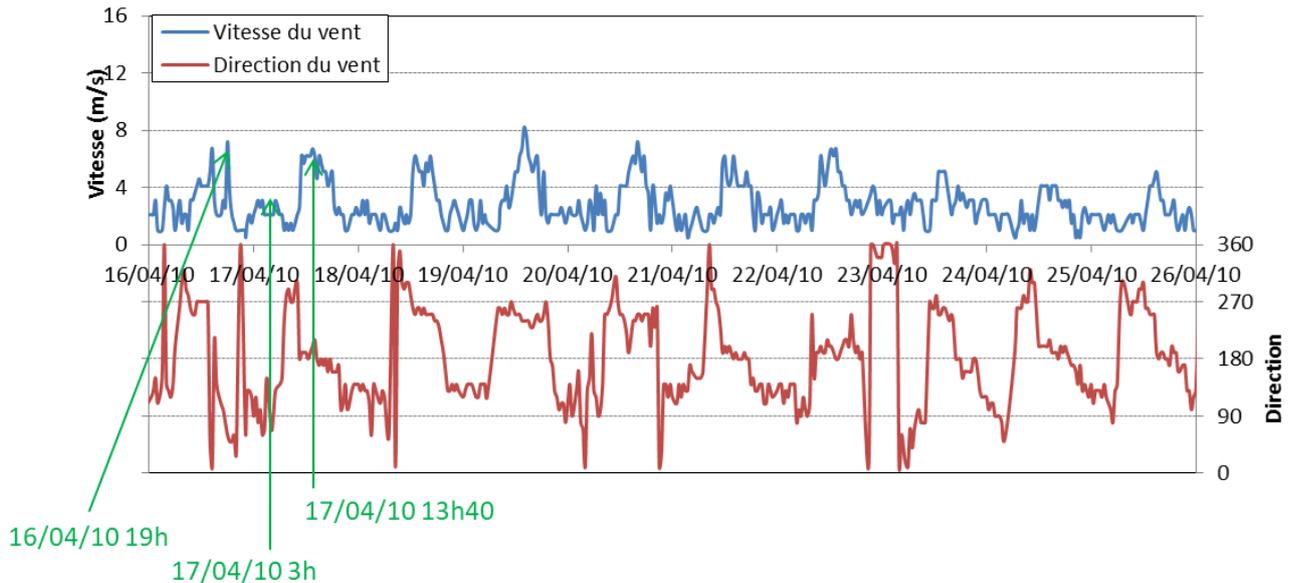


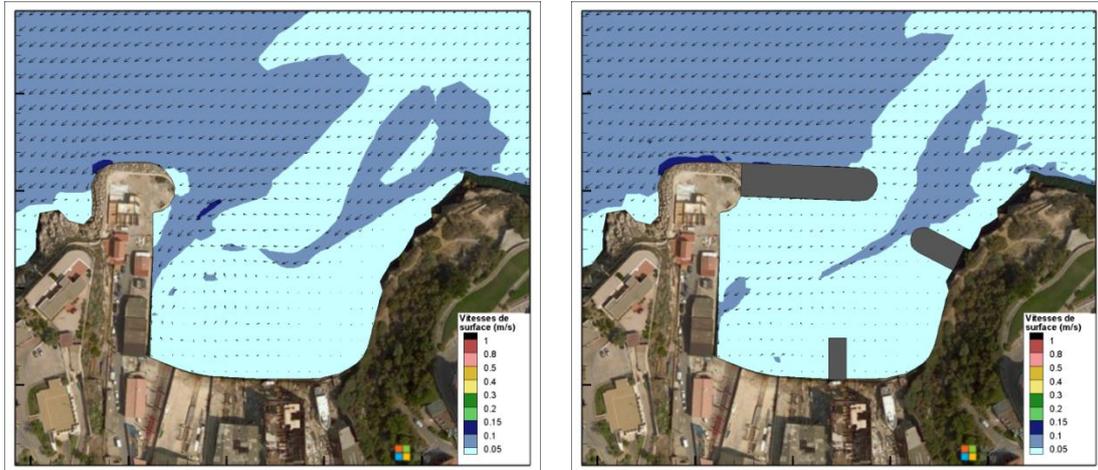
Figure 33 – Série temporelle du vent et présentation des temps d'extraction des cartes de courant (en vert)

Pour cette condition, le champ de courant moyenné sur la hauteur d'eau est inférieur à 5 cm/s dans l'anse durant la quasi-totalité de la simulation. Comme pour la condition de Marin, les cartographies suivantes présentent les **courants de sub-surface** (50 cm sous la surface).

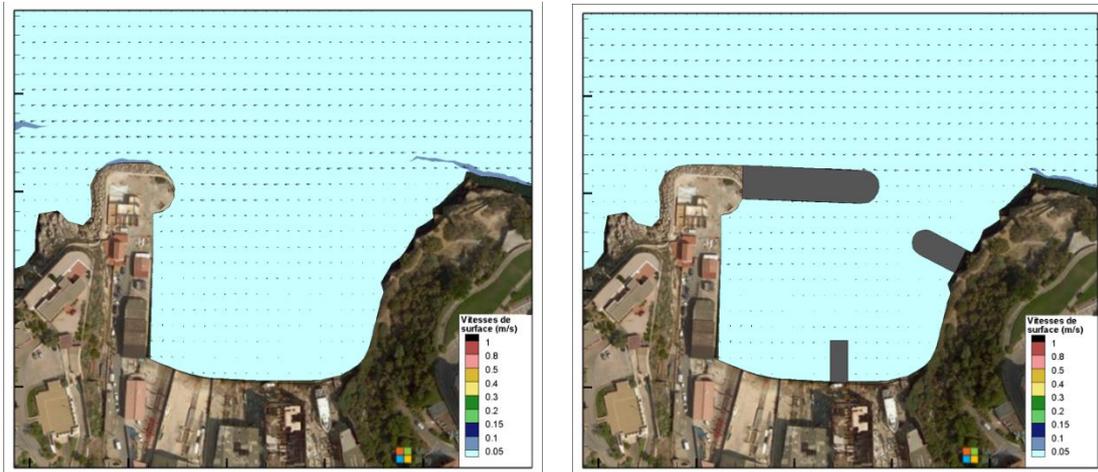
Comme pour le scénario de Marin, les conditions hydro-météorologiques de ce scénario génèrent des vitesses moyennées sur la hauteur d'eau très faibles mais les couches d'eau de surface sont mises en mouvement par l'action du vent. Par vent de Nord-Est (le 16/04/2010 19h) les courants de surface sont dirigés vers l'anse alors que pour un vent de Sud-Ouest (le 17/04/2010 13h30) les courants de surface sortent de l'anse. Peu de différence apparaisse entre l'état actuel et l'état projet.

Ce type de conditions est plutôt propice à la stagnation des sédiments fins dans l'anse suite à des conditions de Mistral ou après un vent de Nord-Est, susceptibles d'apporter des sédiments dans l'anse.

Le 16/04/2010 19h



Le 17/04/2010 3h



Le 17/04/2010 13h40

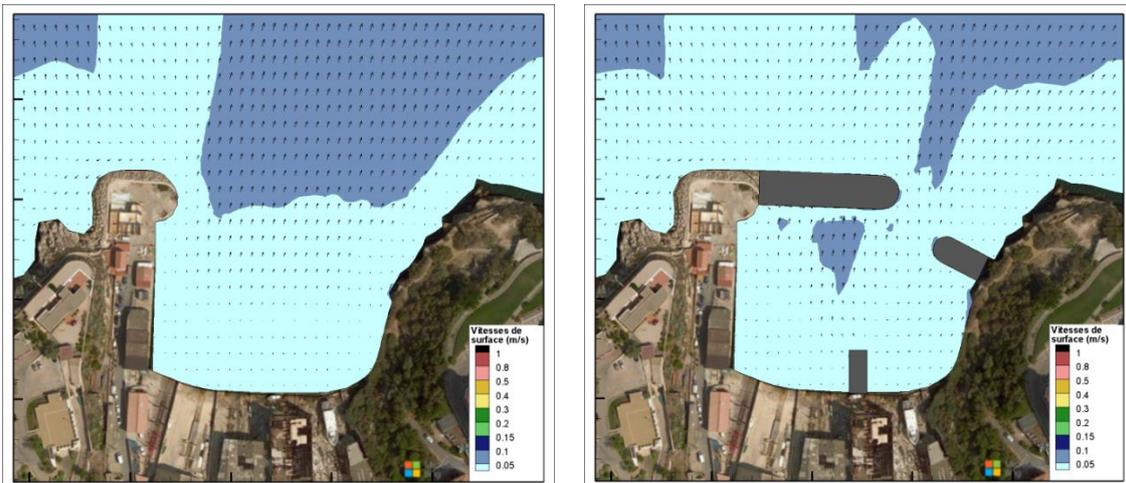


Figure 34 – Cartographies des champs de courant à différents instants – Temps calme (état actuel à gauche, état projet à droite)

5.2. MISE EN MOUVEMENTS DES SEDIMENTS A L'INTERIEUR DE L'ANSE DANS SA CONFIGURATION FUTURE

Des cartographies représentant la vitesse de cisaillement (u^*) sont proposées sur la figure suivante pour les 3 scénarios représentatifs tel que définis au chapitre A3. La valeur maximale de la vitesse de cisaillement sur les 10 jours de calcul est proposée. Cette vitesse permet d'apprécier la potentialité du sédiment à être remis en mouvement sous l'action des courants.

Elle est reliée à la contrainte de cisaillement T via la formule suivante :

$$T = \rho u^*{}^2$$

avec ρ la densité de l'eau

Pour un sédiment dont le diamètre moyen est compris entre 300 et 500 μm (sédiment présent sur les secteurs Ouest et Centre de l'anse - Figure 19), une vitesse critique de cisaillement égale à 0,0145 m/s est nécessaire pour mettre en mouvement le sédiment (référence [4]).

Pour un sédiment dont le diamètre moyen est compris entre 650 et 700 μm (secteur Est de l'anse et future digue - Figure 19), une vitesse critique de cisaillement égale à 0,018 m/s est nécessaire pour mettre en mouvement le sédiment (selon la même source bibliographie [4]).

Les Figure 35 présentent la vitesse de cisaillement maximale sur la durée des simulations pour chacun des scénarios. Compte tenu des sédiments en place actuellement, aucun mouvement sédimentaire notable (érosion) n'apparaît à l'intérieur de l'anse dans sa configuration future, les vitesses de cisaillement maximale étant inférieures aux seuils critiques. Cependant, des zones d'érosion potentielles sont localisées le long des futures digues côté extérieur de l'anse, au niveau des musoirs des futures digues et au droit de la future entrée de l'anse.

Les Figure 36, Figure 37 et Figure 38 présentent les temps de dépassement des 2 vitesses de cisaillement seuils de mise en mouvement des sédiments. Au niveau de la future digue principale, où les sédiments sont compris entre 650 et 700 μm , la vitesse seuil de 0.018 m/s est dépassée entre 1 et 2 jours en cumulée (sur les 10 jours de simulation) uniquement pour le scénario « Mistral ». Pour les autres scénarios, les vitesses simulées sont trop faibles pour remettre les sédiments en mouvement. Il est rappelé que les vents moyens pour le scénario « Mistral » sont dépassés 50% du temps pour la condition de Mistral soit environ 25% d'une année ce qui représente un risque d'érosion d'une durée estimée comprise entre 9 et 18 jours par an.

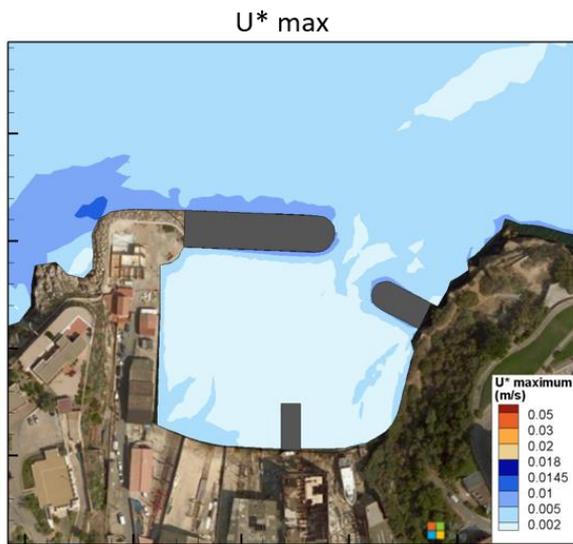
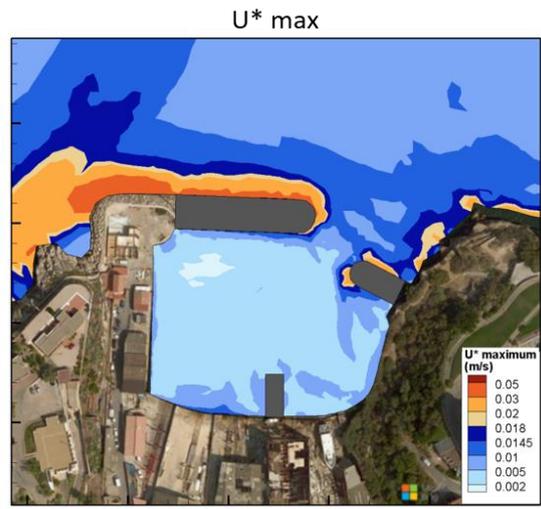
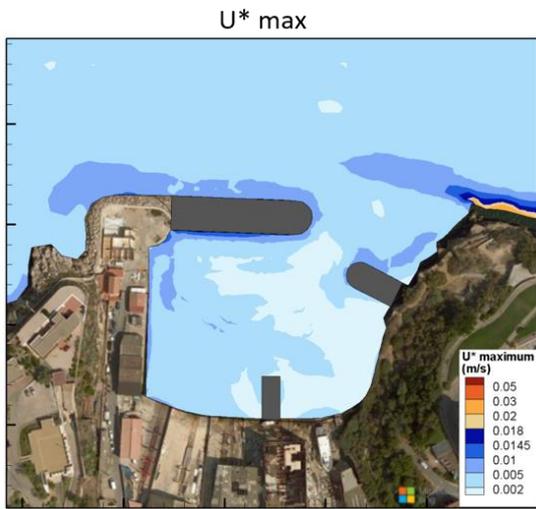


Figure 35 – Vitesse de cisaillement maximale

Temps de dépassement du seuil 0.0145 m/s



Temps de dépassement du seuil 0.018 m/s



Figure 36 – Temps de dépassement de la vitesse de cisaillement pour les 2 seuils de mise en mouvement (D50 entre 300 et 500 μm à gauche et D50 entre 650 et 700 μm à droite– Scénario « Mistral »

Temps de dépassement du seuil 0.0145 m/s



Temps de dépassement du seuil 0.0180 m/s



Figure 37 – Temps de dépassement de la vitesse de cisaillement pour les 2 seuils de mise en mouvement (D50 entre 300 et 500 μm à gauche et D50 entre 650 et 700 μm à droite– Scénario « Marin »

Temps de dépassement du seuil 0.0145 m/s



Temps de dépassement du seuil 0.0180 m/s



Figure 38 – Temps de dépassement de la vitesse de cisaillement pour les 2 seuils de mise en mouvement (D50 entre 300 et 500 μm à gauche et D50 entre 650 et 700 μm à droite– Scénario « Calme »

6. CONCLUSIONS

Le littoral avoisinant l'anse du Pharo est très artificialisé ou constitué majoritairement de falaises et côtes rocheuses. Peu d'évolution significative sont signalés le long de ce littoral depuis plusieurs années à l'exception des plages du Prado situées à plusieurs kilomètres au sud de l'anse. Les sources potentielles de sédiments sont rares. Il est d'ailleurs à noter que le secteur Sud du port de Marseille, à proximité de l'anse du Pharo, ne fait pas l'objet de dragage d'entretien.

En configuration projet, l'anse sera relativement protégée des conditions de Mistral et houles d'Ouest par les nouvelles digues. Les courants en conditions de Marin sont peu modifiés en configuration projet. Il est à noter lors des épisodes de vent de Nord-Est l'apparition d'une veine de courant dans l'axe de la passe d'entrée (mais ces conditions de vent sont très rares).

Concernant le risque de sédimentation dans la future anse tel qu'elle est envisagée actuellement :

- Aucune sédimentation contraignante de l'intérieur de l'anse n'est attendue car:
 - L'anse dans sa configuration future est relativement bien protégée des houles d'Ouest et de Sud-Est,
 - Les courants ambiants ne sont pas capables de générer des mouvements de sables significatifs,
 - Les sources de sédiment susceptibles d'apporter des sables sur site sont éloignées.
- Des survitesses autour des futurs ouvrages portuaires seraient présentes ponctuellement (à l'extérieur de l'Anse, le long des digues de protection) et pourraient générer potentiellement des zones d'affouillement. Néanmoins, ce risque d'éventuels affouillements sera limité du fait de la présence de la butée de pied de l'ouvrage de protection
- Il n'est pas à exclure des apports ponctuels de sables fins à l'intérieur de l'anse par fort vent de Nord-Est par le biais de courants. Ces matériaux seraient alors piégés et sédimenteraient dans l'enceinte de l'anse. Toutefois, de telles conditions de vent de Nord-Est fort étant rares, ce phénomène apparait comme plutôt marginal.
- Il est à noter que le secteur d'accès au droit de l'entrée de la future anse est un secteur qui sera plus dynamique en configuration projet. Ce secteur est le plus susceptible d'être soumis à des mouvements sédimentaires (dépôt ou érosion en fonction des conditions océano-météorologiques et des apports potentiels). En cas d'houle d'Ouest et de Mistral, les sédiments érodés le long de la digue principale pourraient se déposer à l'entrée du port et créer une zone de dépôt. Néanmoins, au regard de la profondeur de la future passe d'entrée (6 m de hauteur d'eau environ) et des tirants d'eau maximum des navires pouvant être accueillis dans le port (entre 2 et 3 m environ), ces possibles dépôts ne seraient pas de nature à pénaliser les manœuvres d'entrée ou de sorties des navires de l'anse du Pharo à court ou moyen terme.

D. ETUDE DU RENOUVELLEMENT D'EAU

1. METHODOLOGIE

1.1. THEORIE

Il n'existe pas de réglementation précise concernant le renouvellement d'eau dans un bassin (port ou marina).

Le PIANC est une organisation mondiale fournissant des recommandations et des conseils techniques pour une infrastructure de transport maritime (ports, marinas et voies navigables) durable. Son rapport sur la qualité d'eau dans les ports (Réf.[2]) mentionne :

- La mesure « historique » pour déterminer la qualité de l'eau est le « flushing time » ou temps de renouvellement. Ce temps de renouvellement peut être assimilé au temps nécessaire pour atteindre une dilution de 63% dans le bassin ;
- Les recommandations du PIANC préconisent d'atteindre les 63% de dilution en 4 jours. L'agence américaine de protection de l'environnement (EPA) recommande même un renouvellement total des eaux en moins de 4 jours pour une bonne qualité d'eau et en moins de 10 jours pour une qualité d'eau moyenne. Au-delà, la qualité d'eau dans le bassin est considérée comme mauvaise.
- Il faut aussi noter que pour une bonne qualité d'eau, le temps de renouvellement doit être assez homogène dans le bassin (absence de zones d'eau stagnante).

1.2. APPLICATION A L'ANSE DU PHARO

A partir de ces éléments, l'étude du renouvellement d'eau dans l'anse du Pharo se base sur la simulation (modèle numérique) de la dilution d'un traceur passif (colorant sans influence sur l'hydrodynamique) qui permettra de calculer un taux de renouvellement dans l'anse.

A l'instant initial, la concentration du premier traceur est fixée à 100 dans l'anse (à l'intérieur du polygone rouge sur la Figure 39) et à 0 dans le reste du domaine. L'évolution de la concentration en traceur dans l'anse au cours du temps permet de calculer le taux de renouvellement et le temps de renouvellement.

Le taux de renouvellement évolue au cours du temps et est calculé par rapport à la concentration initiale : $\text{taux de renouvellement} = C_0 - C(t)$. Le temps de renouvellement est défini comme le temps nécessaire à ce que le traceur atteigne une concentration donnée. Les valeurs seuils de 63 % (critère issu du PIANC) et de 95% (correspondant à un renouvellement d'eau total, évoqué par l'EPA) sont retenues pour l'analyse des résultats.



Figure 39 – Limite d'imposition du traceur passif

2. EXPLOITATION DU MODELE

Une simulation a été réalisée pour chacun des trois scénarios hydro-météorologiques décrits au chapitre A 3, et pour les deux configurations de l'anse (état actuel et état aménagé), soit un total de 6 simulations.

Les résultats des simulations sont analysés sur la base:

- Des cartes du taux de renouvellement (ou taux de dilution) dans l'anse à différents instants ;
- De l'évolution temporelle du taux de renouvellement moyen dans l'anse ;
- Des cartes du temps nécessaire pour atteindre les valeurs seuil de 63% et 95%.
- Des cartes de champ de courant qui sont présentées au chapitre C 5.1

3. RESULTATS DES SIMULATIONS

3.1. CONDITION DE MISTRAL

L'évolution des courants liée à la condition de Mistral est explicitée au chapitre C 5.1.1. Les cartographies de la Figure 40 suivante montrent le taux de renouvellement dans l'anse au bout de 0.5, 1, 2 et 3 jours, à gauche pour la configuration actuelle de l'anse et à droite pour l'état aménagé.

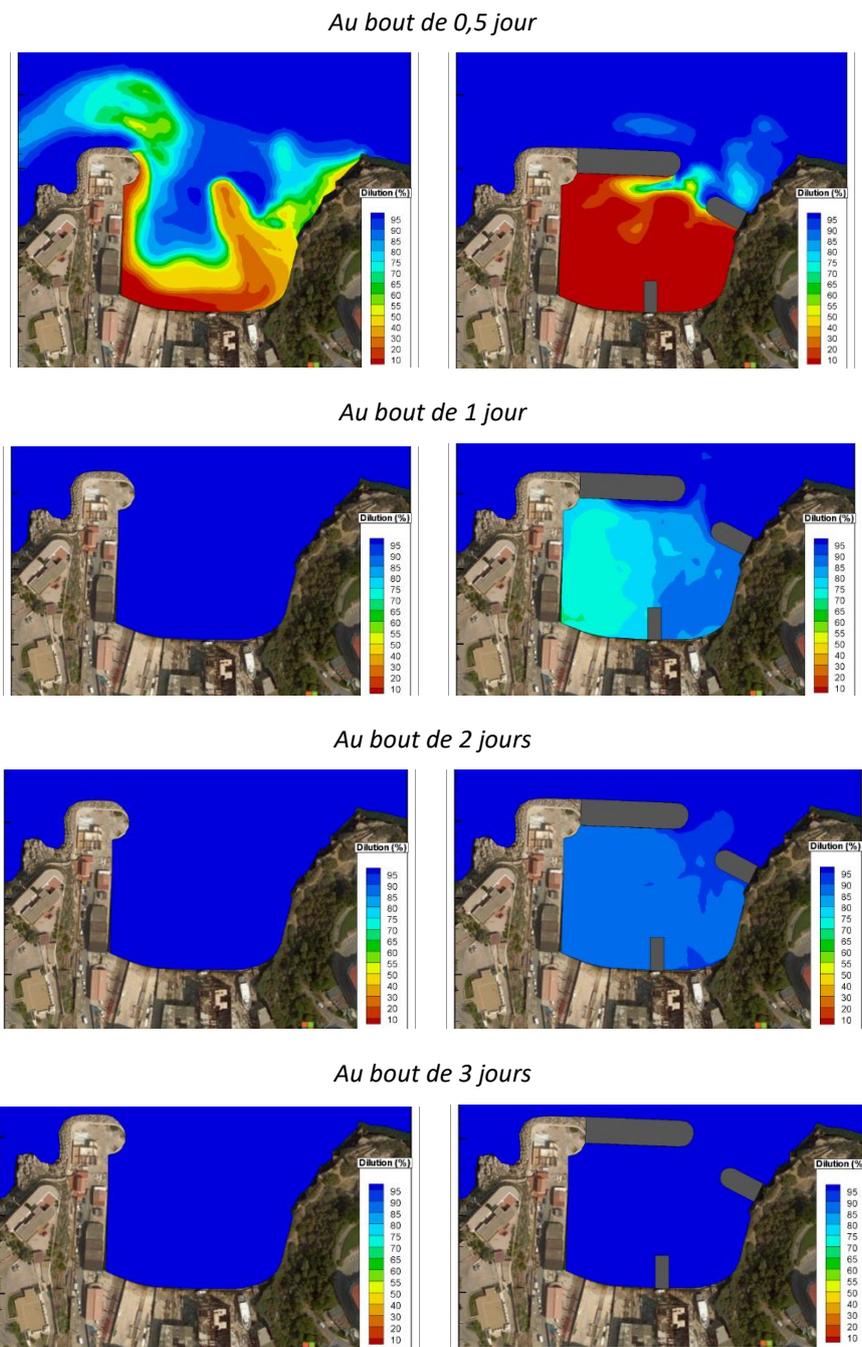


Figure 40 – Cartographies du taux de renouvellement à différents instants – Condition de Mistral (état actuel à gauche, état projet à droite)

Au bout de 12h de simulation (0,5 jour), le taux de renouvellement est supérieur à 70% à l'entrée de l'anse et inférieur à 50% au fond du port et le long du quai Ouest dans l'état actuel. Dans l'état aménagé, le taux de renouvellement est inférieur à 10% dans la quasi-totalité de la zone d'étude.

Dans la configuration actuelle, le volume d'eau de l'anse est totalement renouvelé au bout d'un jour. Dans l'état projet, après 1 jour de simulation, le taux de renouvellement dans l'anse est assez hétérogène entre les parties Est et Ouest, avec un taux de renouvellement minimum le long du quai Ouest (67%) et maximum le long de la digue Est (90%). Au bout de 2 jours, le taux de renouvellement est compris entre 85 et 95% dans toute l'anse et au bout de 3 jours, il est supérieur à 95% dans toute la zone.

La Figure 41 montre l'évolution temporelle du taux de renouvellement moyen dans l'anse (en bas), mis en parallèle avec les conditions de vent sur la simulation. Ce graphique permet d'estimer le temps de renouvellement moyen dans l'anse. Les cartographies de la Figure 42 indiquent le temps nécessaire pour atteindre les seuils de 63% et 95% en chaque nœud de calcul de l'anse. Ces cartographies permettent de vérifier que le renouvellement d'eau dans l'anse se fait de manière homogène.

Dans l'état actuel, les eaux de l'anse sont totalement renouvelées (renouvellement à 100% sur le graphique) en moins d'une journée.

Dans l'état projet, le taux de renouvellement des eaux de l'anse est plus variable. Il augmente rapidement le premier jour de calcul lorsque le vent imposé est important et son augmentation est moins rapide le deuxième jour où les vents sont plus faibles.

Dans la configuration projet de l'anse, le taux de renouvellement de 63% est atteint au bout de 20h et le taux de renouvellement à 95% au bout de 2,5 jours. Ces deux seuils étaient atteints en 13 et 17 heures dans l'état actuel. Les cartographies de la Figure 42 montrent que le renouvellement d'eau se fait de manière homogène dans toute l'anse.

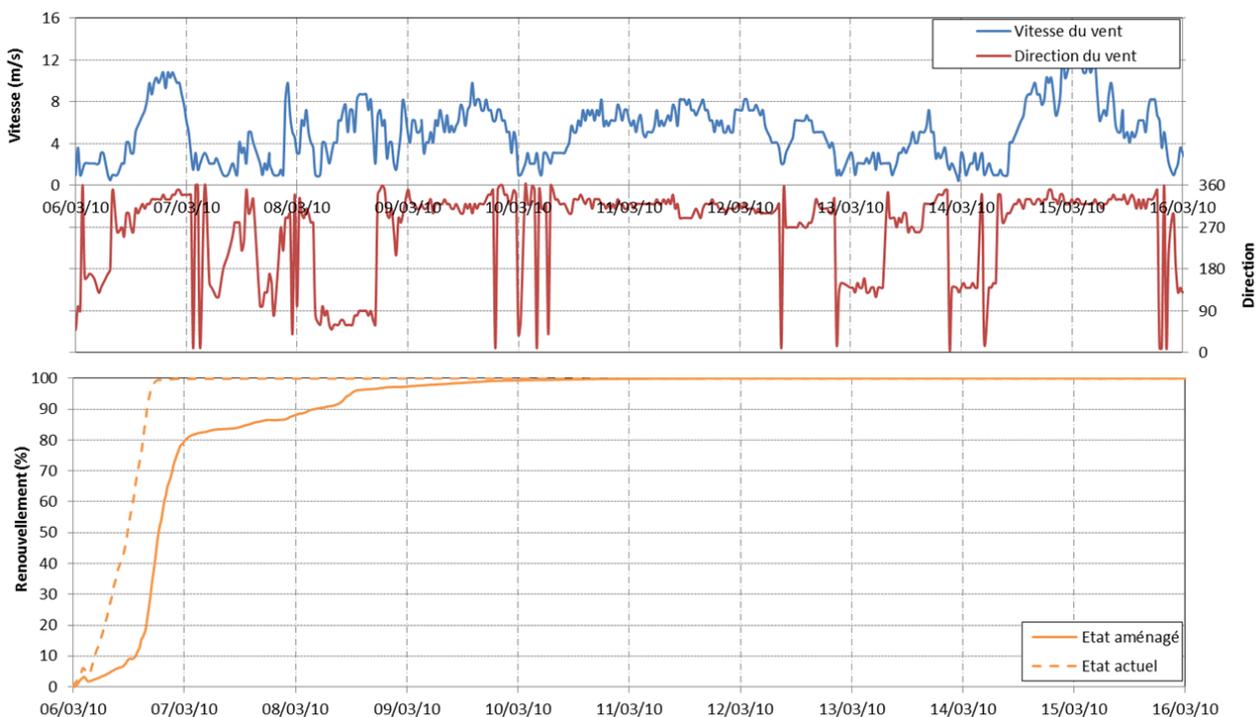


Figure 41 – Evolution temporelle du taux de renouvellement moyen dans l'anse – Scénario « Mistral »

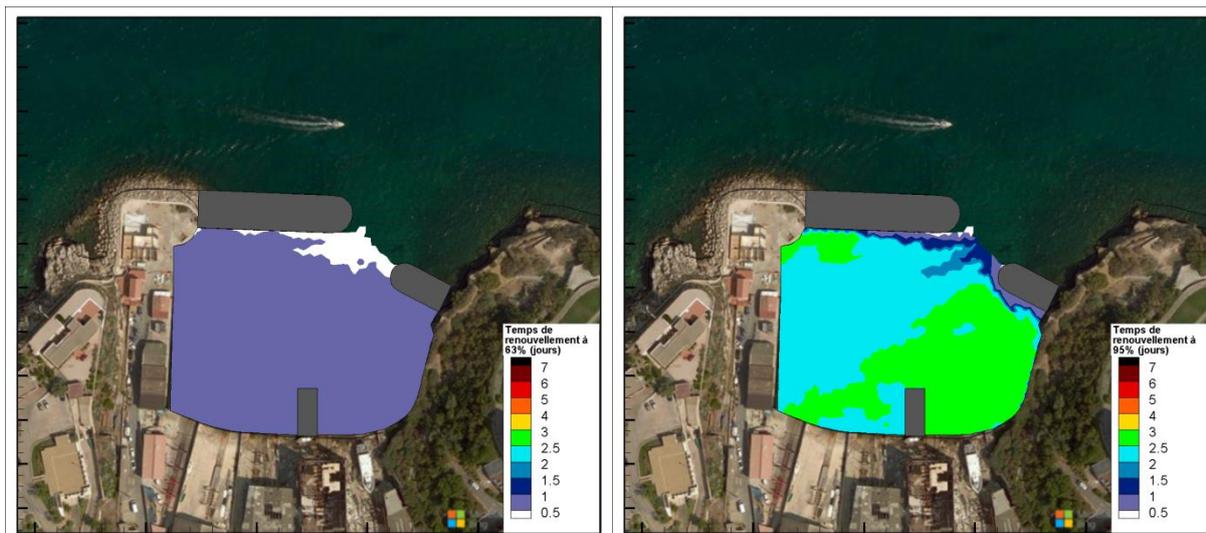


Figure 42 – Temps de renouvellement à 63% (à gauche) et à 95% (à droite) – Condition de Mistral

3.2. CONDITION DE MARIN

L'évolution des courants liée à la condition de Marin est explicitée au chapitre C . Les cartographies de la Figure 43 montrent le taux de renouvellement dans l'anse au bout de 1, 2, 3 et 4 jours, à gauche dans la configuration actuelle de l'anse et à droite dans l'état aménagé.

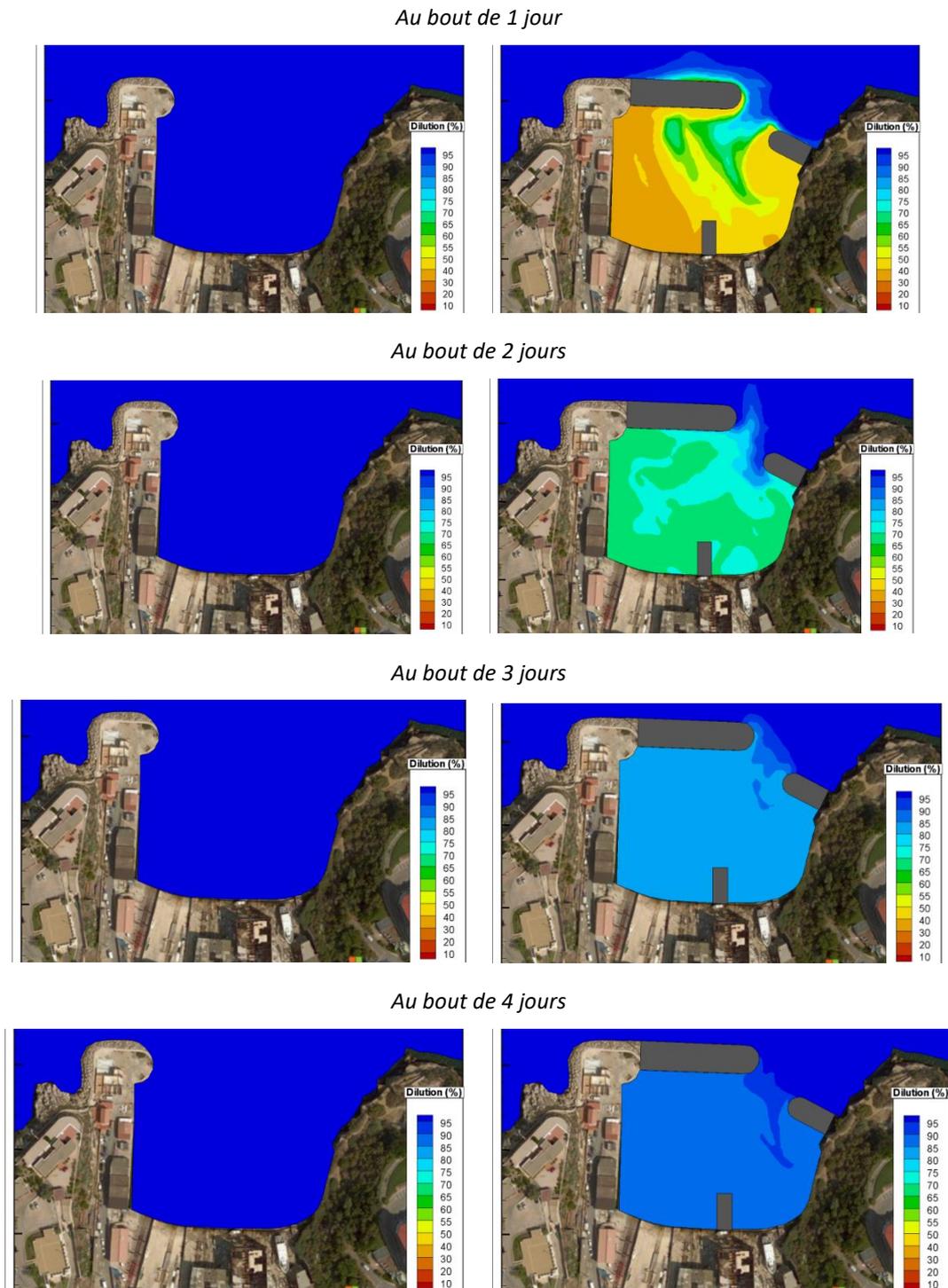


Figure 43 – Cartographies du taux de renouvellement à différents instants – Condition de Marin (état actuel à gauche, état projet à droite)

Au bout de 1 jour, le renouvellement d'eau dans l'anse est total dans l'état actuel. Pour l'état aménagé, il est inférieur à 40% dans la partie Ouest de l'anse.

Au bout de 2 jours, le taux de renouvellement est compris entre 60 et 70% dans toute l'anse. Il est supérieur à 80% au bout de 3 jours et supérieur à 85% au bout de 4 jours.

La Figure 44 montre l'évolution temporelle du taux de renouvellement moyen dans l'anse (en bas), mis en parallèle avec les conditions de vent sur la simulation. La Figure 45 présente le temps nécessaire pour atteindre les seuils de 63% et 95% en chaque nœud de calcul de l'anse.

Dans l'état actuel, le renouvellement d'eau est très rapide le premier jour car le modèle est forcé par un fort vent de Sud qui pousse les eaux de surface vers le Nord.

Dans l'état projet, les nouvelles digues limitent l'action du vent et le renouvellement des eaux est plus lent.

Dans la configuration projet de l'anse, le taux de renouvellement de 63% est atteint au bout de 1,6 jour et le taux de renouvellement à 95% au bout de 5,7 jours. Ces deux seuils étaient atteints en 2 et 6 heures dans l'état actuel. Les cartographies de la Figure 45 montrent que le renouvellement d'eau se fait de manière homogène dans toute l'anse (il n'y a pas de zones d'eau stagnante).

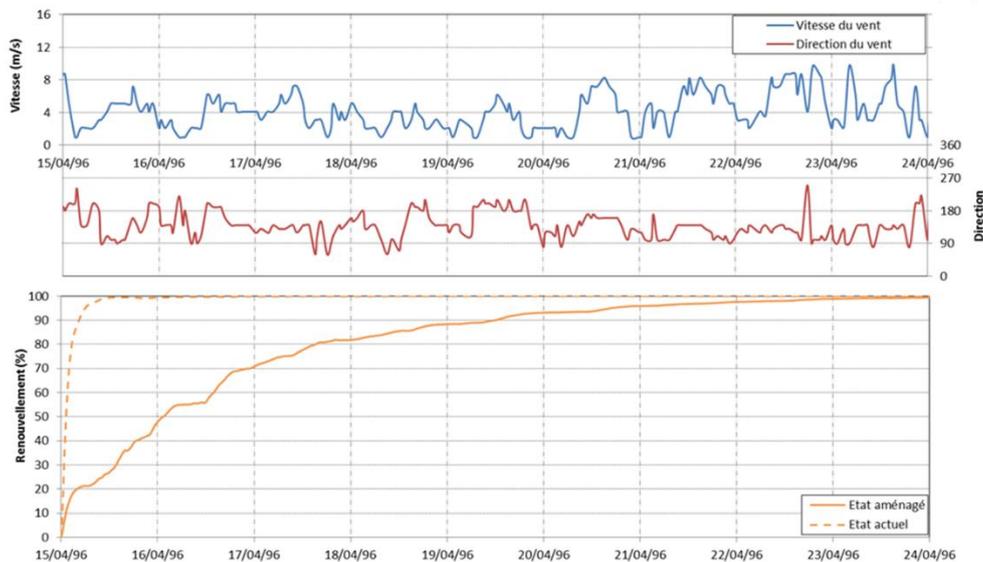


Figure 44 – Evolution temporelle du taux de renouvellement moyen dans l'anse – Condition de Marin

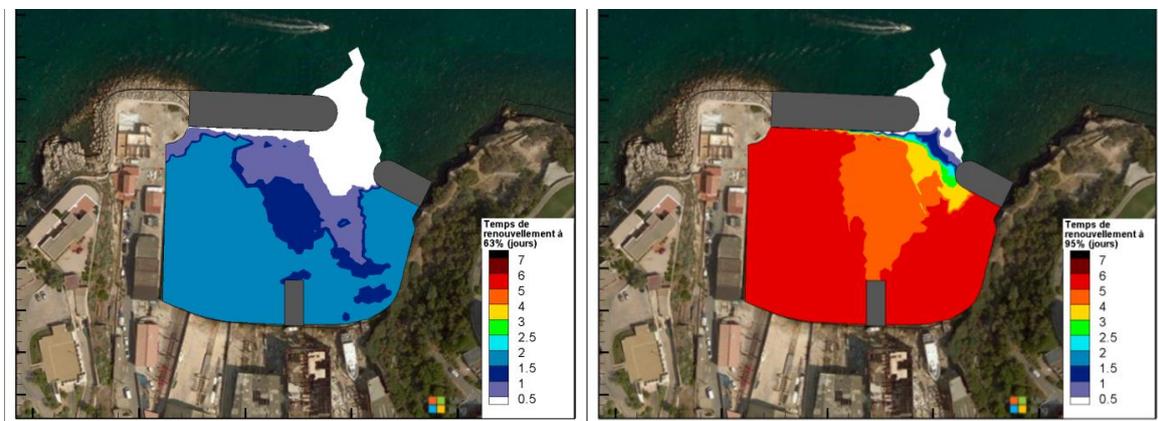


Figure 45 – Temps de renouvellement à 63% (à gauche) et à 95% (à droite) – Condition de Marin

3.3. TEMPS CALME

L'évolution des courants liée à la condition de Marin est explicitée au chapitre C . Les cartographies de la Figure 46 montrent le taux de renouvellement dans l'anse au bout de 1, 2, 3 et 4 jours, à gauche dans la configuration actuelle de l'anse et à droite dans l'état aménagé.

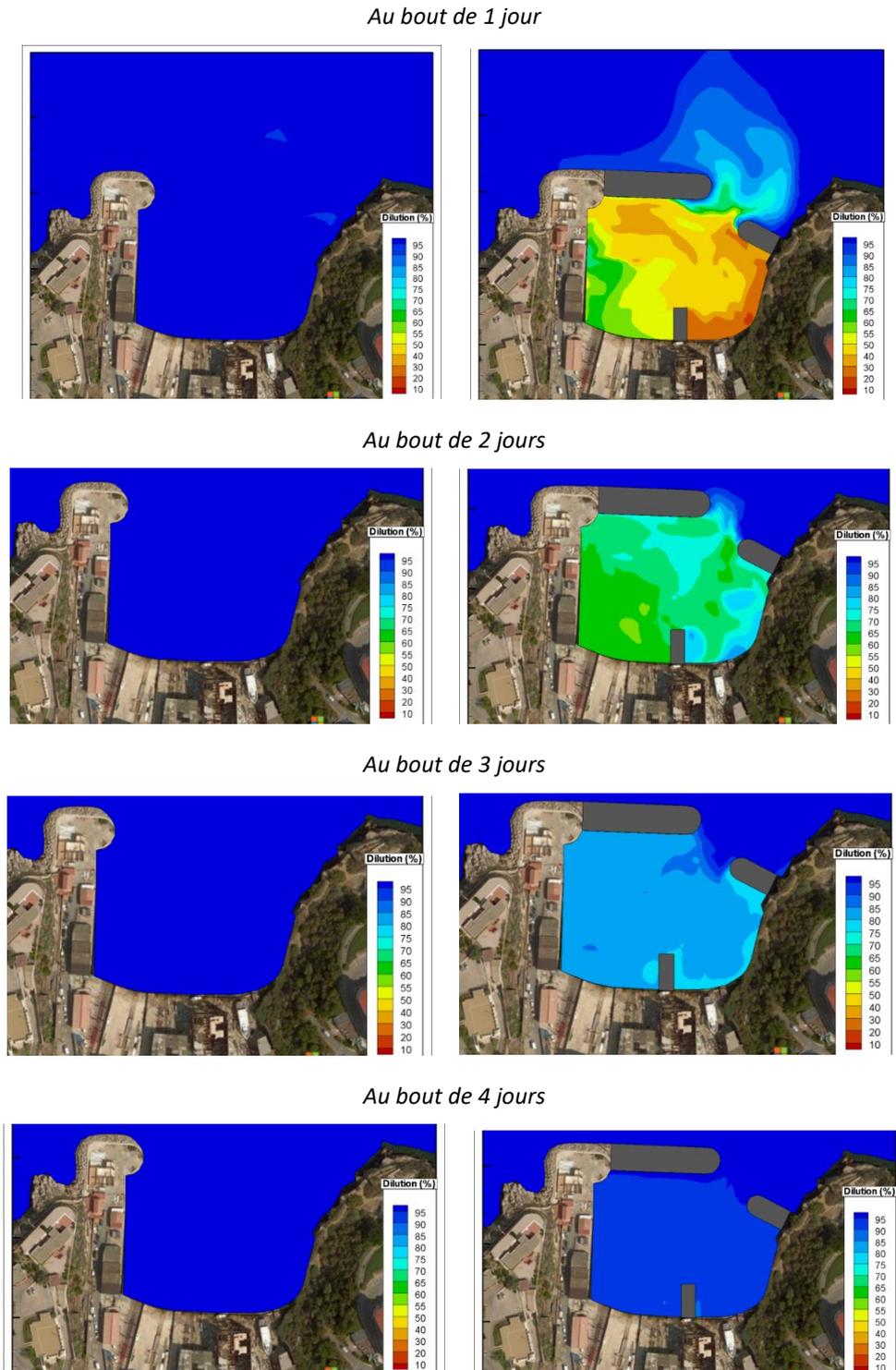


Figure 46 – Cartographies du taux de renouvellement à différents instants – Temps calme (état actuel à gauche, état projet à droite)

Au bout d'1 jour de simulation, le taux de renouvellement est supérieur à 95% dans toute l'anse dans l'état actuel. Dans l'état aménagé, il est inférieur à 55% dans la partie Est de l'anse et inférieur à 70% dans la partie Ouest.

Au bout de 2 jours, le taux de renouvellement est compris entre 60 et 80% dans toute l'anse. Il est supérieur à 80% dans toute la zone au bout de 3 jours et supérieur à 90 % au bout de 4 jours.

La Figure 47 montre l'évolution temporelle du taux de renouvellement moyen dans l'anse (en bas), mis en parallèle avec les conditions de vent sur la simulation. La Figure 48 présente le temps nécessaire pour atteindre les seuils de 63% et 95% en chaque nœud de calcul de l'anse.

Dans la configuration actuelle, le renouvellement moyen dans l'anse évolue linéairement sur les 20 premières heures de simulation, jusqu'à atteindre le seuil de 95%. Dans l'état projet, l'évolution du taux de renouvellement varie en fonction des conditions météorologiques : les périodes où la pente de la courbe est plus raide (signe d'un meilleur renouvellement) correspondent aux instants où le vent est plus important et à l'inverse, le renouvellement est moins fort lorsque le vent se calme.

Dans la configuration projet de l'anse, le taux de renouvellement moyen atteint la valeur seuil de 63% au bout de 1,7 jour et le taux de renouvellement à 95% au bout de 4,7 jours. Ces deux seuils étaient atteints en 12 et 19 heures dans l'état actuel. Les cartographies de la Figure 48 montrent il n'y a pas de zones d'eau stagnantes dans le port.

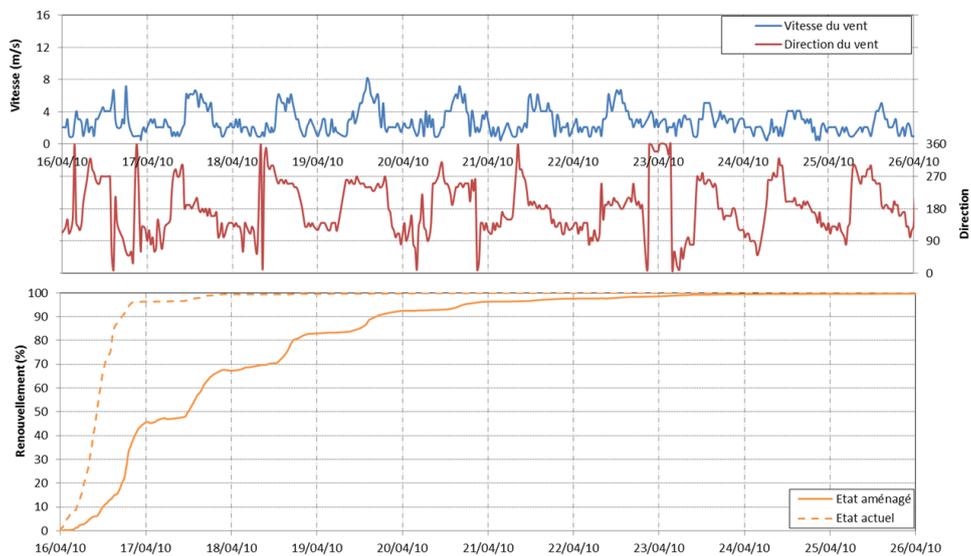


Figure 47 – Evolution temporelle du taux de renouvellement moyen dans l'anse – Temps calme

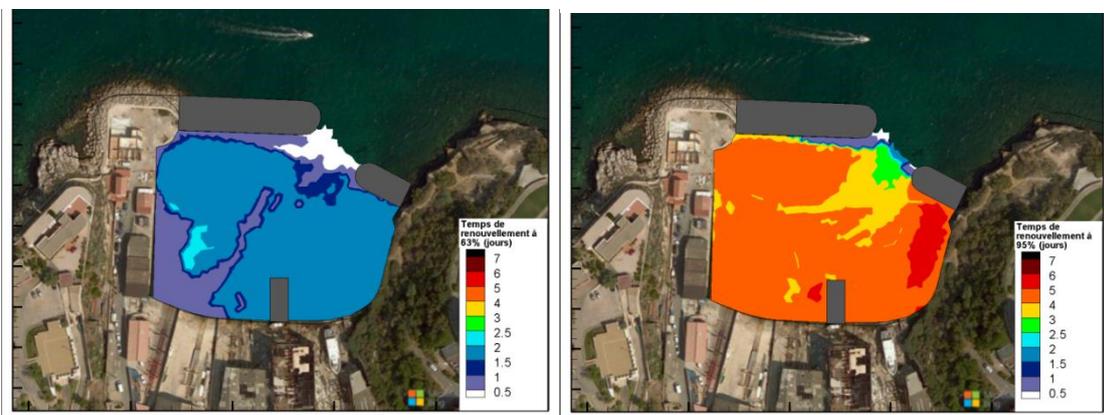


Figure 48 – Cartes du temps de renouvellement à 63% (à gauche) et à 95% (à droite) – Temps calme

3.4. CONCLUSION

Dans la configuration actuelle de l'anse, le renouvellement des eaux est très bon (le temps de renouvellement complet est inférieur à 1 jour) quel que soit les conditions hydro-météorologiques. En effet l'entrée de l'anse est suffisamment large pour permettre une bonne circulation des eaux.

Le projet d'aménagement et les deux digues qui vont être construites à l'entrée de l'anse réduisent les échanges entre l'anse et l'avant-port. Le renouvellement des eaux est alors plus dépendant des conditions hydro-météorologiques. Le renouvellement des eaux est meilleur sur des périodes de vent relativement fort que pour un temps calme.

Le taux de renouvellement des eaux de l'anse est plus faible pour la condition de Marin que par temps calme car cette période est composée de vent d'Est qui pousse la masse d'eau vers la partie Ouest du port et des vents du Sud pour lesquels la masse d'eau est davantage bloquée par la future digue principale. Par temps calme, les vents sont plus faibles mais ils bloquent moins la masse d'eau dans l'anse.

Le tableau suivant récapitule pour chaque scénario d'analyse les temps nécessaires pour atteindre un taux de renouvellement moyen de 63% et 95% dans l'état actuel et l'état projet. La qualité du renouvellement d'eau dans l'état projet selon les critères de l'agence américaine de protection de l'environnement (EPA) et du PIANC sont également indiqués (cf. §1.1).

Tableau 3 – Récapitulatif des temps de renouvellement pour chaque scénario

	Etat actuel		Etat projet			
	Seuil de 63%	Seuil de 95%	Seuil de 63% (critère PIANC)		Seuil de 95% (critère EPA)	
			Temps de renouvellement	Qualité d'eau	Temps de renouvellement	Qualité d'eau
Mistral	13 h	17 h	20 h	Bonne	2,5 jours	Bonne
Marin	2 h	6 h	1,6 jour	Bonne	5,7 jours	Moyenne
Calme	12 h	19 h	1,7 jour	Bonne	4,7 jours	Moyenne

Dans l'état projet, le renouvellement des eaux est bon pour tous les scénarios vis-à-vis du critère de 63% (critère de base du PIANC et il est considéré comme moyen pour 2 scénarios simulés vis-à-vis du critère de 95% (critère de l'agence américaine de l'environnement) et bon pour le troisième scénario. En outre, en considération de la gamme de temps de renouvellement pour laquelle le renouvellement est jugé moyen pour l'agence Américaine (entre 4 et 10 jours), les temps de renouvellement évalués pour les scénarios « Marin » et « Calme » (respectivement 5.7 jours et 4.7 jours) sont assez proches de la limite (4 jours) pour laquelle ils seraient considérés bon, selon ce critère.

D'autre part, quels que soient les critères d'évaluation, par condition de Mistral, qui est la situation largement prédominante sur le site, le renouvellement est toujours qualifié comme bon.

Par ailleurs, Il peut être considéré globalement comme homogène sur l'anse, il n'existe pas de zone d'eau stagnante, ce qui, constitue également un signe de bon renouvellement d'eau.

Ainsi, sur la base de ces résultats, en présence des aménagements envisagés (état projet), le renouvellement en eau de l'Anse du Pharo peut être considéré comme satisfaisant.

En conséquence, il ne semble pas réellement nécessaire d'envisager l'intégration d'un dispositif complémentaire (par exemple de type buse d'avivement) permettant de favoriser le renouvellement en eau.

REFERENCES

- [1] ARTELIA - Création d'un village d'entreprises nautiques à l'anse du Pharo - Phase d'études de diagnostic – rapport relatif à l'étude d'agitation – rapport 871 6186 - R1 - Juin 2021
- [2] ARTELIA - Création d'un village d'entreprises nautiques à l'anse du Pharo - Phase d'études de diagnostic - Diagnostic sédimentaire – Rapport d'analyse – référence 4090021 - Mai 2021
- [3] PIANC report n°98 : « Protecting water quality in marinas », 2008.
- [4] Soulsby, 1997 Dynamics of Marine Sands: A Manual for Practical Applications, publications Thomas Telford