

RIVIERAPORTS

CANNES - GOLFE-JUAN - ANTIBES - NICE - VILLEFRANCHE

un réseau de



Port de Golfe Juan. Amélioration de la qualité des eaux portuaires par renouvellement des eaux

Annexe 3 du formulaire cas par cas Modélisation de la circulation - Rapport de présentation et estimation (avant-projet)



Hydrodynamique et génie côtier
772 chemin du Flaquier Nord
06530 Le Tignet
Tel : 06 32 36 56 92



Date : juin 2018



SOMMAIRE

1	OBJET	4
2	LES DONNEES NATURELLES	7
2.1	PREAMBULE	7
2.2	LA BATHYMETRIE	7
2.3	LE NIVEAU D'EAU	8
2.4	VOLUMES D'EAU	13
3	OBJECTIFS DE RENOUVELLEMENT	13
4	MODELE NUMERIQUE DE CIRCULATION DES EAUX	16
4.1	PRESENTATION DU MODELE DELFT-3D	16
4.2	QUELQUES CONFIGURATIONS D'INJECTION D'EAU RENOUVELEE	17
4.2.1	<i>Rejet à travers la buse existante</i>	17
4.2.2	<i>Coude en sortie de buse</i>	19
4.2.3	<i>Tuyau de diffusion du rejet en sortie de buse</i>	21
4.2.4	<i>Tuyau de diffusion associé à un agitateur au coin Nord-Est</i>	23
4.3	SYNTHESE ET ENSEIGNEMENT DES PREMIERS RESULTATS	28
4.4	LES CONTRAINTES D'EXPLOITATION DU PORT	29
4.4.1	<i>Installation de la conduite-diffuseur</i>	29
4.4.2	<i>Installation de l'hélice de brassage</i>	30
5	CONCEPTION DU DISPOSITIF DE CIRCULATION	31
5.1	AJUSTEMENT DE LA POSITION DES POINTS DE SORTIE	31
5.2	ECOULEMENT HYDRAULIQUE SUR QUATRE SORTIES ET TAUX DE RENOUVELLEMENT	31
5.3	NOTION DE PERTES DE CHARGE HYDRAULIQUES	36
5.3.1	<i>Pertes de charge singulières</i>	36
5.3.2	<i>Pertes de charge linéiques</i>	39
5.4	CIRCUIT HYDRAULIQUE DE L'EXTERIEUR VERS LE BASSIN PORTUAIRE	39
5.4.1	<i>Dispositif existant</i>	39
5.4.2	<i>Prise d'eau et circuit d'amenée</i>	42
5.4.3	<i>Puits de transition ou double-coudes</i>	43
5.4.4	<i>Conduite diffuseur ensouillée</i>	44
5.5	INTEGRATION DES PERTES DE CHARGE GLOBALES	48
5.6	EFFETS DES ALTERNATIVES SUR LES PERTES DE CHARGE	52
5.7	CARACTERISTIQUES DES JETS HYDRAULIQUES	52
5.7.1	<i>Hélice de brassage</i>	52
5.7.2	<i>Sortie de diffuseur</i>	53
6	SYNTHESE DES OUVRAGES ET DISPOSITIFS	54
7	ESTIMATION DES COUTS DE TRAVAUX	55
8	REFERENCES	56

1 OBJET

Les eaux du bassin du vieux port de Golfe Juan souffrent d'un manque de renouvellement. Le bassin portuaire est naturellement très peu agité, protégé par les îles de Lérins et le Cap d'Antibes. La construction du port Camille Rayon côté Est, en 1989, a apporté une protection supplémentaire.

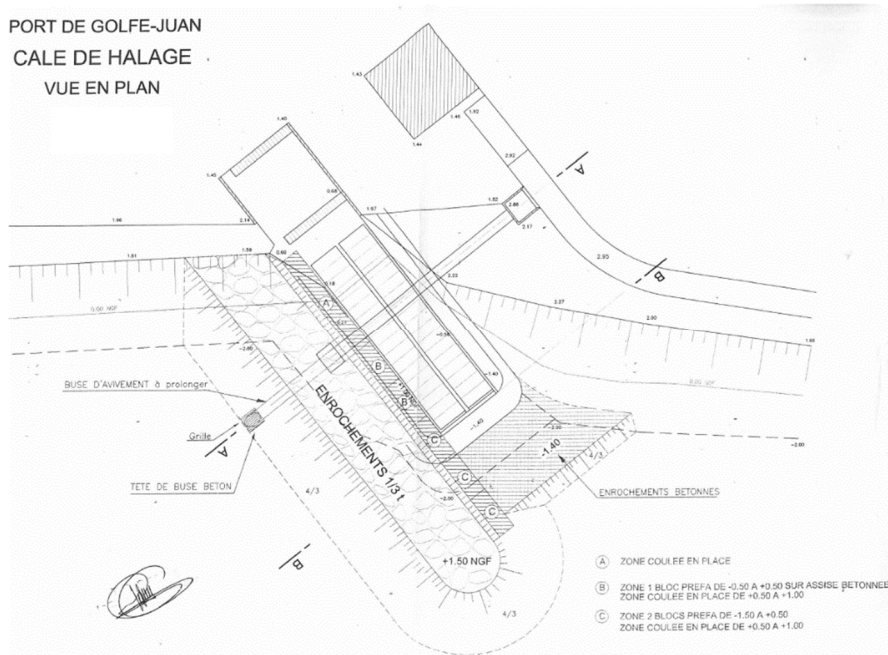
Le quai poids de la digue principale est constitué de blocs disjoints, qui à l'origine laissaient circuler les eaux entre l'intérieur et l'extérieur du bassin à travers des fentes de quelques cm de large sur toute la hauteur du quai. Ces fentes ont été bouchées, il y a près de vingt ans, à l'occasion de l'élargissement des quais, dont les travaux ont consisté à battre un rideau de palplanches étanche, surmonté d'un couronnement en béton devant le quai poids.

Une buse d'avivement reliant le bassin à l'extérieur au niveau de l'enracinement de la digue principale a été mise en place. Celle-ci était équipée d'un agitateur qui a pu être actionné de temps en temps il y a quelques années. Le dispositif avait pour vocation de renouveler partiellement les eaux du bassin portuaire, en faisant transiter les eaux de l'extérieur vers l'intérieur.

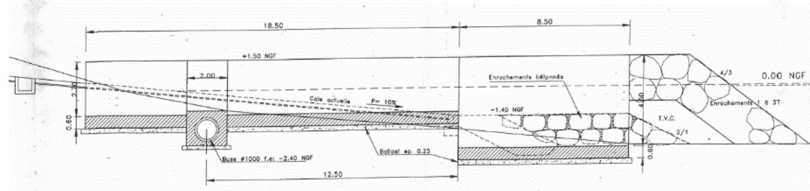


Buse d'avivement existante, diamètre 1000mm

L'entretien de l'agitateur n'ayant pas été prolongé, l'avivement n'est plus effectif dans cette zone. De mémoire d'exploitant, la buse en fonctionnement n'empêchait pas la dégradation de la qualité des eaux sur l'ensemble du bassin, mais apportait une amélioration locale. Par ailleurs, l'emploi de l'agitateur pouvait créer un soulèvement de vase ou des remises en suspension venant assombrir de façon spectaculaire le plan d'eau local soumis à l'action du jet, ce qui avait pour conséquence de limiter son utilisation. Renseignements pris auprès de la société de plongeurs professionnels ayant contribué aux travaux et maîtrisant l'historique des différentes configurations, il s'avère que l'ouvrage de prise d'eau se situe très près du fond, et que la conduite sous-marine a tendance à s'ensaver et même s'engraver. Les plans de projet de la buse présentés ci-après confirment la position basse de la grille de prise d'eau.



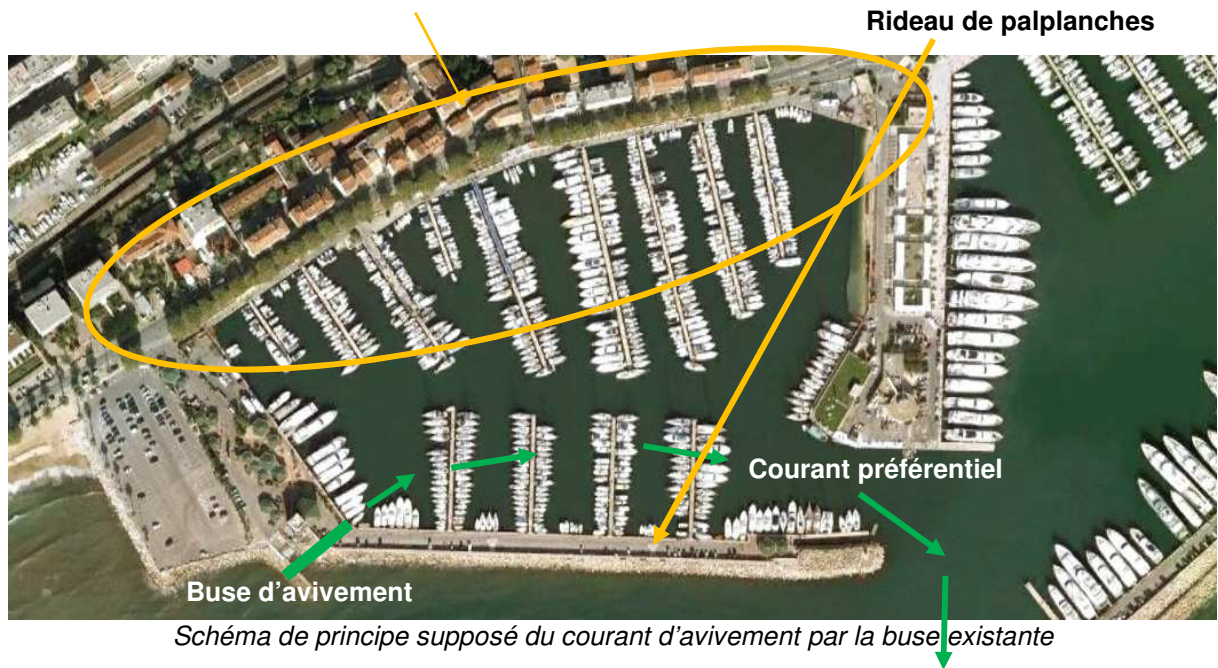
Implantation de la buse d'avivement existante



Coupe en travers de la buse $\phi 1000$

Par un raisonnement hydraulique simple, on peut logiquement supposer que le courant d'avivement depuis l'enracinement de la digue trouve un chemin préférentiel directement vers la passe, si bien que la zone Nord du bassin, à la fois la moins profonde et la plus sujette à la stagnation des eaux et au dépôt de vase, n'est pas renouvelée.

**Zone classée comme fortement stagnante
d'après les observations**



RIVIEIRA PORTS au sein de la CCI Nice Côte d'Azur, en charge de l'exploitation du port, a engagé des travaux de recherche sur le site pilote de Golfe Juan pour tenter d'améliorer la qualité des eaux, en faisant assimiler une partie des matières organiques contenues dans la vase par des bactéries, spécifiquement apportées. L'objectif était également de retrouver des profondeurs plus élevées dans le bassin portuaire, en favorisant le tassement des vases par élimination des matières organiques. Après plusieurs expérimentations par ce procédé novateur, une augmentation de tirant d'eau a apparemment été observée, mais les résultats réellement obtenus n'ont pas été à la hauteur de ceux escomptés.

RIVIEIRA PORTS souhaite aujourd'hui se diriger vers des recherches de solutions plus classiques basées sur le renouvellement des eaux portuaires. Il ne s'agit pas de tenter de récupérer du tirant d'eau, mais d'assurer une circulation suffisante pour maintenir une bonne qualité des eaux : clarté du plan d'eau, développements algaux limités, réduction des risques d'anoxie ou de stratification locale.

La solution de renouvellement systématique est certainement efficace. Elle impliquerait de remettre en service la buse d'avivement avec un agitateur approprié, mais surtout de forcer le courant à circuler vers le fond du bassin, au lieu de renouveler uniquement le chenal le long de la digue principale, comme cela a pu être le cas par le passé.

Le groupement HydroGC - Pierre Louis Ing. Conseils a été retenu pour réaliser l'étude numérique de circulation des eaux permettant d'identifier les besoins en termes de dispositifs hydrauliques pour forcer la circulation. L'étude théorique réalisée à l'aide de simulations numériques, doit être complétée par une étude de conception mécanique détaillée aboutissant à la rédaction d'un dossier de consultation des entreprises.

Cette note présente l'étude théorique de circulation des eaux, permettant de justifier des choix des dispositifs hydrauliques. Elle s'articule autour des chapitres suivants :

- le recensement des données naturelles pertinentes au regard du problème de circulation ;
- les objectifs réalistes en termes de taux de renouvellement ;
- la modélisation numérique de la circulation des eaux dans le bassin portuaire ;
- le choix d'un dispositif hydraulique approprié.

2 LES DONNEES NATURELLES

2.1 PREAMBULE

Les houles pénétrant dans le port sont réputées très faibles, aucune agitation intempestive n'ayant été observée, notamment depuis la construction du port Camille Rayon à la fin des années 1980.

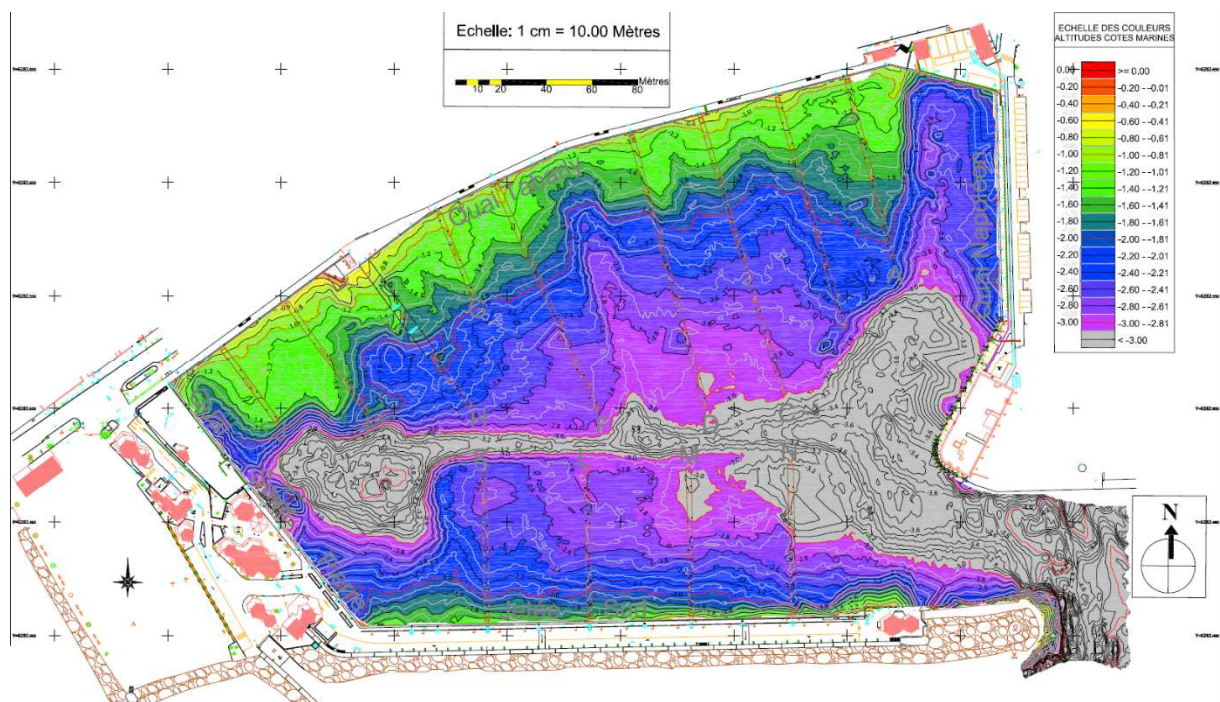
Les courants généraux ou la marée sont des facteurs de renouvellement des eaux du bassin. Les courants généraux sont très faibles à l'approche des côtes, et ils ne pénètrent pas dans un réservoir fermé comme un bassin portuaire. La marée apporte un certain renouvellement, de l'ordre de +/-0.15m toutes les 12.5h, soit environ 10% du volume d'eau portuaire toutes les demi-journées. La marée renouvellerait l'eau du port au minimum en 5 jours environ, ce qui n'est visiblement pas suffisant, au moins en période estivale.

Les vents locaux sont un facteur de circulation des eaux dans le bassin. Ils peuvent créer des écoulements de quelques cm/s en surface, lorsqu'ils sont soutenus. Un courant de surface entrant dans un bassin portuaire est accompagné d'un courant de fond sortant, selon le principe physique de la conservation des masses dans la mesure où les eaux entrantes en s'accumulent pas dans le bassin. Les vents soutenus peuvent par conséquent renouveler l'eau du bassin.

Dans le cadre de cette étude, on s'intéresse aux périodes de calme, très fréquentes sur la Côte d'Azur, pour lesquelles l'eau du bassin portuaire n'est pas assez renouvelée naturellement. On se base par conséquent sur des situations sans vent, la marée et les courants généraux étant négligés. Les principales données naturelles à détailler pour la modélisation sont la bathymétrie et le niveau d'eau.

2.2 LA BATHYMETRIE

Des relevés bathymétriques fins ont été réalisés en 2015 par la société GeoCarteau dans le cadre des traitements microbiologiques des vases. On retient le relevé effectué en octobre 2015 à la suite des traitements.



Relevé bathymétrique octobre 2015 (source Riviera Ports), référence 0m CM

Il y a en général au moins 2m à 3m d'eau dans le bassin portuaire, excepté au droit des quais Nord et Sud. On peut observer moins d'un mètre d'eau au pied du quai Nord, partie la plus sensible en termes de qualité et de clarté d'eau.

2.3 LE NIVEAU D'EAU

Le phénomène de marée engendre un marnage semi-diurne et diurne de faible amplitude, 20cm à 45cm sur les côtes méditerranéennes françaises. Le niveau d'eau moyen sur la côte d'azur est égal à 0.48m CM d'après l'ouvrage de marée publié par le SHOM [6]. Les niveaux de marées astronomiques sont compris entre 0.22m CM et 0.70m CM, soit 48cm de marnage maximum.

A Nice ou Monaco, le niveau de référence 0m NGF se situe environ 0.33m au-dessus du niveau des plus basses mers 0m CM des cartes marines [6]. La marée sur la côte d'azur évolue donc entre -0.11m NGF et 0.37m NGF, pour un niveau moyen égal à 0.15m NGF.

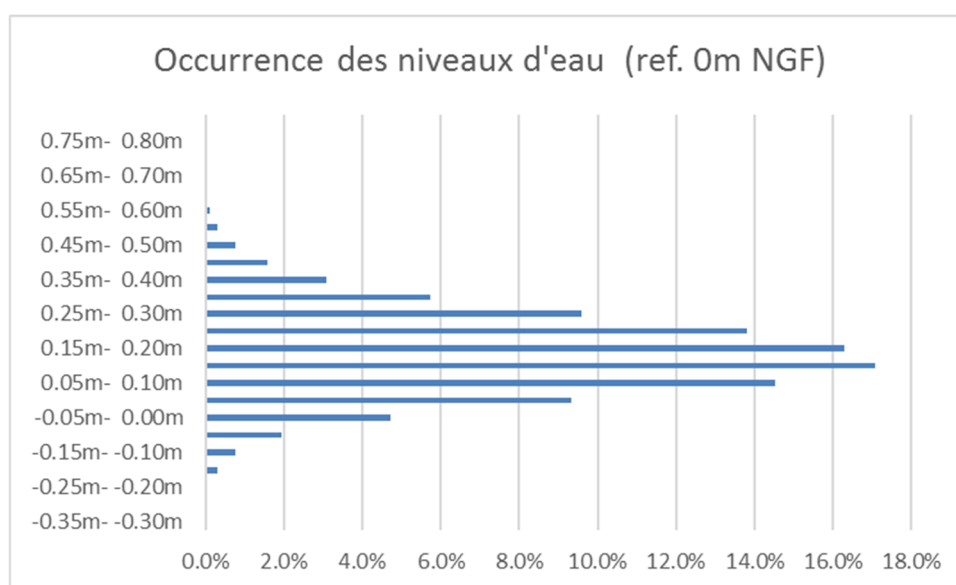
A ces fluctuations périodiques sur 12.5 à 25 heures, s'ajoutent les oscillations plus ou moins rapides qui accompagnent les variations de pression atmosphérique lors des périodes anticycloniques ou dépressionnaires. Les vents de mer, qui repoussent les eaux vers le littoral, ou au fond des baies, créent également une surcote supplémentaire.

L'analyse des données marégraphiques disponibles à Nice, Monaco ou à la Figueirette (librairie en ligne REFMAR, SHOM) permet de constater ce qui suit :

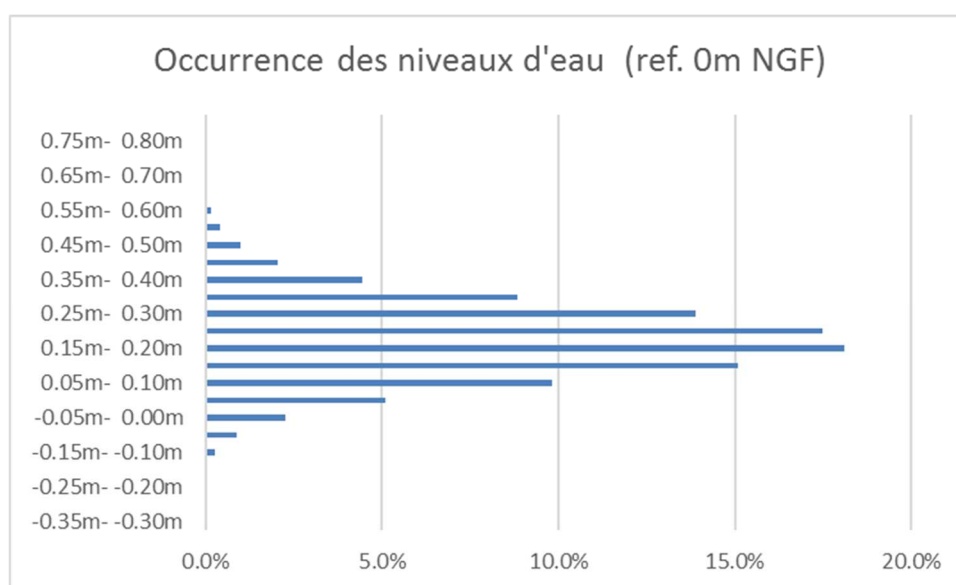
- La cote 0.37m NGF, soit la marée astronomique la plus élevée, est dépassée régulièrement chaque année sous l'effet des dépressions et vents. On note environ dix périodes indépendantes dans l'année, chacune pouvant parfois durer plusieurs jours, où le niveau d'eau est supérieur à cette cote.
- La cote 0.58m NGF est plus rare. Elle est en moyenne dépassée une fois par an.
- La plus grosse surcote observée entre 1998 et aujourd'hui est de 0.72m NGF. Elle coïncide avec la tempête du 1^{er} janvier 2010. Cette cote n'aurait d'ailleurs pas été dépassée depuis les années 1960 si on se réfère aux données format papier du marégraphe de Monaco.

Dans le tableau ci-après, on a reporté les occurrences du niveau d'eau mesuré aux marégraphes de Monaco et de la Figueirette, lesquels entourent le site de Golfe Juan.

Occurrence des niveaux d'eau sur la côte d'azur (Monaco, 23.9 ans depuis 1959)		
Classe de niveau d'eau ref. NGF	% du temps	% cumulé
-0.35m- -0.30m	0.000%	0.000%
-0.30m- -0.25m	0.002%	0.002%
-0.25m- -0.20m	0.046%	0.049%
-0.20m- -0.15m	0.308%	0.357%
-0.15m- -0.10m	0.767%	1.124%
-0.10m- -0.05m	1.956%	3.080%
-0.05m- 0.00m	4.713%	7.793%
0.00m- 0.05m	9.322%	17.115%
0.05m- 0.10m	14.517%	31.632%
0.10m- 0.15m	17.089%	48.721%
0.15m- 0.20m	16.293%	65.013%
0.20m- 0.25m	13.798%	78.811%
0.25m- 0.30m	9.597%	88.408%
0.30m- 0.35m	5.722%	94.130%
0.35m- 0.40m	3.076%	97.207%
0.40m- 0.45m	1.592%	98.799%
0.45m- 0.50m	0.755%	99.554%
0.50m- 0.55m	0.312%	99.866%
0.55m- 0.60m	0.097%	99.963%
0.60m- 0.65m	0.030%	99.993%
0.65m- 0.70m	0.006%	99.999%
0.70m- 0.75m	0.001%	100.000%
0.75m- 0.80m	0.000%	100.000%
0.80m- 0.85m	0.000%	100.000%



Occurrence des niveaux d'eau sur la côte d'azur (Figueirette, 5.5 ans depuis 2011)		
Classe de niveau d'eau ref. NGF	% du temps	% cumulé
-0.35m- -0.30m	0.000%	0.000%
-0.30m- -0.25m	0.000%	0.000%
-0.25m- -0.20m	0.000%	0.000%
-0.20m- -0.15m	0.068%	0.068%
-0.15m- -0.10m	0.286%	0.355%
-0.10m- -0.05m	0.905%	1.260%
-0.05m- 0.00m	2.273%	3.532%
0.00m- 0.05m	5.116%	8.648%
0.05m- 0.10m	9.812%	18.460%
0.10m- 0.15m	15.094%	33.555%
0.15m- 0.20m	18.106%	51.660%
0.20m- 0.25m	17.500%	69.160%
0.25m- 0.30m	13.888%	83.048%
0.30m- 0.35m	8.854%	91.902%
0.35m- 0.40m	4.443%	96.345%
0.40m- 0.45m	2.036%	98.381%
0.45m- 0.50m	1.002%	99.384%
0.50m- 0.55m	0.434%	99.817%
0.55m- 0.60m	0.149%	99.967%
0.60m- 0.65m	0.031%	99.998%
0.65m- 0.70m	0.002%	100.000%
0.70m- 0.75m	0.000%	100.000%
0.75m- 0.80m	0.000%	100.000%
0.80m- 0.85m	0.000%	100.000%



Les statistiques annuelles à Monaco et à la Figueirette sont relativement proches, à quelques cm près. Le niveau médian, également proche du niveau moyen sur l'année, se situe vers 0.15m NGF.

A titre d'information, nous avons extrait des données marégraphiques la liste des niveaux d'eau maximaux atteints sur les périodes disponibles.

Niveaux d'eau exceptionnels observés à Monaco sur 1960-1963, 1999-2017 (23.9ans)		
15-janv.-1960	0.58m NGF	0.91m CM
5-nov.-1960	0.55m NGF	0.88m CM
9-nov.-1962	0.62m NGF	0.95m CM
3-janv.-1963	0.57m NGF	0.90m CM
11-févr.-1963	0.56m NGF	0.89m CM
6-nov.-1963	0.64m NGF	0.97m CM
16-nov.-1963	0.55m NGF	0.88m CM
5-déc.-1963	0.57m NGF	0.90m CM
20-déc.-1963	0.61m NGF	0.94m CM
27-déc.-2000	0.64m NGF	0.97m CM
16-nov.-2002	0.58m NGF	0.91m CM
22-nov.-2002	0.58m NGF	0.91m CM
1-déc.-2008	0.59m NGF	0.92m CM
16-déc.-2008	0.56m NGF	0.89m CM
7-févr.-2009	0.64m NGF	0.97m CM
22-déc.-2009	0.59m NGF	0.92m CM
1-janv.-2010	0.72m NGF	1.05m CM
11-janv.-2016	0.56m NGF	0.89m CM
28-févr.-2010	0.59m NGF	0.92m CM
10-nov.-2010	0.59m NGF	0.92m CM
24-nov.-2010	0.57m NGF	0.90m CM
1-déc.-2010	0.61m NGF	0.94m CM
8-déc.-2010	0.56m NGF	0.89m CM
24-déc.-2010	0.68m NGF	1.01m CM
27-oct.-2012	0.65m NGF	0.98m CM
31-oct.-2012	0.65m NGF	0.98m CM
29-nov.-2012	0.57m NGF	0.90m CM
17-nov.-2014	0.57m NGF	0.90m CM
28-nov.-2014	0.58m NGF	0.91m CM
11-janv.-2016	0.56m NGF	0.89m CM

Niveaux d'eau exceptionnels observés à la Figueirette entre 2011 et 2017 (5.5ans)		
5-nov.-2011	0.56m NGF	0.89m CM
31-oct.-2012	0.67m NGF	1.00m CM
4-nov.-2012	0.55m NGF	0.88m CM
29-nov.-2012	0.61m NGF	0.94m CM
4-nov.-2014	0.56m NGF	0.89m CM
15-nov.-2014	0.58m NGF	0.91m CM
1-déc.-2014	0.62m NGF	0.95m CM
11-janv.-2016	0.57m NGF	0.90m CM
14-oct.-2016	0.58m NGF	0.91m CM

Le niveau d'eau dépassé en moyenne une fois par an est environ 0.58m NGF pour les deux sites.

Le CETMEF a publié une analyse des surcotes par vent et dépression en dehors des effets de marée sur plusieurs sites des côtes françaises [2] [3]. L'analyse a été faite à Nice et à Monaco, conduisant sensiblement au même résultat. La surcote annuelle est estimée à 0.30m. La surcote d'occurrence rare centennale est estimée à 0.68m (valeur modale extrapolée), pouvant atteindre 0.77m à 70% d'intervalle de confiance.

Il faut également tenir compte de la montée du niveau général des océans attendue dans les décennies à venir, variant de 0.4m jusqu'à 1.0m en hypothèse extrême à l'horizon 2100. Les dernières hypothèses avancées par le GIEC [7] dans un des scénarii les plus pessimistes, RCP8.5, indiqueraient une valeur de +0.35m à l'horizon 2060 et 0.75m à l'horizon 2100. Ces valeurs ont récemment été retenues dans le cadre de projet de l'extension urbaine de Monaco.

Pour évaluer la surcote potentielle, nous avons adopté l'approche suivante :

- retenir le niveau de marée de pleine mer associé au niveau d'eau et à la surcote dépassée une fois par an, soit 0.28m NGF (marée) + 0.3m (surcote) = 0.58m NGF ;
- ajouter la surcote de projet évaluée par le CETMEF (valeur modale extrapolée) à la valeur de marée haute 0.28m NGF ;
- évaluer les surcotes attendues à l'horizon 20160 en ajoutant 35cm.

Il en ressort les valeurs suivantes :

Estimation des niveaux d'eau hauts de projet entre Monaco et Théoule				
Période de retour	Surcote	Niveau de marée associé	Niveau d'eau haut de projet	Niveau d'eau haut de projet horizon 2060
1 an	0.30m	0.28m NGF	0.58m NGF	0.93m NGF
10 ans	0.49m	0.28m NGF	0.77m NGF	1.12m NGF
50 ans	0.62m	0.28m NGF	0.90m NGF	1.25m NGF
100 ans	0.68m	0.28m NGF	0.96m NGF	1.31m NGF
Extrême (100 ans 70%)	0.77m	0.28m NGF	1.05m NGF	1.40m NGF

L'approche est conservatrice dans la mesure où les valeurs sur une période de retour de 10 ans dépassent ce qui a été réellement observé depuis 1999.

2.4 VOLUMES D'EAU

Notre analyse après intégration de la bathymétrie en modèle numérique conduit aux volumes d'eau contenus dans le bassin suivants :

Niveau d'eau	Volume du bassin portuaire
0m CM (-0.33m NGF)	148 000 m ³
0m NGF	169 000 m ³
0.15m NGF (niveau moyen)	178 000 m ³

3 OBJECTIFS DE RENOUVELLEMENT

Le développement prononcé d'algues est un phénomène qui apparaît généralement dans les eaux stagnantes des zones confinées. Dans les couches supérieures les plus chaudes, les algues absorbent l'oxygène présent dans l'eau la nuit, ainsi que celui provenant de l'interface air-eau. L'oxygène est à nouveau produit par photosynthèse le jour, mais il se disperse difficilement vers le fond si les eaux sont stagnantes. Le milieu s'enrichit en matière organique en surface. Le phénomène peut être accentué par des apports nutritifs, parfois surabondant ou extérieur, on parle dans ce cas d'eutrophisation. Le développement algal s'accompagne logiquement d'une dégradation des algues mortes et des organismes, lesquels coulent généralement jusqu'au fond. La décomposition des algues mortes entraîne une augmentation de l'activité microbienne qui consomme à son tour l'oxygène dissous. Il en résulte parfois l'apparition d'une chimiocline, qui vient aggraver le phénomène de stratification des eaux inhibant les échanges verticaux. Les eaux de surface peuvent même être en sursaturation d'oxygène dissous (le jour) alors que l'on observe un manque d'oxygène dans les eaux plus profondes. On parle alors de « dystrophisation ». Moins les eaux sont renouvelées, plus le phénomène s'auto-entretient. Le stade ultime s'accompagne d'une anoxie dans les couches plus profondes, pour lesquelles l'apport d'oxygène n'est plus assuré, les fonds deviennent alors abiotiques. L'anoxie empêche la décomposition saine des algues mortes, engendrant des nuisances olfactives. Ce stade ultime n'aurait visiblement pas encore été atteint dans le bassin portuaire du port de Golfe Juan, où l'on observe des eaux très vertes et très opaques, mais où l'on ne ressent pas d'odeurs de décompositions anaérobies. Les fonds de l'ordre de 2 à 3m seulement ne permettraient pas la séparation des teneurs en oxygène sur la colonne d'eau. En revanche, une forte prolifération algale, en principe accompagnée de matières organiques en dégradation, vient nettement opacifier l'eau en été.

L'eau opacifiée dans le bassin portuaire pourrait s'éclaircir en favorisant le mélange et la réoxygénation. Il s'agirait, par exemple, d'entretenir un simple brassage en maintenant un écoulement dit « turbulent » sur la colonne d'eau. En mécanique des fluides, cela revient à assurer un écoulement dont le nombre de Reynolds,

$$Re = \frac{VL}{\nu}$$

V : vitesse de l'écoulement

L : longueur caractéristique de l'écoulement (ici la profondeur 2m à 3m)

ν : viscosité cinématique de l'eau ($\approx 1.0E^{-6}m^2/s$ vers $T=20^{\circ}C$)

est au minimum de l'ordre de 1000. Cela revient à assurer des vitesses de l'ordre de 1cm/s, voire 0.5cm/s dans le bassin. Les eaux du bassin Camille Rayon sont localement brassées par des agitateurs. Les dispositifs spécifiques du port Camille Rayon permettent par ailleurs d'aspirer de l'air et de le réinjecter sous forme de bulles dans le courant créé, de manière à forcer encore un peu plus l'oxygénation de l'eau. Le dispositif de brassage est efficace dans sa zone locale d'action uniquement. Ceux de Camille Rayon sont activés par période d'un ¼ heure toutes les heures, dans les plages horaires où le bruit n'est pas trop gênant.

Le simple brassage, faisant circuler l'eau sur place, est moins efficace qu'un véritable renouvellement des eaux, c'est-à-dire un apport d'eau fraîche extérieure au milieu confiné. Le renouvellement, s'il est au moins aussi rapide que le taux de prolifération des algues, est un moyen sûr de conserver une eau relativement claire. Le renouvellement assurera également une certaine efficacité de qualité d'eau, si le courant qu'il crée se maintient dans les régimes dits turbulents.

le renouvellement d'un bassin par de l'eau fraîche extérieure peut être quantifié par le taux de renouvellement, c'est-à-dire le pourcentage d'eau nouvelle apportée sur une période donnée. On parle aussi de temps de renouvellement, c'est-à-dire la période pour laquelle un certain pourcentage du volume d'un milieu confiné est remplacé. Dans le cas du bassin de Golfe Juan, ces taux ou temps de renouvellement seraient à comparer les taux ou temps de prolifération potentielle des algues. Dans l'absolu, il n'existe pas de temps de renouvellement toujours capables d'assurer une eau claire. Cela dépend bien sûr des conditions de chaleur ou d'apports potentiels de nutriments. Cela dépend aussi du volume même du bassin. Pour un même débit d'eau fraîche injecté, un très grand bassin sera renouvelé plus lentement qu'un petit bassin, mais pourtant, les deux bassins seront traversés par un courant de même intensité offrant les mêmes capacités de mélanges turbulents avec la même efficacité potentielle en termes de qualité d'eau. Toutes les approches théoriques sur les renouvellements des eaux sont fondées sur des comparaisons par rapport à une situation existante ou se contentent d'ordres de grandeur.

Les récentes réflexions sur la qualité des eaux autour de la future extension urbaine de Monaco ont pris comme référence la prolifération potentielle d'une algue toxique, qui serait une référence témoin [10]. Il s'agit d'un phytoplancton de type dinoflagellé, *Ostreopsis cf. ovata*, pour lequel on dispose de données sur les taux de prolifération en Méditerranée [8] [9] [11]. Les lois classiques de régénération d'éléments vivants de concentration C sont des lois du premier ordre du type :

$$\frac{dC}{dt} = \mu C$$

C : concentration de l'élément considéré

μ : taux de croissance

Après intégration de l'équation de base ci-dessus, on obtient :

$$\int_{C_0}^C \frac{dC}{C} = \int_{t_0}^t \mu dt$$

soit :

$$\frac{C}{C_0} = e^{\mu(t-t_0)}$$

C : concentration à l'instant t

C_0 : concentration à l'instant t_0

La prolifération des éléments est associée à la période de division des cellules vivantes, c'est-à-dire la période T_g au cours de laquelle une cellule se divise pour donner naissance à deux cellules. Le temps T_g se rattache par définition au taux de croissance μ par l'expression suivante :

$$\frac{C}{C_0} = 2 = e^{\mu T_g}$$

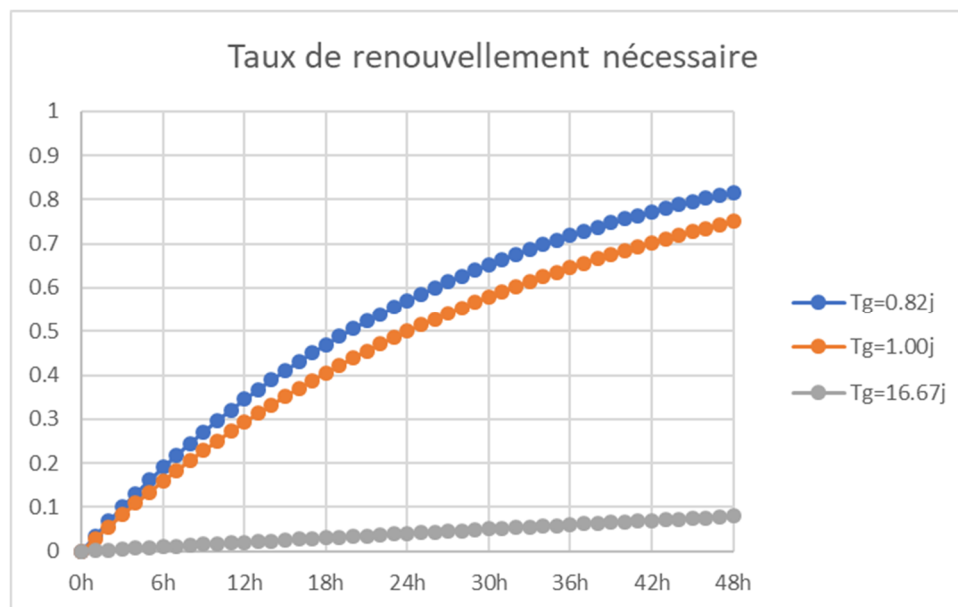
soit

$$\ln 2 = \mu T_g \text{ ou } \mu = \frac{\ln 2}{T_g}$$

Les périodes de doublement pour l'*Ostreopsis* en Méditerranée sont évaluées entre $T_g = 16.6j$ pour les plus longues et $T_g = 0.82j$ pour les plus courtes, lorsque les conditions sont favorables pour la prolifération. Ceci correspond à un taux de croissance μ compris entre $0.041 j^{-1}$ et $0.85 j^{-1}$ en référence à l'expression ci-dessus.

Pour pouvoir contrer une prolifération d'algues ayant un taux de croissance défavorable $\mu = 0.85 j^{-1}$, le taux de renouvellement des eaux doit suivre une loi exponentielle de signe opposée de type $e^{-\mu t}$. Sur le graphe ci-après, on a tracé les taux de renouvellement cibles à atteindre pour contrer les taux de prolifération théoriques suivants exprimés sous la forme de périodes de division :

$$\begin{aligned} T_g &= 0.82j \\ T_g &= 1.00j \\ T_g &= 16.67j \end{aligned}$$



Il faudrait renouveler le bassin sur au moins 70%-80% en 48h pour faire face à une prolifération d'algues ayant des périodes de division de 0.82j à 1j, soit 1.22 à 1 division par jour. On vise au taux de renouvellement global d'au moins 80% sur 48h.

Ce taux serait cohérent par rapport à d'autres expériences portuaires passées (Royal Court en Jordanie par exemple), où l'on sait qu'un renouvellement du bassin de l'ordre de 24h à 48h permet de maintenir une très bonne qualité d'eau.

Le volume du bassin portuaire étant de 178 000 m³, les débits à faire transiter à travers la conduite $\Phi 1000$ existante selon les temps recherchés sont les suivants :

Temps de renouvellement	Débit pour renouveler 178 000 m ³ (0.15m NGF)
Renouvellement en 24h	Q=2.06m ³ /s
Renouvellement en 48h	Q=1.03m ³ /s

Le dispositif déjà installé puis démantelé était une pompe à hélice Flygt 4501 de diamètre 0.8m environ, capable de propulser environ 1 m³/s pour une perte de charge ne dépassant pas $\Delta H \approx 1$ m. Les agitateurs actuels (ou pompes à hélice) les plus puissants offrent des possibilités légèrement meilleures mais dans les mêmes ordres de grandeur. Pour un débit Q=2m³/s et les pertes de charge associées, il faudrait utiliser une gamme de matériel bien supérieure.

Selon les hypothèses énoncées ci-dessus, lesquelles restent relativement théoriques au regard des nombreux critères de prolifération des phytoplanctons, on conserve l'objectif d'un renouvellement du bassin en 48h avec un débit de l'ordre de 1 m³/s.

Il est probable qu'un tel renouvellement doit être activé en continu dans les périodes les plus chaudes de l'été. Selon les circonstances, des pics de prolifération resteraient potentiellement possibles, mais dans tous les cas, largement atténués par rapport à la situation actuelle.

4 MODELE NUMERIQUE DE CIRCULATION DES EAUX

4.1 PRESENTATION DU MODELE DELFT-3D

Les simulations ont été réalisées à l'aide de la suite logicielle Delft3D développé par Deltares (Pays-Bas). Delft3D est une suite logicielle unique, entièrement intégrée pour une approche pluridisciplinaire et de modélisation 3D pour les zones côtières, la rivière et les zones estuariennes.

Delft3D est un programme de simulation multidimensionnel (2D ou 3D) permettant de simuler les écoulements hydrodynamiques et de nombreux transports associés. Les équations de Navier-Stokes sont résolues sous l'hypothèse des fluides incompressibles, en admettant l'hypothèse des eaux peu profondes au regard de l'échelle des circulations horizontales. Cela signifie que les accélérations sur l'axe vertical sont négligées, ce qui est compatible avec les écoulements de type circulations marines ou débouchés d'estuaire.

La modélisation réalisée dans le cadre de cette étude est fondée sur les principes suivants :

- Ecoulements générés uniquement par les apports extérieurs d'eau à travers la buse ou par des agitateurs. Les faibles effets de la marée ou courants naturels sous l'effet du vent sont volontairement négligés. Ces derniers améliorent légèrement le taux de renouvellement. On cherche surtout à comparer des scénarii faisant varier les dispositifs de renouvellement, avec une situation de fond très défavorable, supposée au repos complet.
- L'apport d'eau extérieur est modélisé à l'aide de sources fluides ponctuelles dans la zone de rejet. Des sources de quantité de mouvement s'ajoutent aux sources fluides pour simuler l'effet de jet orienté entraînant des recirculations tourbillonnaires en sortie de rejet. Les circulations engendrées par des agitateurs sont modélisées de façon analogue par des sources de quantité de mouvement. On applique dans le modèle la force de poussée théoriquement exercée par l'hélice. Plusieurs tests ont été conduits pour s'assurer que le champ de vitesse à l'échelle de mailles de longueur 3m était cohérent avec le champ de vitesses attendus à quelques mètres d'une hélice de diamètre de quelques décimètres. On montre également que l'intégration du champ de vitesse sur la verticale (2DH) est cohérente avec la réalité physique.



Modèle DELFT-3D. La grille régulière a été préférée au maillage non structuré triangulaire pour une meilleure robustesse des simulations des jets d'hélice

- Le modèle intègre le bassin portuaire Camille Rayon, de manière à visualiser la sortie des eaux injectées à travers la passe commune aux deux bassins. La condition aux limites au large est une condition de niveau d'eau constant permettant à l'écoulement de se diffuser. Les effets de diffusion turbulente, notamment autour des points de rejet, sont calculés par un modèle de fermeture de type Large Eddy Scale.
- Les eaux injectées dans le bassin via la buse d'avivement sont accompagnées d'un traceur passif, dont le suivi permet de déterminer le taux de renouvellement des eaux en fonction du temps. Le traceur de l'eau injectée a une concentration C arbitraire égale à $100\%/m^3$. La concentration du traceur se diffusant dans le port est exprimée en pourcentage des eaux localement renouvelées.

4.2 QUELQUES CONFIGURATIONS D'INJECTION D'EAU RENOUVELEE

4.2.1 Rejet à travers la buse existante

Les résultats de simulation sont synthétisés à travers deux planches de résultats :

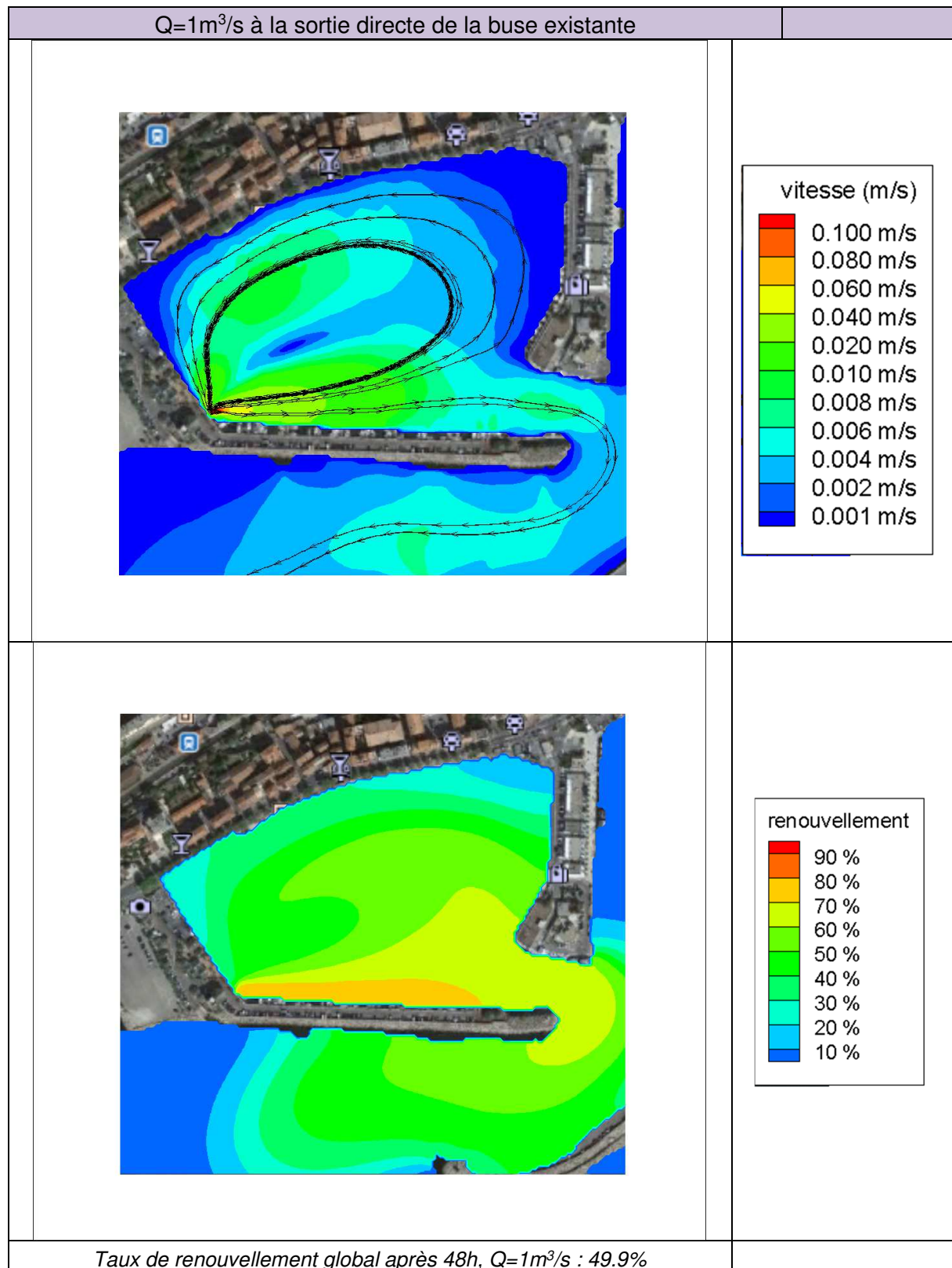
1. le champ de vitesse intégré sur la verticale, auquel on superpose quelques lignes de courant indiquant la direction de l'écoulement ;
2. le champ de concentration du tracer C , illustrant le taux de renouvellement.

Le champ de vitesse est représentatif d'un état quasi stationnaire sur la durée de la simulation (48h au réel), il varie peu en fonction du temps.

Le champ de traceur passif sur l'ensemble du bassin correspond au taux de renouvellement atteint après 48h d'injection d'eau avec un débit $Q=1m^3/s$, soit $172\ 000\ m^3$ d'eau injectés. La simulation est réalisée avec un niveau d'eau moyen $0.15m$ NGF, correspondant à un volume de $178\ 000\ m^3$ pour l'ensemble du bassin portuaire jusqu'à la passe. Si le renouvellement était parfaitement réparti dans le bassin, on aurait au maximum un taux de renouvellement global égal à :

$$172\ 800 / 178\ 000 = 97\%$$

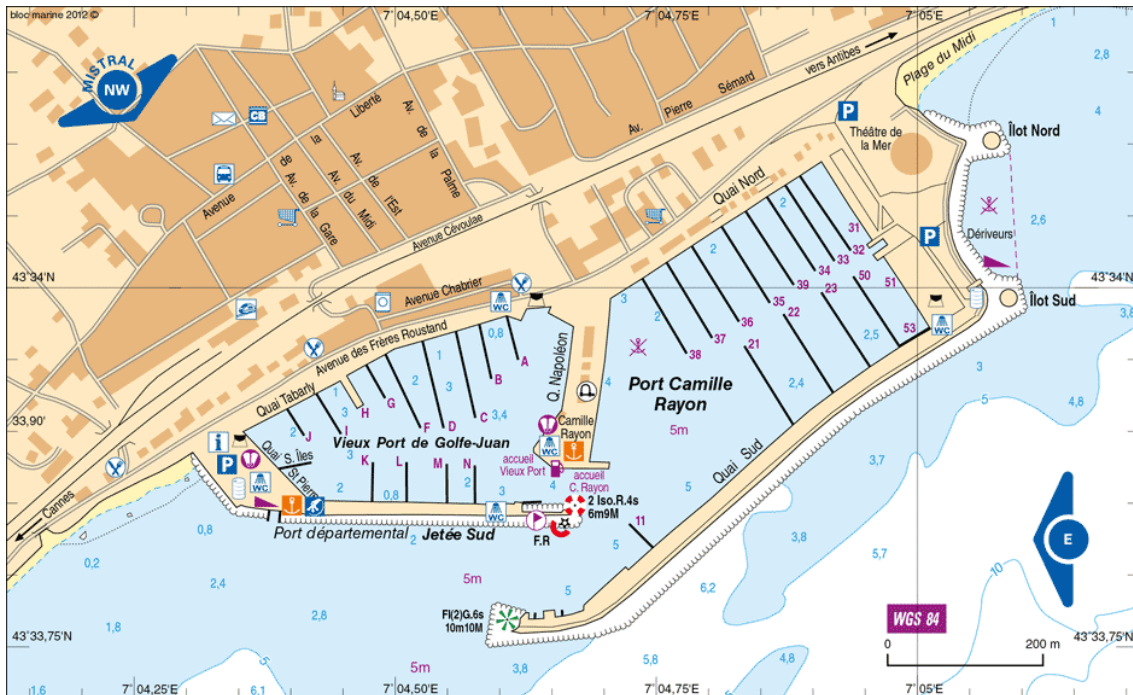
La première simulation est la référence actuelle, c'est-à-dire un rejet simple à travers la buse existante. On montre ce qui avait été supposé, à savoir un cheminement privilégié dans le chenal du port, avec une sortie directe vers la passe, sans renouvellement significatif le long des quais Saint Pierre (Ouest), Tabarly (Nord) et Napoléon (Est) (Cf. planches ci-après). Si le taux de renouvellement atteint 70 à 80% à $t=48h$ le long de la jetée Sud, il ne dépasse pas 30% à 40% le long des autres quais, pour un renouvellement d'ensemble inférieur à 50%.



D'expérience, cette configuration ne donnait pas satisfaction, justifiant sans doute le besoin d'atteindre un taux de renouvellement bien supérieur après 2 jours.

4.2.2 Coude en sortie de buse

L'une des modifications les plus simples consiste à orienter le jet de sortie vers les quais Nord, de manière à mieux renouveler l'ensemble du bassin. La sortie de la buse est équipée d'un coude qui oriente le jet dans une direction parallèle au quai Saint-Pierre. La dénomination des quais des pontons est rappelée ci-dessous.

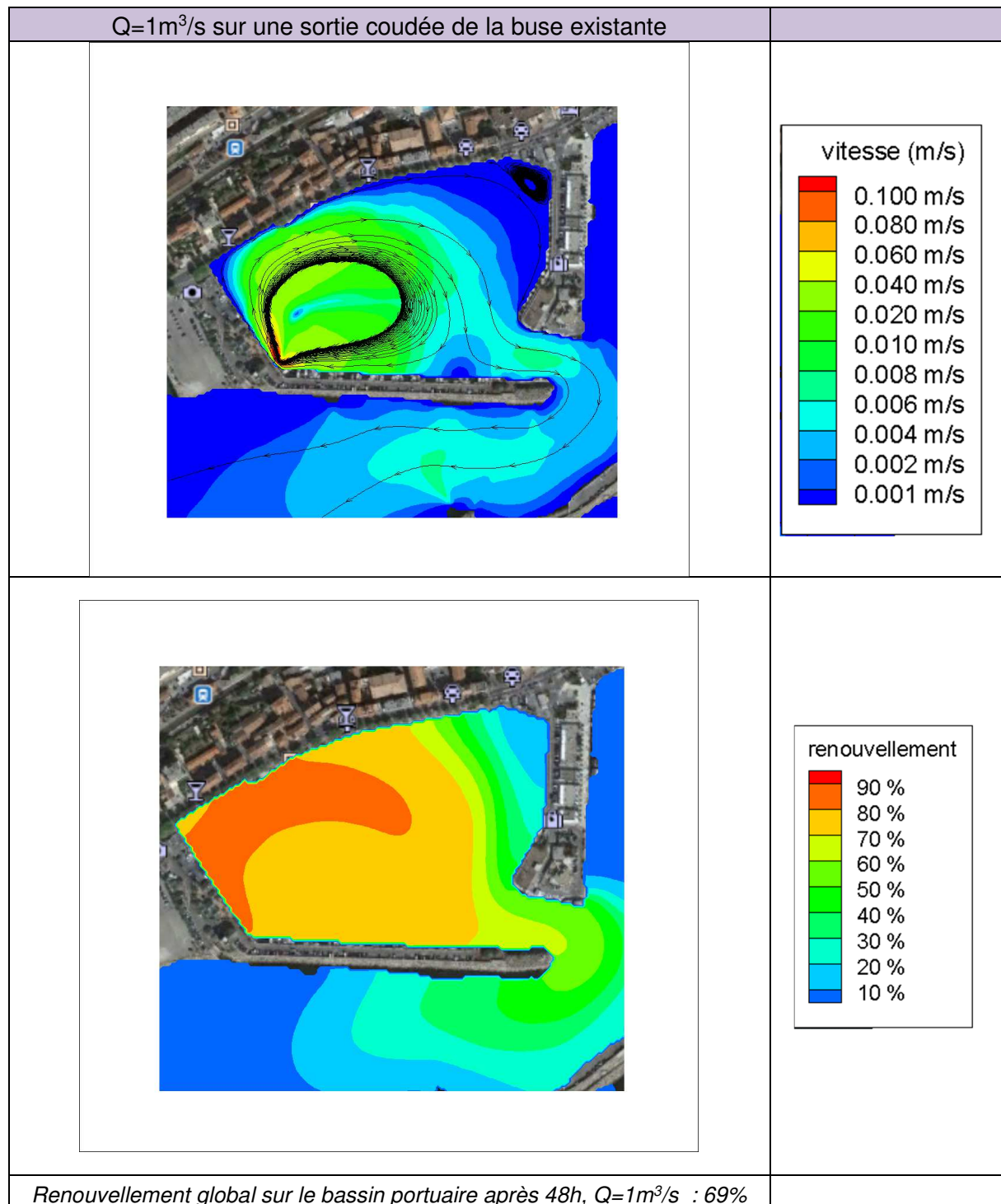


Dénomination des quais et pontons



Sortie coude le long du quai Saint-Pierre

Les champs de courant et de renouvellement à $t=48h$ dans cette configuration coudée sont présentés ci-après.



Le jet de 1.27m/s sur 1m de diamètre en sortie se diffuse pour atteindre environ 20cm/s à environ 15m de l'axe de la sortie. Dans cette configuration, il existe un courant de travers non négligeable à l'arrière des bateaux, occasionnant un peu de gêne, sans toutefois mettre en danger l'amarrage des navires. Cette gêne subsiste sur un peu plus de 10m.

Le renouvellement est logiquement bien meilleur que sur la configuration précédente, atteignant 69% globalement à $t=48h$ pour $Q=1m^3/s$. On note toutefois une recirculation générale de plusieurs cm/s, générant une certaine diffusion, et une sortie prématurée de l'eau renouvelée vers la passe.

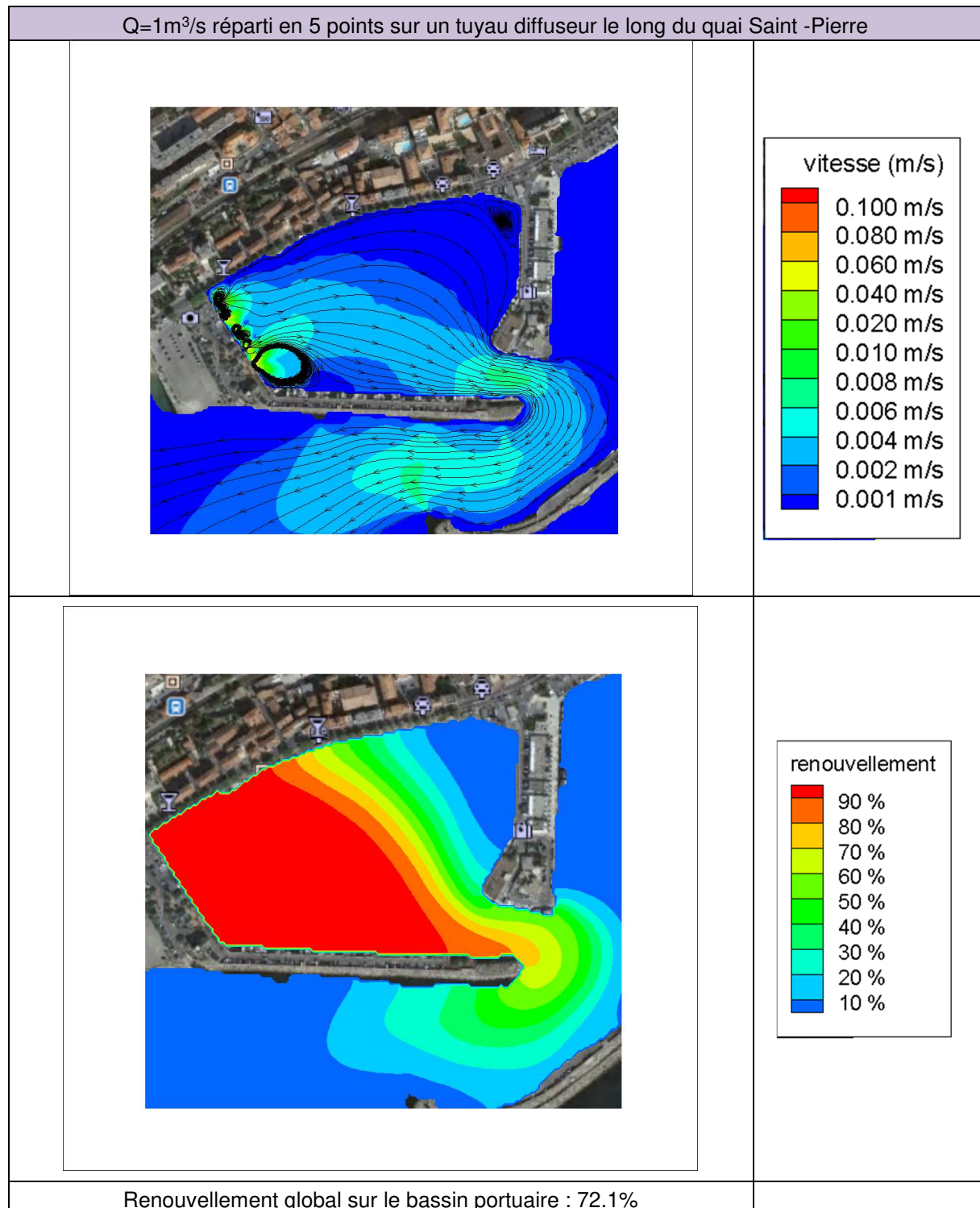
4.2.3 Tuyau de diffusion du rejet en sortie de buse

La configuration suivante consiste à répartir le débit extrait depuis la buse en plusieurs points le long du quai Saint-Pierre. La sortie coudée serait prolongée par une conduite accrochée au quai et placée plutôt vers le fond. La nouvelle conduite, de diamètre également $\Phi 1000$, serait percée environ tous les 20m pour laisser s'échapper le débit $Q=1 \text{ m}^3/\text{s}$ selon 5 sources $q=0.2 \text{ m}^3/\text{s}$ chacune. On crée ainsi un diffuseur dont les jets de sortie sont orientés dans la direction perpendiculaire au quai.



Sortie répartie sur une conduite diffuseur au fond le long du quai Saint Pierre Saint-Pierre

Les champs de vitesse et de renouvellement sont présentés ci-après.



Le renouvellement se fait progressivement depuis le fond du port. Le coin Nord-Est du port n'est pas renouvelé, l'écoulement trouvant logiquement un chemin préférentiel directement vers la passe lorsqu'il atteint cette zone. Le renouvellement global atteint néanmoins 72.1% à t=48h, mais plus de 90% sur la majeure partie du port.

La vitesse du jet égale à 2.5m/s sur 0.3m de diamètre directement en sortie chuterait à 0-5 -0.7m/s à une distance de 3m en aval de la sortie, sur un diamètre de jet d'environ 1.0m. La vitesse serait inférieure à 0.2m/s dans l'axe du jet à 10m en aval. Un tel écoulement dans de sens longitudinal par rapport aux bateaux est peu gênant.

4.2.4 Tuyau de diffusion associé à un agitateur au coin Nord-Est

La configuration avec tuyau diffuseur le long du quai Saint-Pierre offre de loin les meilleures performances de renouvellement, excepté sur toute la zone Nord-Est. Celle est reprise comme base en tentant d'améliorer le renouvellement dans cette zone.



Sortie répartie sur une conduite diffuseur au fond le long du quai Saint Pierre Saint-Pierre

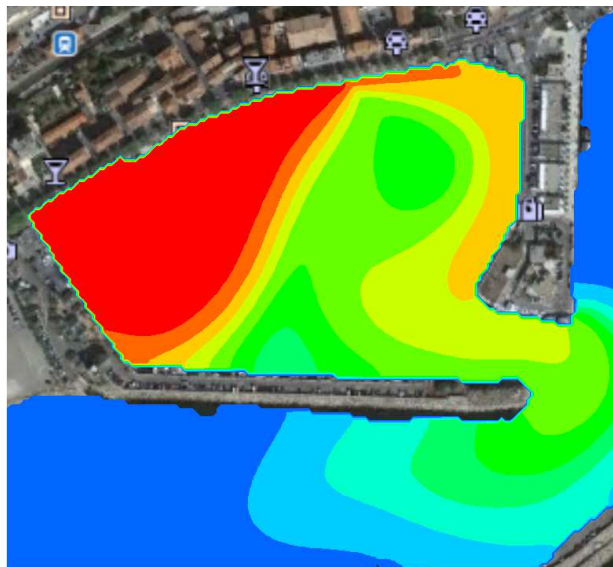
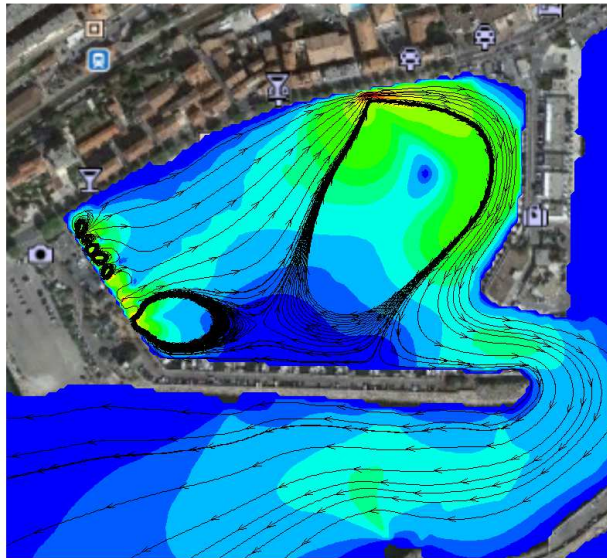
Plusieurs tests préliminaires (approches locales 3D-2D, calculs analytiques débit-vitesse-puissance sur une hélice) nous ont conduits à retenir un agitateur offrant une poussée $F=0.2\text{kN}$, laquelle est capable d'entraîner un débit de l'ordre d'un m^3/s à quelques mètres en aval. Ce débit entraîné par l'hélice attire une partie du débit apporté le long du quai Saint Pierre vers la zone Nord-Est, tandis qu'une autre partie effectue une boucle entre de l'aval vers l'amont de l'hélice.

Une hélice offrant une poussée $F=0.2\text{kN}$ a un diamètre d'environ 21cm selon l'un des fournisseurs potentiels (Xylem, anciennement Flygt). L'hélice a été placée à différents endroits dans le modèle numérique :

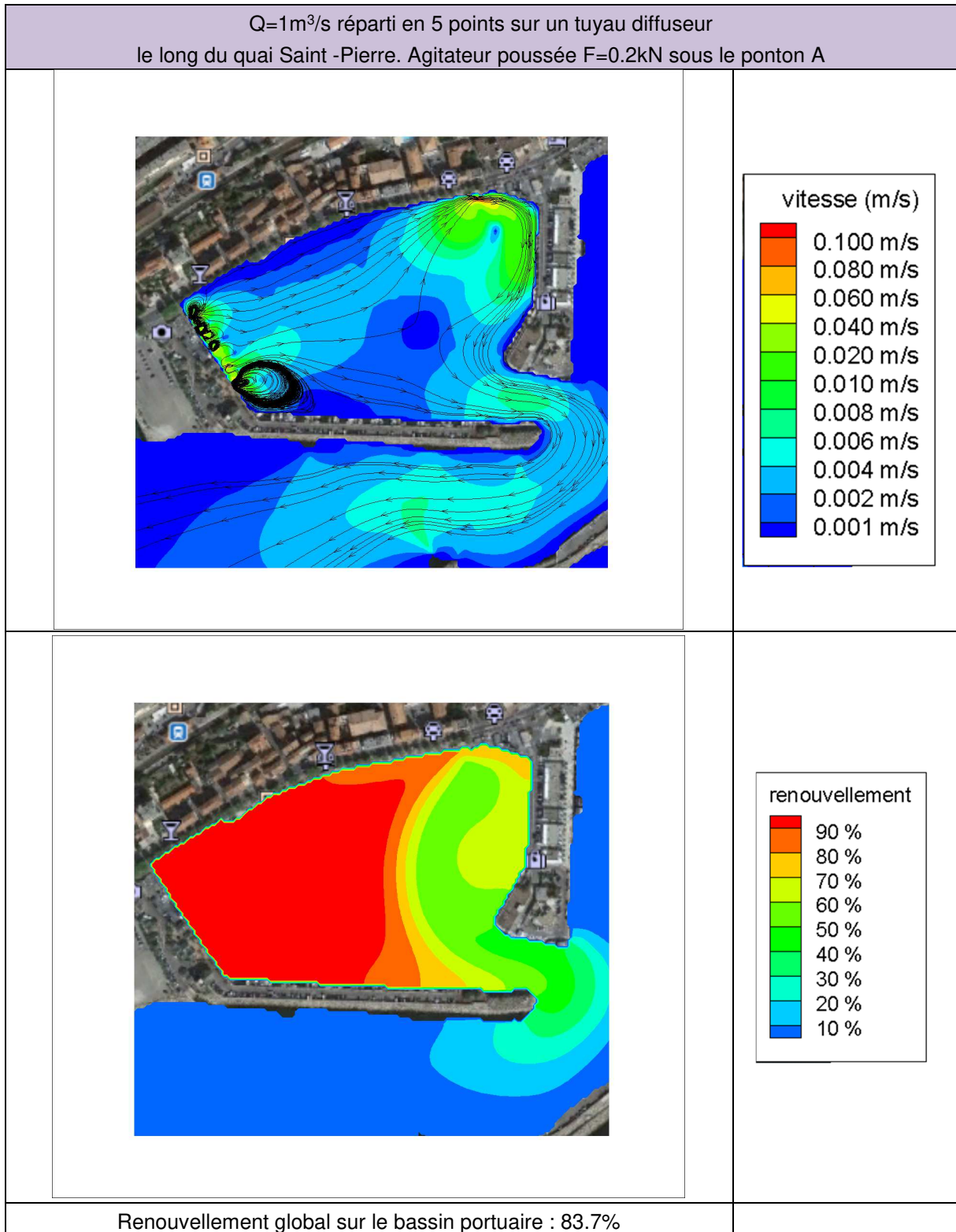
- le long du quai Tabarly sous le ponton C
- le long du quai Tabarly sous le ponton A
- le long du pan coupé, au niveau de l'aire de carénage entre le quai Tabarly et le quai Napoléon, avec deux positions, le jet pouvant être parallèle ou perpendiculaire au quai.

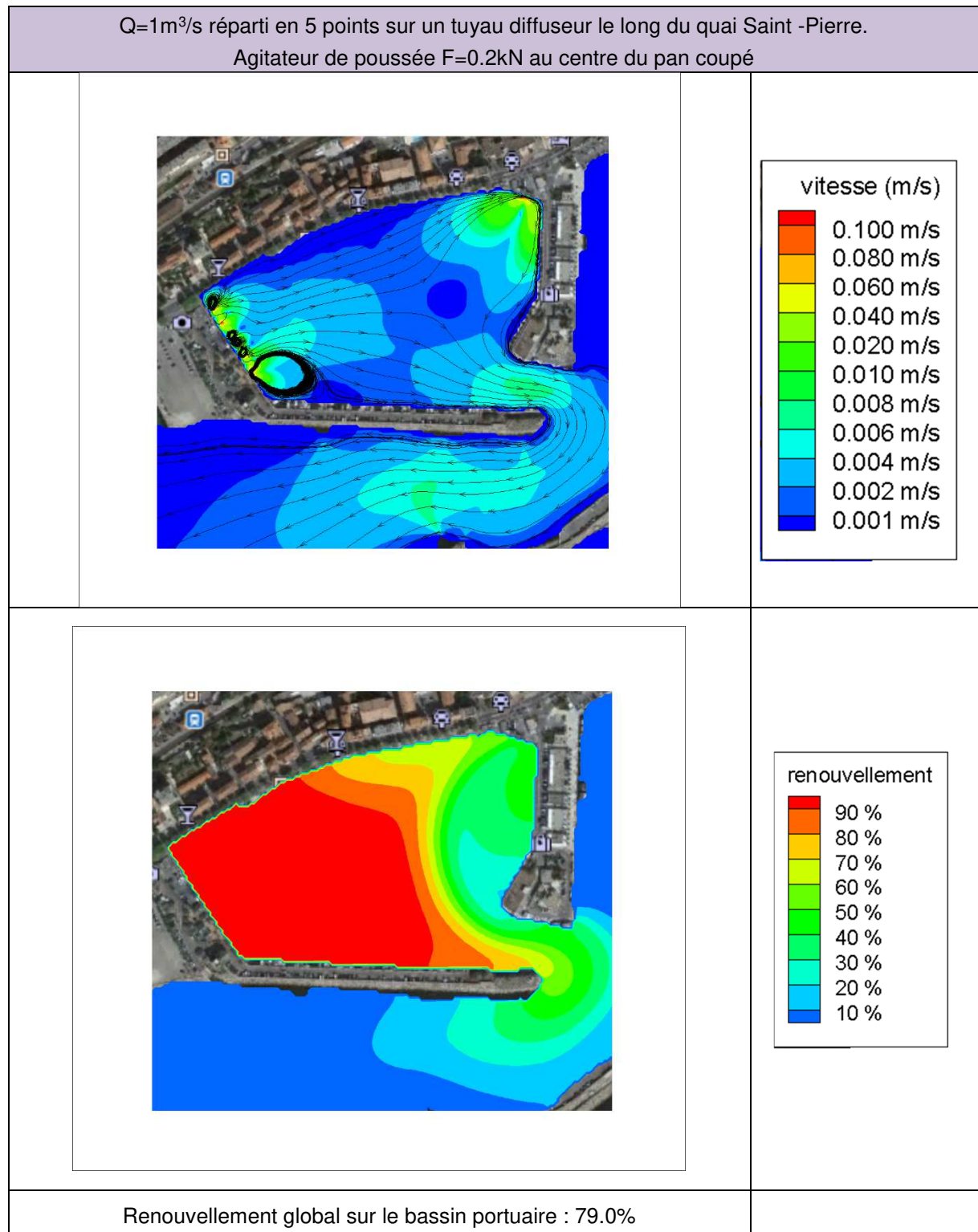
Les champs de vitesse et de renouvellement sont présentés ci-après.

Q=1m³/s réparti en 5 points sur un tuyau diffuseur
le long du quai Saint -Pierre. Agitateur poussée F=0.2kN sous le ponton C

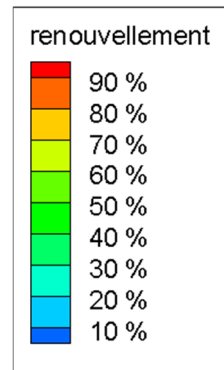
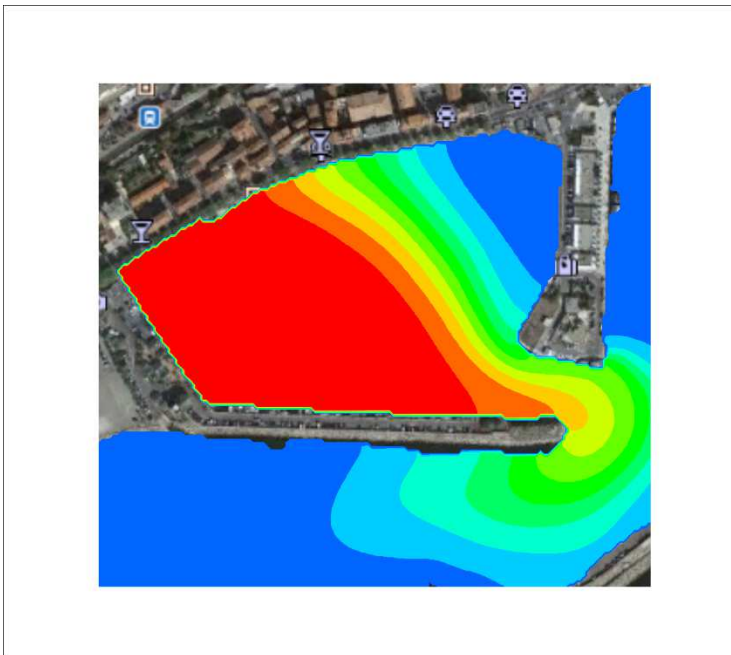
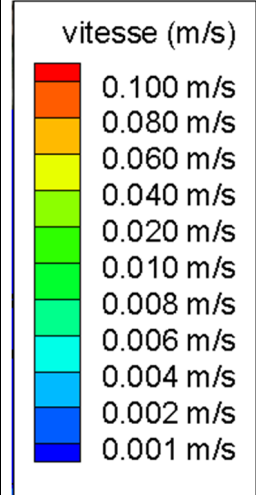
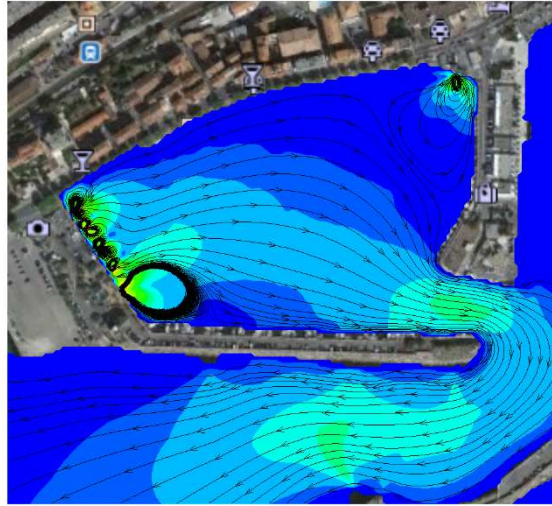


Renouvellement global sur le bassin portuaire : 72.1 %





Q=1m³/s réparti en 5 points sur un tuyau diffuseur le long du quai Saint -Pierre.
 Agitateur de poussée F=0.2kN au centre du pan coupé,
 jet perpendiculaire au quai



Renouvellement global sur le bassin portuaire : 72.0%

4.3 SYNTHÈSE ET ENSEIGNEMENT DES PREMIERS RESULTATS

Le simple jet à travers la buse existante n'est pas une solution appropriée.

Le même simple jet, mais à travers la buse équipée d'un en extrémité, apporte des améliorations substantielles, mais il s'accompagne d'un courant traversier à la poupe des navires amarrés au quai Saint-Pierre.

Le débit réparti en plusieurs jets par une conduite-diffuseur disposée le long du quai Saint-Pierre apporte le meilleur taux de renouvellement, avec un remplacement progressif des masses d'eau depuis le fond du bassin. L'injection d'eau doit être accompagnée d'un brassage par une petite hélice, positionnée au coin Nord-Est, de manière à attirer la majeure partie du débit injectée, ce qui permet le renouvellement de l'ensemble du bassin, avant la sortie de l'écoulement à travers la passe.

Les taux de renouvellement globaux et les commentaires associés aux diverses positions étudiées pour l'hélice de brassage sont synthétisés dans le tableau ci-après :

Synthèse des résultats au regard de la position de l'hélice de brassage complétant le débit d'eau injecté via une conduite-diffuseur le long du quai Saint-Pierre		
Position de l'hélice F=0.2kN	Renouvellement global à t=48h	Commentaire
Hélice sous le ponton C	72.1%	Le jet d'hélice attire le débit renouvelé depuis le quai Saint-Pierre un peu trop en amont. Celui-ci longe les quais Tabarly et Napoléon mais ressort un peu trop rapidement en créant une énorme recirculation au centre du bassin. Le renouvellement global n'est pas amélioré.
Hélice sous le ponton A	83.7%	Le jet d'hélice est correctement positionné pour dévier une partie du débit renouvelé depuis le quai Saint-Pierre vers la zone Nord-Est. La position sous le ponton A serait légèrement plus efficace, mais la position au pan coupé reste intéressante face aux contraintes de mouillage.
Hélice au pan coupé, jet parallèle au quai	79%	
Hélice au pan coupé, jet perpendiculaire	72%	Un jet perpendiculaire au quai génère une simple boucle de recirculation locale, sans attirer une partie du débit global circulant dans le bassin.

L'association tuyau de diffusion au quai Saint-Pierre + petite hélice dans la zone Nord-Est permet d'atteindre un renouvellement global d'environ 80% sur l'ensemble du bassin en 48h sur la base d'un débit $Q=1\text{m}^3/\text{s}$. La gamme des pompes à hélice permettrait d'atteindre $Q=1.2\text{m}^3/\text{s}$ à condition de maîtriser les pertes de charge dans le circuit hydraulique, ce qui semble réaliste, mais consommateur d'énergie.

Les positions entre le ponton A et l'aire de carénage entre les quais Tabarly et Napoléon sont à privilégier, en orientant le jet parallèle au quai.

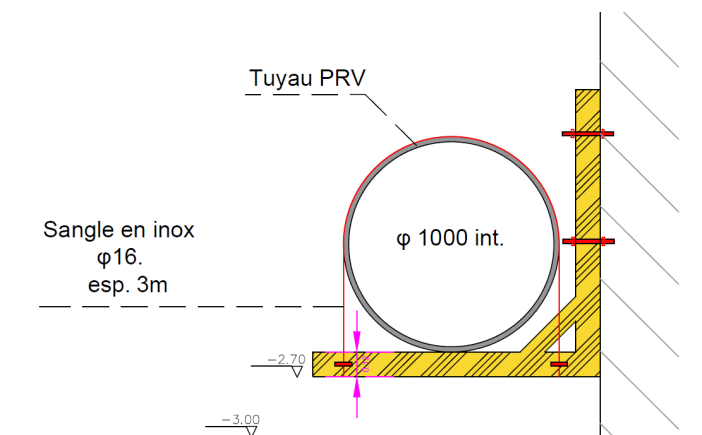
La solution avec conduite-diffuseur a été retenue par Riviera Port et les professionnels du port. Elle doit néanmoins s'adapter aux diverses contraintes d'exploitation.

4.4 LES CONTRAINTES D'EXPLOITATION DU PORT

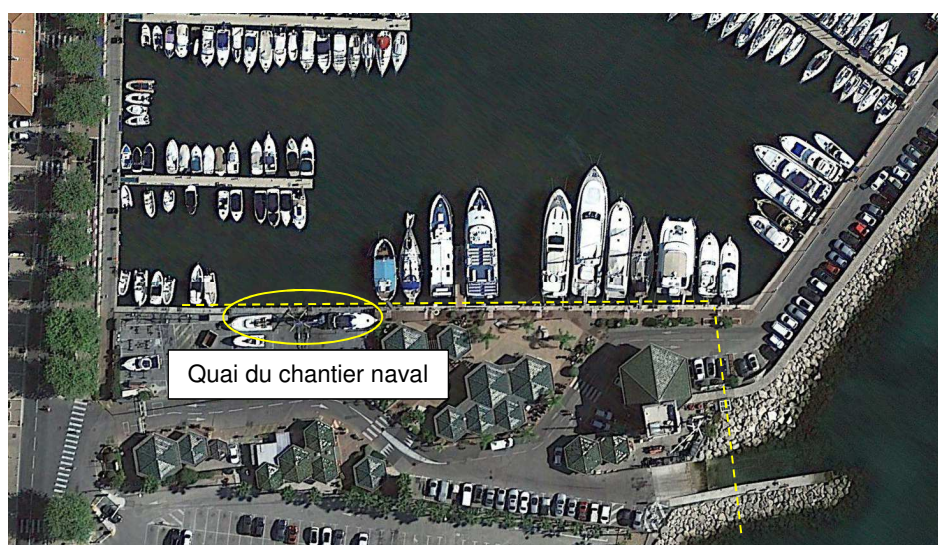
4.4.1 Installation de la conduite-diffuseur

La conduite-diffuseur prolonge la buse existante. Elle doit avoir un diamètre équivalent à celui de la buse, soit $\Phi 1000\text{m}$, au moins jusqu'à l'acheminement vers les premiers tubes de sortie, de manière à limiter les pertes de charge et rester compatible avec une pompe de taille raisonnable pour injecter le débit depuis l'extérieur du port. Cela signifie que la conduite occupe un espace légèrement supérieur à 1 m aussi bien en largeur qu'en hauteur. Deux solutions sont proposées pour sa mise en place :

- Une accroche en console contre le quai droit, le plus près possible du fond. La conduite est dans ce cas exposée au risque de collision avec les navires amarrés, ou plus probablement avec ceux qui seront en phase de manœuvre de recul. Un épaississement du quai, par de larges défenses, ou un ponton flottant, est l'une des solutions pour empêcher le contact avec la conduite. Cela a toutefois l'inconvénient de reculer les navires amarrés d'un mètre vers le large.



- Un ensoulement complet de la conduite, au pied du quai, sous le terrain naturel. Seuls les tubes diffuseurs, de petit diamètre ($\approx 0.3\text{m}$), sortiraient de quelques dizaines de cm au-dessus du fond. Ces tubes seraient placés entre les postes d'amarrage, et accolés le plus près possible au quai. Cette solution a l'avantage, à terme, de ne pas perturber l'exploitation des zones de mouillage. Elle nécessite toutefois un dragage local, avec nécessité d'évacuer et traiter les vases portuaires, en principe chargées en métaux lourds.



Quai du chantier naval entre les postes d'amarrage du suai Saint-Pierre

La gêne occasionnée par une conduite apparente impacterait également le chantier naval situé sur le quai Saint Pierre. La grue du chantier porte et remet à l'eau des navires à proximité du quai. Un tuyau apparent en bas du quai obligerait le chantier à prendre des précautions pour les manœuvres de navire à fort tirant d'eau.

Même si les coûts associés au dragage ne sont pas négligeables, le choix du Maître d'ouvrage s'est porté sur la solution ensouillée, laquelle offre les meilleurs avantages sur le long terme.

4.4.2 Installation de l'hélice de brassage

L'hélice de brassage a un encombrement limité, avec un diamètre de l'ordre de 20cm. Elle sera protégée par une cage métallique et immergée vers mi-profondeur, soit -1.0 m sous le niveau d'eau.

L'installation sous le ponton A occasionnerait une gêne avec les bateaux. Il y aurait aussi des risques d'interaction avec certaines activités, comme la pêche par exemple. L'extrémité du quai de l'aire de carénage est certainement l'une des zones les mieux adaptées. Les navires ne peuvent s'y amarrer, et une paroi rend inaccessible le bord à quai depuis les postes de plaisance.



Position prévue pour l'hélice de brassage

Cette zone locale est par ailleurs neutralisée pour les exploitants de l'aire de carénage dans le cadre des manipulations de navire à la montée-descente.

5 CONCEPTION DU DISPOSITIF DE CIRCULATION

5.1 AJUSTEMENT DE LA POSITION DES POINTS DE SORTIE

Le rythme et le nombre de postes d'amarrage incitent à limiter le nombre de sorties d'eau injectée. Il est préférable de positionner deux sorties aux extrémités du quai du chantier aval, évitant toute interaction avec la manipulation de navire bord à quai. Il est aussi intéressant d'exploiter la présence du ponton fixe entre deux postes de navire, d'y positionner un jet de sortie. Dans ces conditions, on se limiterait à quatre sorties, au lieu de cinq pressenties pour les premières simulations numériques, avec une dernière sortie entre deux postes de grands navires. Le principe est esquissé sur l'image ci-dessous.



Position des points de sortie de la conduite-diffuseur ensouillée sous le terrain naturel

5.2 ECOULEMENT HYDRAULIQUE SUR QUATRE SORTIES ET TAUX DE RENOUVELLEMENT

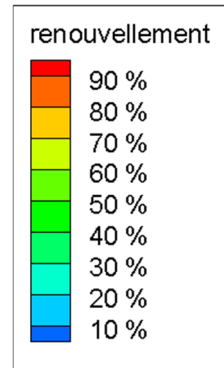
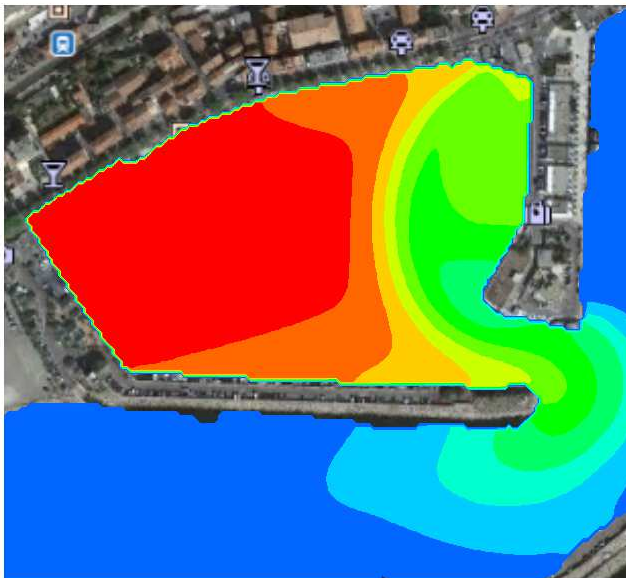
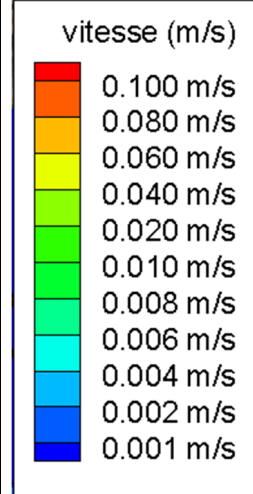
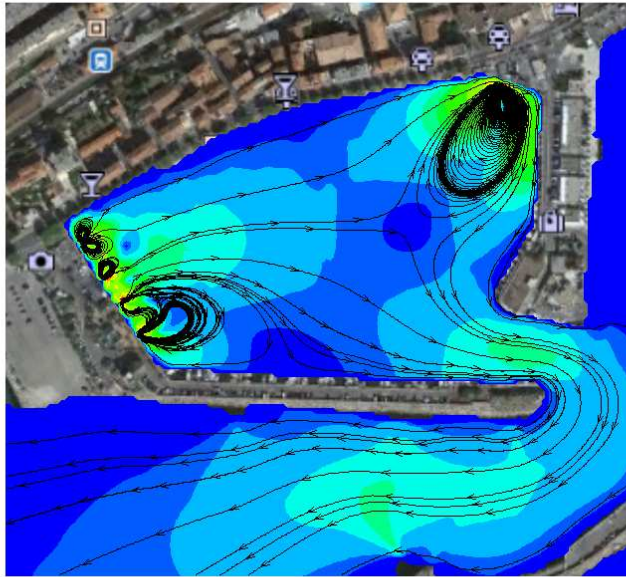
Les simulations des écoulements et du taux de renouvellement du bassin ont été réitérées en intégrant les principes énoncés ci-avant, s'appuyant sur des considérations plus détaillées des diverses contraintes.

On fait part ci-après du champ de vitesse et du taux de renouvellement obtenu à $t=48h$. Les jets de sortie sont supposés être orientés dans un plan proche de l'horizontal, perpendiculaire au quai Saint-Pierre. Même avec 4 sorties réparties sur le quai Noël, le taux de renouvellement dépasse 80% sur l'ensemble du bassin.

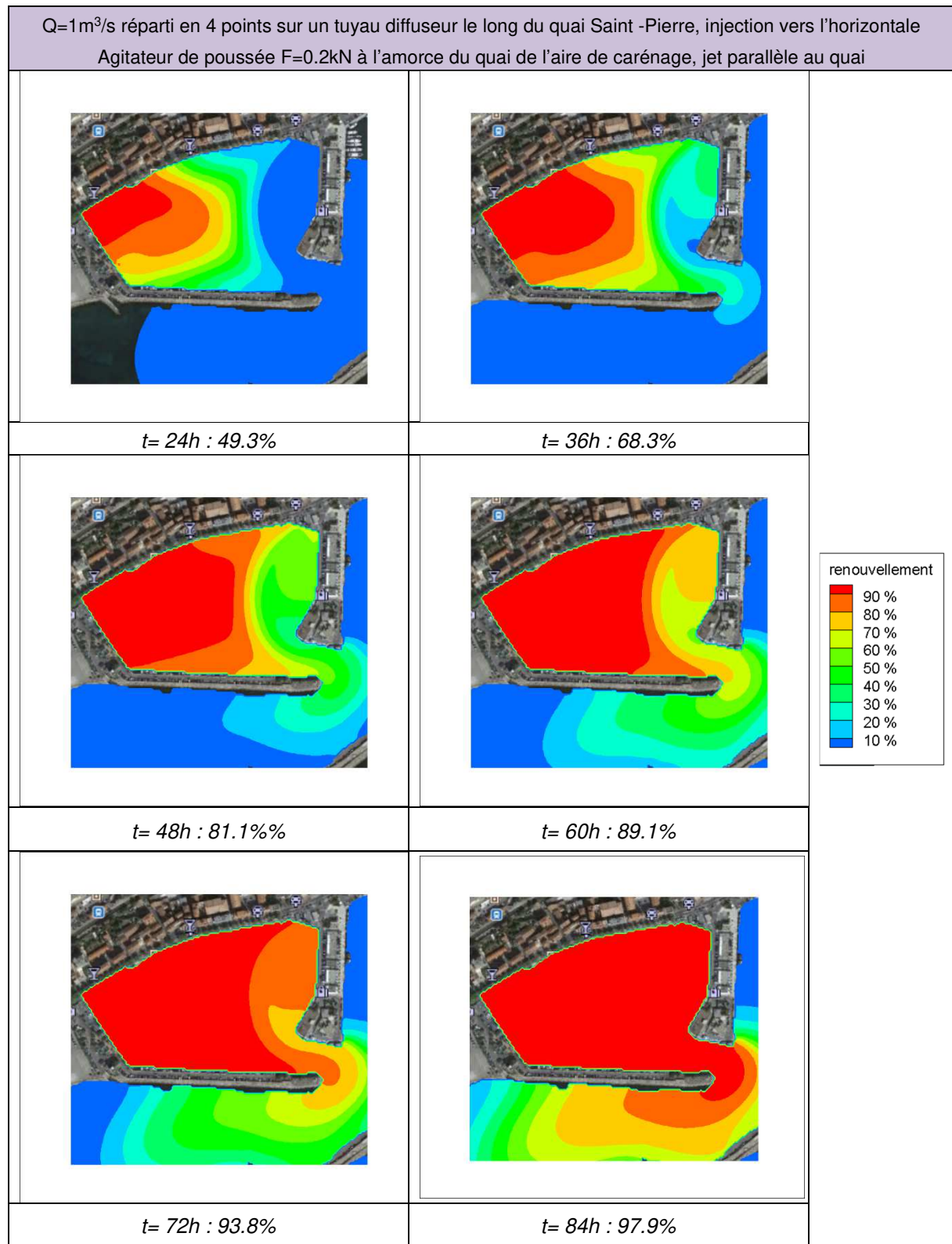
Sur les planches qui suivent, on a rassemblé l'évolution du taux de renouvellement de $t=24h$ jusqu'à $t=84h$ (5 jours), temps au bout duquel l'eau a été remplacé à plus de 97%. On montre bien une évolution rapide du taux de remplacement sur 2 jours, ce qui est recherché pour contrer les développements algaux. Le renouvellement est ensuite logiquement ralenti par les effets de dispersion.

La présence de l'hélice à l'aire de carénage dévie la majeure partie du débit injecté (soit $1m^3/s$) vers le coin Nord-Est du bassin. Une hélice plus puissante aurait peu d'intérêt, car elle accélérerait la sortie du débit injectée, augmentant certes le brassage, mais réduisant le taux de renouvellement.

$Q=1\text{m}^3/\text{s}$ réparti en 4 points sur un tuyau diffuseur le long du quai Saint -Pierre, injection vers l'horizontale
 Agitateur de poussée $F=0.2\text{kN}$ à l'amorce du quai de l'aire de carénage, jet parallèle au quai

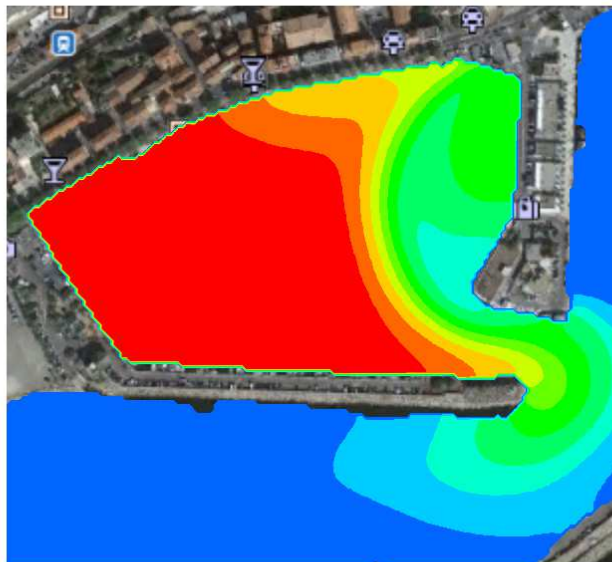
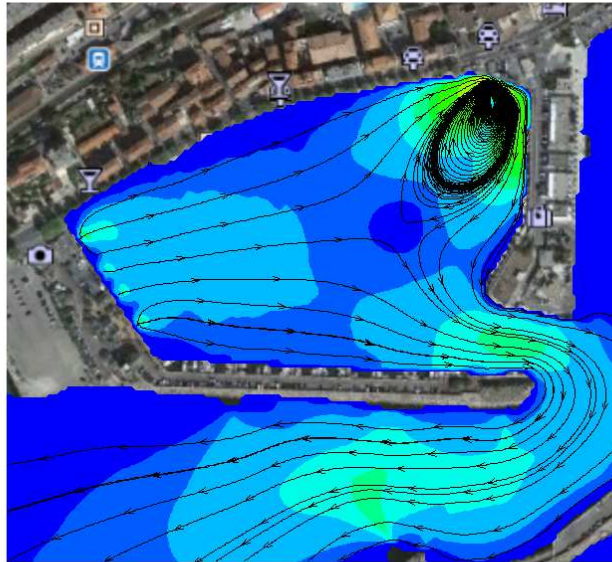


Renouvellement global sur le bassin portuaire après 48h : 81.1.0%

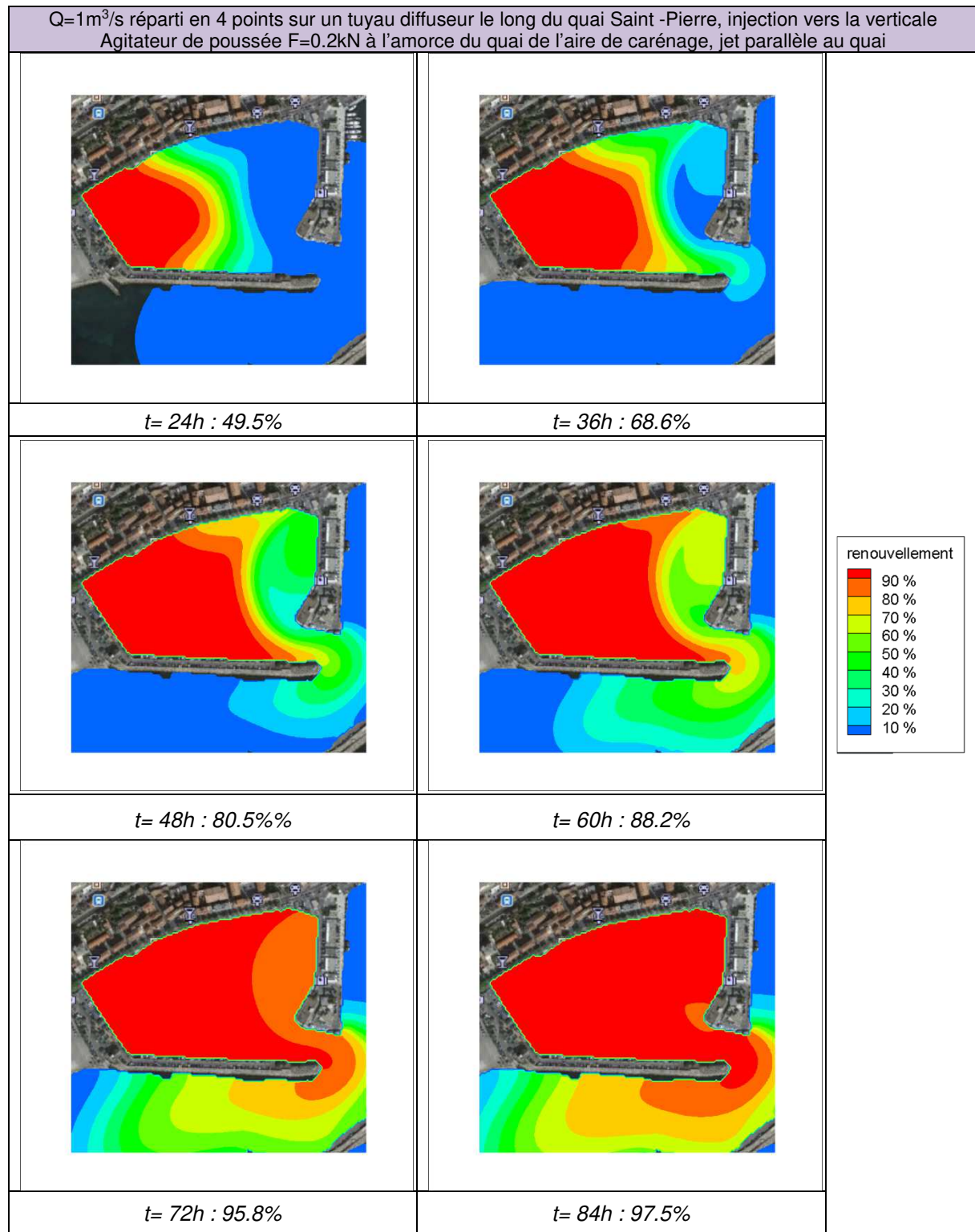


Une sensibilité est effectuée sur l'orientation des jets depuis la conduite le long du quai Saint-Pierre. On suppose les jets orientés verticalement, ce qui supprime tout effet de quantité de mouvement dans le sens perpendiculaire au quai. Le champ de vitesse obtenu est présenté ci-dessous. Par rapport à la configuration précédente, on a supprimé tout effet de recirculation locale avec des vitesses de quelques cm/s près du quai. Ici, les sources de débit injecté s'apparentent à des petits geysers, poussant progressivement les eaux depuis le fond du bassin.

Q=1m³/s réparti en 4 points sur un tuyau diffuseur le long du quai Saint -Pierre, injection vers la verticale .
 Agitateur de poussée F=0.2kN à l'amorce du quai de l'aire de carénage, jet parallèle au quai



Renouvellement global sur le bassin portuaire après 48h : 80.5%



On montre que l'orientation des jets le long du quai Saint-Pierre n'a qu'un impact minime sur le processus de renouvellement. Ce paramètre n'est pas essentiel pour la conception des diffuseurs de sortie, ceux-ci pouvant être orientés de l'horizontale à la verticale, ou avec une certaine obliquité.

5.3 NOTION DE PERTES DE CHARGE HYDRAULIQUES

Les pertes de charge hydrauliques sont évaluées en distinguant les pertes de charges singulières et les pertes de charges linéaires à travers les conduites.

5.3.1 Pertes de charge singulières

La formule générique s'écrit comme suit :

$$\Delta H = k_s \frac{V^2}{2g}$$

Il importe de connaître le coefficient k_s associé à la perte de charge singulière. On fait part ci-après de quelques formulations classiques applicables au circuit hydraulique du dispositif étudié à Golfe Juan. Celles-ci sont tirées des théories générales et divers abaques regroupés par Lencastre [12].

Entrée depuis un grand réservoir vers une conduite d'angle θ avec la paroi

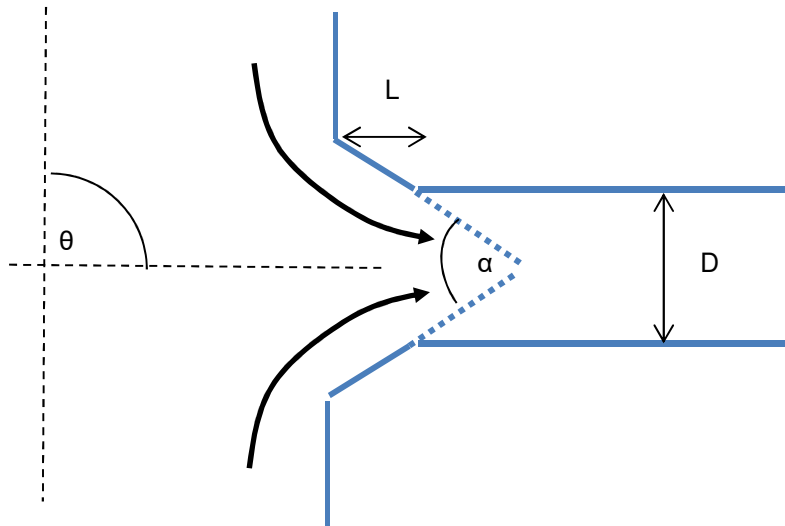
Si l'entrée est constituée par des arêtes vives, le coefficient de perte de charge, a pour expression :

$$k_s = 0.5 + 0.3 \cos \theta + 0.2 \cos^2 \theta$$

Pour $\theta = 90^\circ$ (conduite perpendiculaire à la paroi), on aurait $k_s = 0.5$

Si l'entrée est correctement profilée (type trompette), avec un rayon de courbure r tel que $r/D > 0.2$, alors le coefficient k_s devient pratiquement négligeable $k_s < 0.05$.

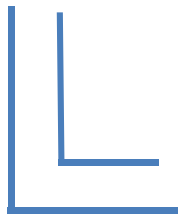
On peut aussi adopter des entrées avec un profil en tronc de cône. Un angle de $\alpha \approx 60^\circ$ est alors adapté pour réduire le coefficient k_s à [0.1, 0.2] selon la largeur de l'entrée L par rapport au diamètre D de la conduite (Cf. schéma ci-dessous).



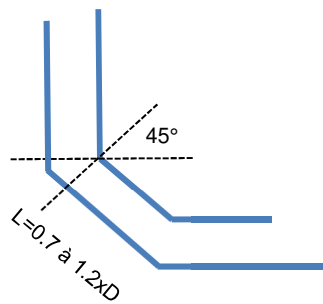
Profil d'entrée en tronc de cône, écoulement depuis un grand réservoir

Ecoulement dans un coude

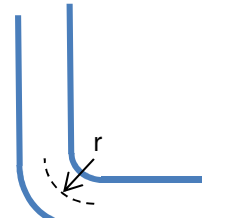
Le coefficient k_s associé à un écoulement dans un coude à 90° à angle vif est de l'ordre de $k_s = 1.2$. Il se réduit à environ $k_s \approx [0.3 - 0.5]$ si on séquence le virage avec un tronç intermédiaire, et deux angles de 45°. On aurait $k_s < 0.35$ si on arrondit le coude 90°, avec un rayon de courbure d'au moins égal au diamètre d'une grosse conduite ($\Phi 1000$). Le coefficient se réduit à $k_s < 0.25$ pour un coude arrondi à 45°.



Coude droit à angle vif

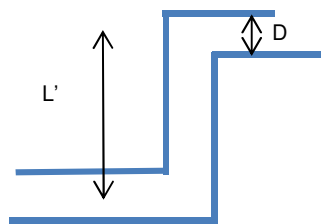


Coude avec transition,



Coude arrondi

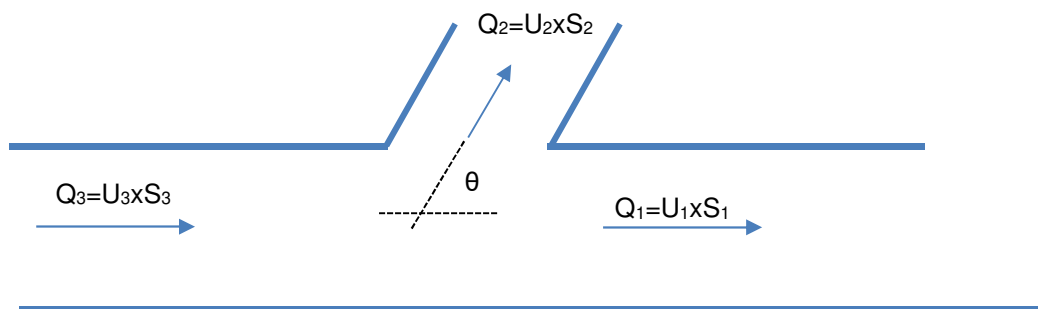
Si deux coudes se succèdent, il peut y avoir interaction entre les deux coudes, dépendant de la distance « L' » entre les deux coudes. Si $L'/D < 0.4$, la perte singulière k_s est seulement égale à 0.7 fois celle associée à un seul coude. Pour $1 < L'/D < 3$, aurait le triple de la valeur associée au coude seul. On tend ensuite logiquement vers deux coudes seuls, au fur et à mesure que « L' » croît.



Double-coudes à 90°

Bifurcation ou piquage pour extraction de débit

Il s'agit de l'écoulement associé à une conduite diffuseur étudiée pour Golfe Juan. Le débit Q_3 circulant la vitesse U_3 à travers la section S_3 est en partie dévié vers la conduite de section S_2 , le reste du débit Q_1 continuant de circuler dans le circuit.



La perte de charge s'exprime par rapport à la vitesse U_3 , associée au débit le plus important $Q_3=Q_2+Q_1$. On distingue la perte de charge singulière inhérente à l'écoulement extrait vers S_2 , $\Delta H_{3,2} = k_{S\ 3,2} \frac{V_3^2}{2g}$ et la perte de charge singulière associée à l'écoulement restant vers S_1 $\Delta H_{3,1} = k_{S\ 3,1} \frac{V_3^2}{2g}$.

Pour un piquage à angle vif, pour $S_1=S_3$, on aurait d'après les travaux de Levi et Kaliev [12] :

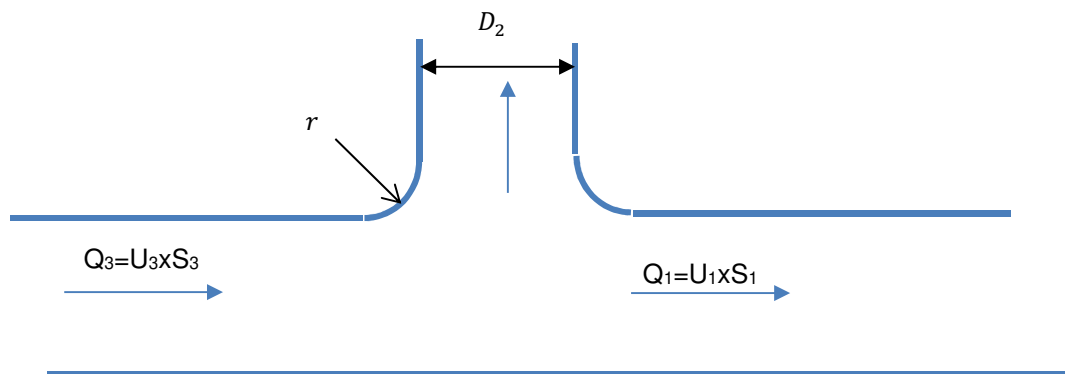
$$k_{S\ 3,2} = B \left[1 + \left(\frac{U_2}{U_3} \right)^2 - 2 \frac{U_2}{U_3} \cos \theta - C \left(\frac{U_2}{U_3} \right)^2 \right]$$

avec $B = 0.9$, $C = 0$ si $\frac{U_2}{U_3} > 0.8$

$$k_{S\ 3,1} = 0.4 \left[1 - \frac{U_1}{U_3} \right]^2$$

La valeur de $k_{S\ 3,1}$ est relativement faible, de l'ordre de 0 à 0.05 pour une extraction de débit de type diffuseur, c'est-à-dire avec une vitesse d'extraction U_2 environ deux fois supérieure à la vitesse d'écoulement U_3 dans la conduite nourricière.

La valeur de $k_{S\ 3,2}$ dépasse en revanche ≈ 4 dans les mêmes conditions si les arêtes sont vives. Des angles arrondis au raccordement, dont le rayon de courbure r est tel que $\frac{r}{D_2} > 0.2$, permettent de faire chuter la valeur de la perte singulière $k_{S\ 3,2}$ à environ [0.7-0.8] selon le rapport $\frac{Q_1}{Q_3}$.



Arrondir les raccordements à la base des piquages est une disposition essentielle pour maîtriser les pertes de charge au niveau des diffuseurs.

5.3.2 Pertes de charge linéiques

Les pertes de charge linéiques à travers les linéaires de conduite s'expriment comme suit [12] :

$$\Delta H = k_L \frac{V^2}{2g} = \frac{\lambda L V^2}{D 2g}$$

λ : coefficient de perte de charge linéaire issue de la formulation de Colebrook telle que :

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left(\frac{\varepsilon}{3.7D} + \frac{2.51}{Re \sqrt{\lambda}} \right)$$

ε : rugosité estimée de la conduite

D : diamètre de la conduite

$Re = \frac{VD}{\nu}$, nombre de Reynolds de l'écoulement

V : vitesse de l'écoulement

ν : viscosité cinématique de l'eau (1.3E⁻⁶)

Sur la base d'une rugosité $\varepsilon=1\text{mm}$, applicable à une conduite en PEHD ou PRV usager mais entretenue (quelques concrétions possibles, mais suppression des moules se développant sur les parois par exemple), on aurait :

- $\lambda \approx 0.020$ pour une conduite de diamètre $\Phi 1000\text{mm}$
- $\lambda \approx 0.025$ pour une conduite de diamètre $\Phi 500\text{mm}$

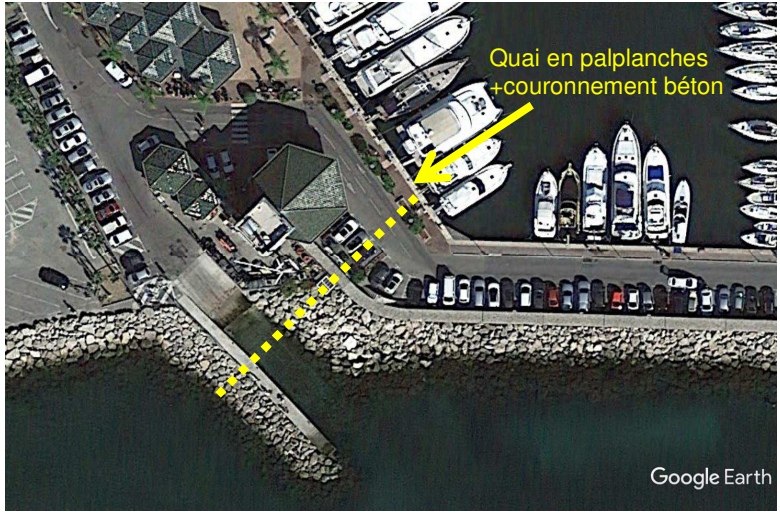
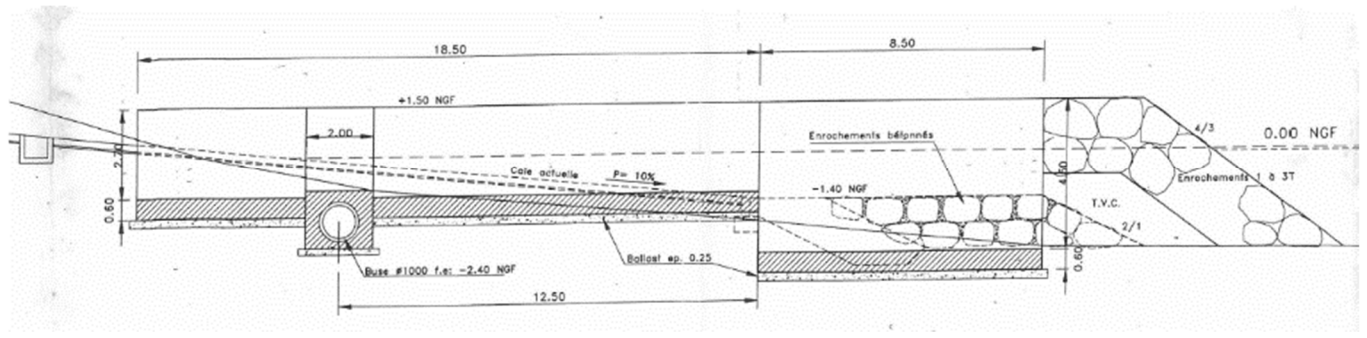
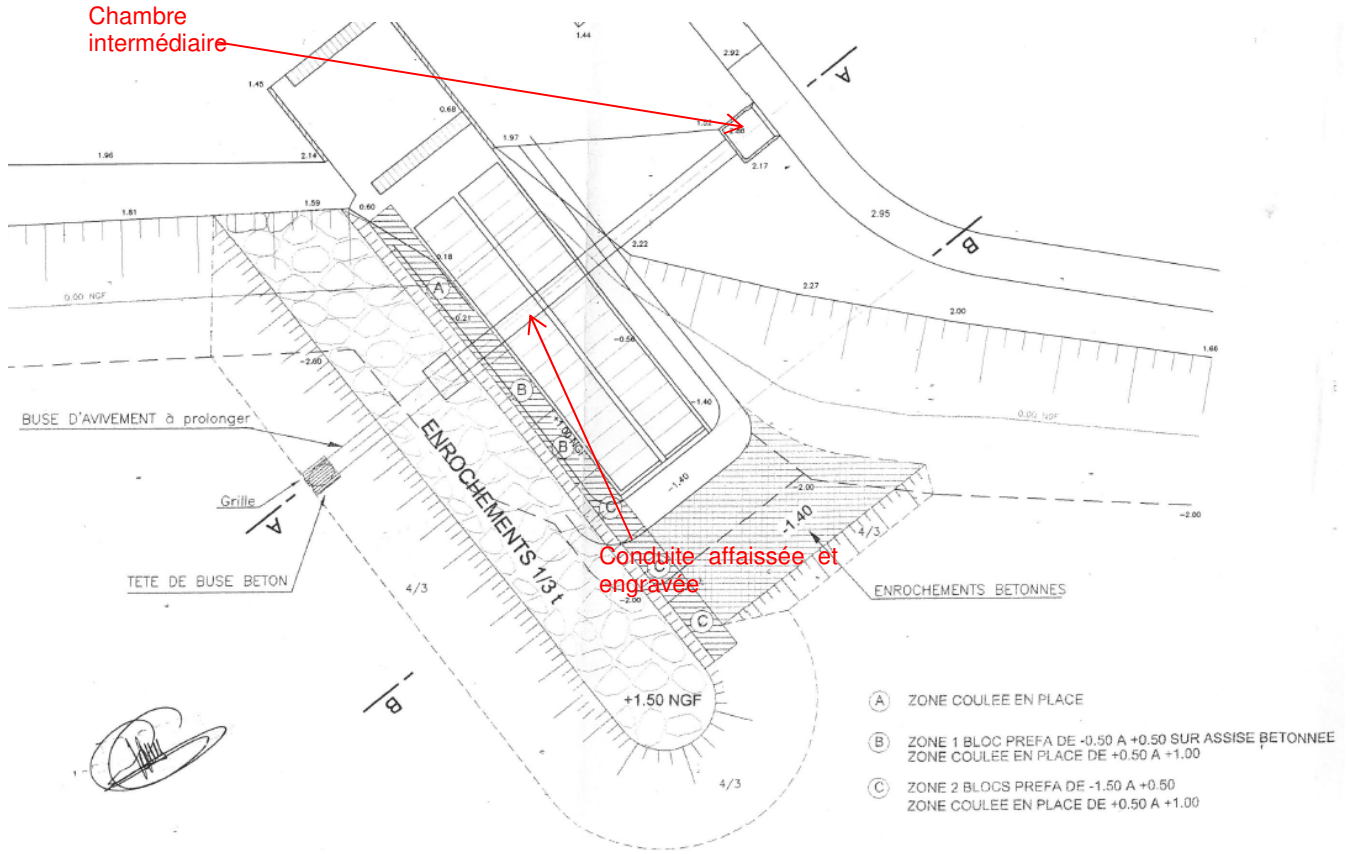
Ces valeurs de λ seraient doublées si on laissait des concrétions marines de l'ordre du cm envahir les conduites.

5.4 CIRCUIT HYDRAULIQUE DE L'EXTERIEUR VERS LE BASSIN PORTUAIRE

5.4.1 Dispositif existant

La prise d'eau existante est située en pied de talus en enrochement, à l'Ouest de la cale de mise à l'eau. Elle repose quasiment à ras du terrain naturelle. Il n'y a pas d'ouvrage de tête, hormis de grille inclinée couvrant la section d'entrée du tuyau.

La conduite d'aspiration est atterrée sous la cale de mise à l'eau. Elle s'étend sur environ 22m avant de déboucher dans la chambre intermédiaire, où était installée autrefois la pompe à hélice d'avivement. Une buse de diamètre $\Phi 1000\text{m}$ relie la chambre intermédiaire et le quai Saint-Pierre. Le fil d'eau inférieur du tuyau se situe à la cote -2.4m NGF.



Nos observations par caméra sur site, ainsi que celles des plongeurs professionnels qui ont entretenu la conduite, conduisent aux constats suivants :

- La conduite s'est visiblement fortement affaissée depuis sa mise en place. Elle suit une trajectoire courbe sous la cale de mise à l'eau formant un point bas. De notre point de vue, cela viendrait d'un tassement de la cale elle-même.
- La position de la prise d'eau à ras du fond favorise l'entrée des sédiments et des graviers. Le point bas de la conduite incurvée sous la cale est d'ailleurs fortement engravé. On retrouve même un monticule de sédiments à la sortie de la conduite au pied du mur du quai Saint-Pierre.
- La quai Saint Pierre est un mur de palplanches, surmonté d'un couronnement en béton. Les palplanches sont découpées au niveau du passage de la buse d'avivement. L'intérieur de celle-ci est logiquement fortement encrassé par les concrétions marines, n'étant plus en fonctionnement depuis longtemps.
- La buse est entourée par une section circulaire de plus grand diamètre faisant l'interface avec les palplanches. S'agit-il simplement d'un anneau posé localement pour éviter le contact buse-palplanches ? En quoi est constituée la buse ?



Palplanches entourant la sortie de buse existante

Le quai en palplanches est une configuration *a priori* favorable à l'ensouillement de la conduite diffuseur.

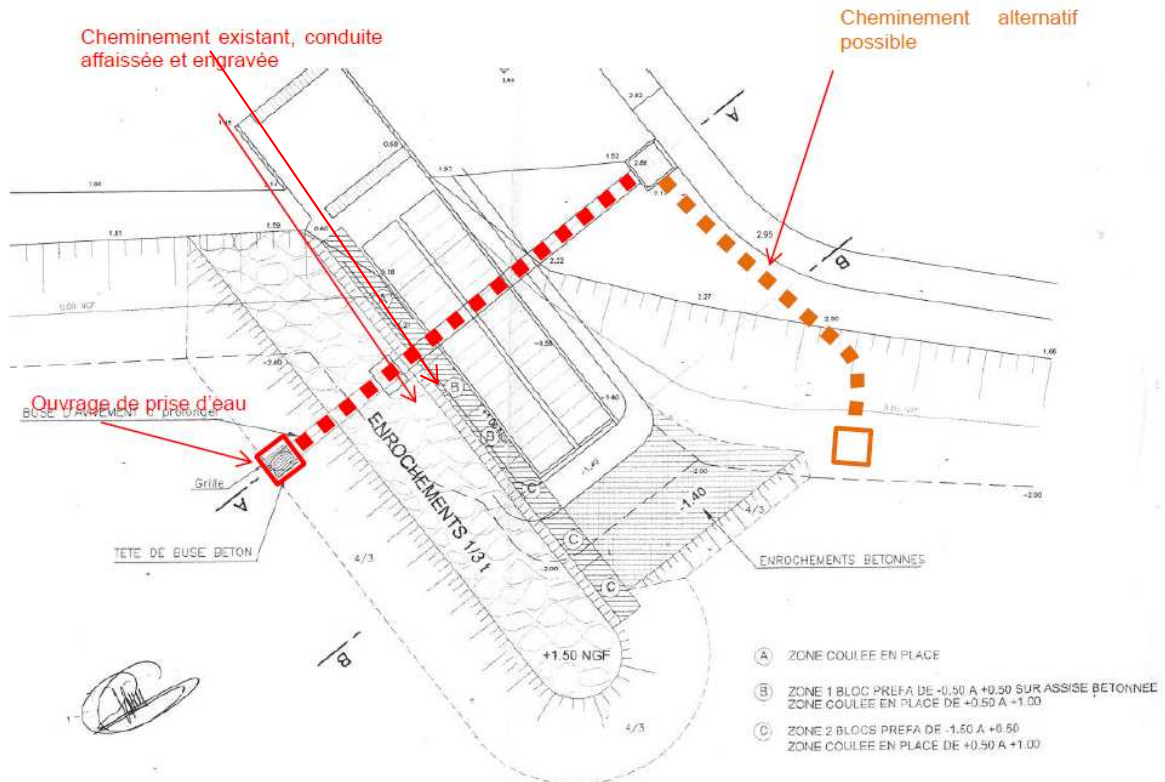
Pour confirmer la position de la conduite diffuseur en phase PRO, il importe de disposer des notes de calcul qui ont justifié le dimensionnement et la déformation des palplanches.

5.4.2 Prise d'eau et circuit d'amenée

Le nouveau circuit hydraulique intégrera un ouvrage de prise d'eau, évitant les inconvénients d'engravement constatés actuellement. L'ouvrage de tête sera une chambre béton, insérée dans le talus en enrochement, ayant au moins les caractéristiques suivantes :

- Aspirations à travers une ou plusieurs ouvertures équipées de grilles. Les ouvertures seront placées à ras ou légèrement au-dessus des enrochements, au minimum un mètre au-dessus du terrain naturel, de manière à limiter l'insertion des matériaux meubles depuis le fond. Elles auront une surface globale d'au moins 4m², limitant la vitesse d'aspiration à moins de 30cm/s, ce qui permet aux poissons de s'échapper à l'approche de la grille.
- Tronc de cône de transition entre l'intérieur de la chambre et la conduite Φ 1000, pour limiter les pertes de charge singulières.
- Résistance à l'impact des vagues déferlantes (\approx 2 à 3t/m²)

On peut placer l'ouvrage de prise d'eau au niveau de l'aspiration actuelle, mais il faut nettoyer la conduite et l'exploiter en l'état, c'est-à-dire déformée, avec le point bas qui restera une zone potentielle d'accumulation. Le talus à l'Est de la cale de mise à l'eau étant à 22m environ, il serait possible d'adopter un chemin alternatif, en plaçant la chambre dans les enrochements du talus, et en posant une nouvelle conduite sous les enrochements jusqu'à la chambre intermédiaire (Cf. principe ci-dessous). La nouvelle conduite serait en PRV, protégée par du béton, avant recouvrement par les enrochements.



Deux positions possibles de l'ouvrage de prise d'eau en tête, cheminement vers la chambre intermédiaire

Le coût d'un nouveau cheminement (env. 100 k€) est très élevé par rapport à l'entretien supplémentaire que pourrait exiger la conduite incurvée existante, d'autant qu'une visite annuelle avec extraction des concrétions éventuelles sur l'ensemble des conduites est à prévoir de toute façon. Cette variante n'est pas retenue, on prévoit de nettoyer et remettre en service le cheminement actuel.

Le tuyau d'amenée débouche sur la chambre intermédiaire existante, qui accueillera une nouvelle pompe à hélice. Celle-ci refoulera en entrée de la buse existante $\Phi 1000$ d'une longueur de 20m, passant sous le quai avant de traverser le mur en palplanches.

5.4.3 Puits de transition ou double-coudes

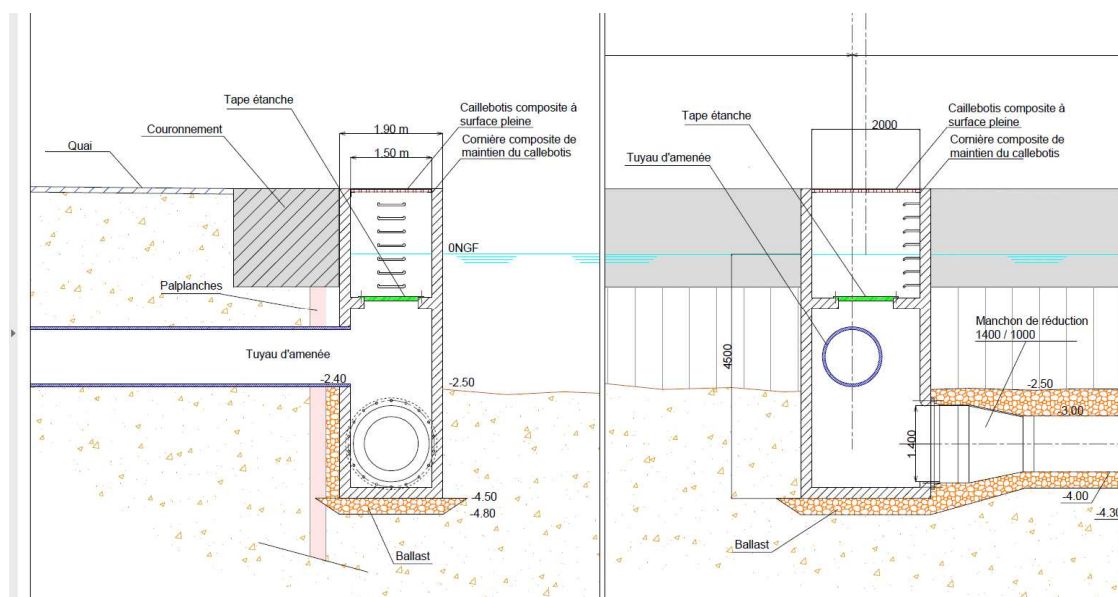
Une nouvelle chambre pourra être construite pour assurer la transition entre la buse existante et la nouvelle conduite diffuseur à ensouiller. Il s'agit d'un puits de transition, forçant l'écoulement à plonger vers le bas, sous la cote du terrain naturel, puis à amorcer un virage à gauche pour s'engager dans la conduite diffuseur, de diamètre $\Phi 1000$, au moins dans les premiers décimètres.

Le puits de transition aura les caractéristiques suivantes :

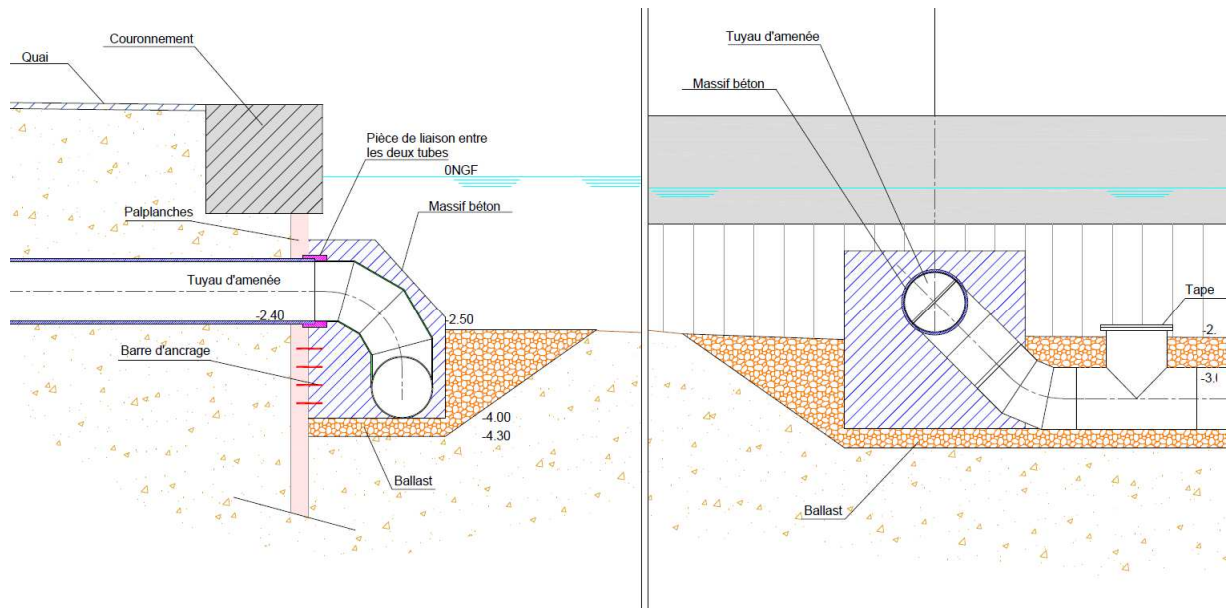
- Il permettra l'accès des plongeurs depuis le quai pour l'entretien des conduites de gros diamètre.
- La partie de chambre immergée entre les deux conduites sera étanche, car elle sera potentiellement mise en charge par l'action de la pompe. Il importe de ne pas faire déborder l'écoulement hydraulique sur le terre-plein du quai.
- L'ouvrage peut être de forme simple à section rectangulaire. Il importe d'assurer une transition de type tronc de cône à l'entrée de la conduite circulaire diffuseur.

Une alternative complètement immergée est possible, avec 2 coudes arrondies, reliant la buse existante et la conduite diffuseur. Les deux coudes devront être intégrés dans un bloc béton pour à la fois protéger le PRV de tout choc et assurer la stabilité de cette partie soumise à des réactions hydrodynamiques.

Dans les deux cas, on aura un ouvrage saillant localement sur environ 2mx2m devant le quai en palplanches. L'ouvrage immergé devra être signalé par une petite structure ou défense flottante, pour éviter le contact avec un navire. L'ouvrage émergant sera visible.



Puits de transition en sortie de buse. Fondations à confirmer selon les contraintes géotechniques

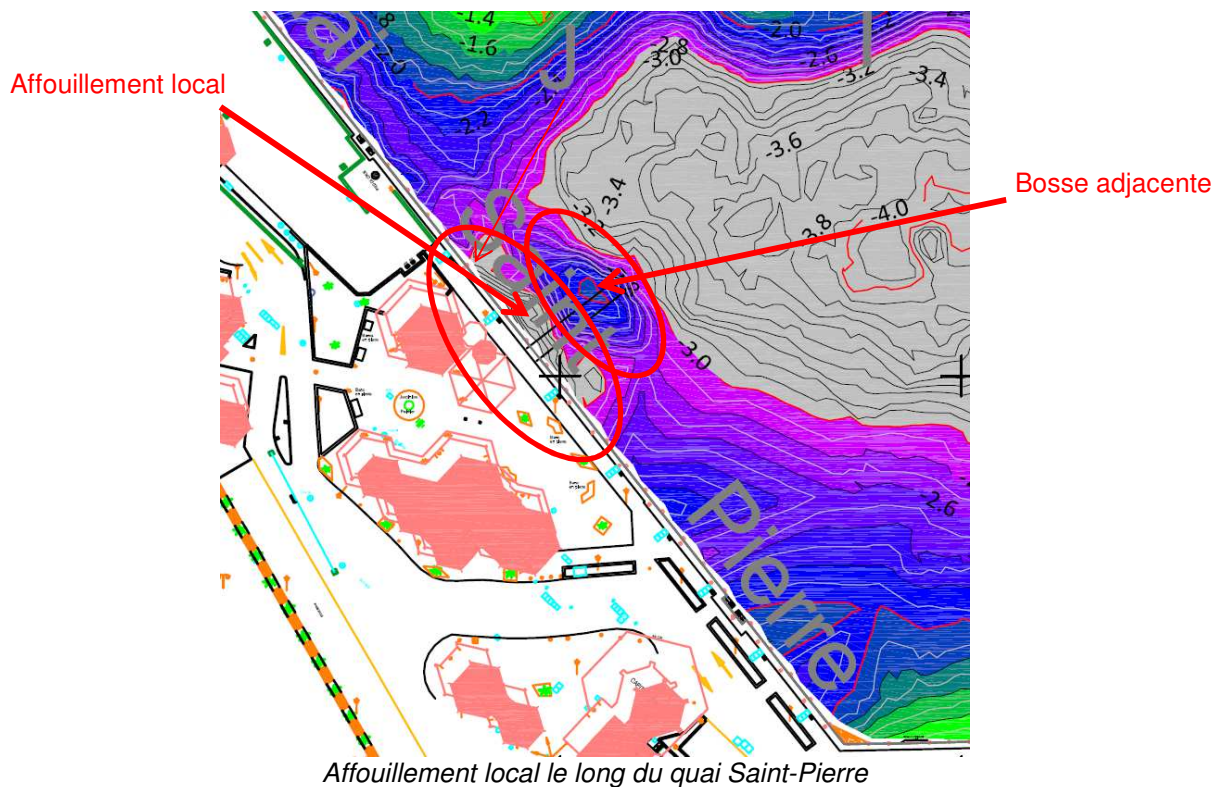


Principe du double-coudes en sortie de buse (fondation et accrochage du bloc béton à confirmer)

Les deux options étant d'un cout similaire, l'option chambre émergente, visible et facilitant l'accès, est retenue. En phase ultérieure, on prévoit même d'étendre un peu plus cette partie émergente pour former une petite plateforme d'accès au navire amarré.

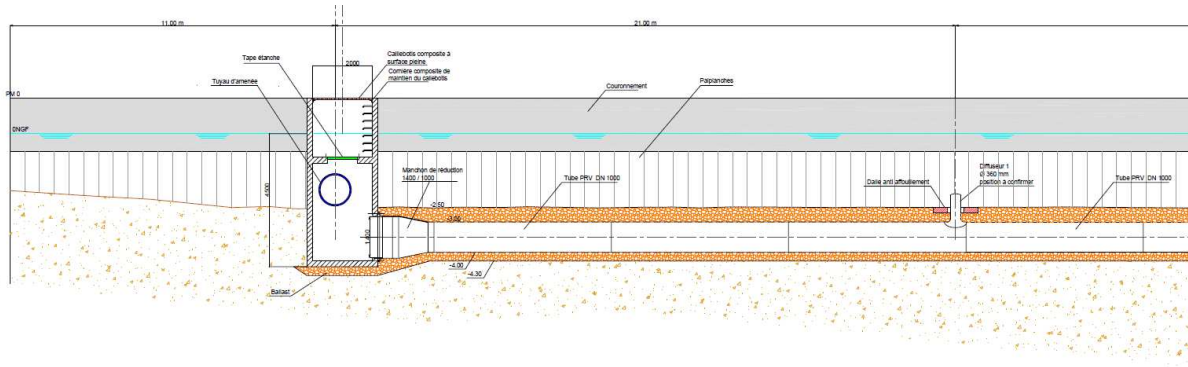
5.4.4 Conduite diffuseur ensouillée

La conduite diffuseur sera ensouillée le long des palplanches du quai Saint-Pierre, à condition de confirmer leur faible déformation attendue. Les fonds actuels sont compris entre -2.0m NGF et -2.5m NGF. On note néanmoins un affouillement local entre -3.5m NGF et -3.0m GNF sur environ 30m de long et 5m de large. Celui-ci est adjacent à une bosse culminant à -2.0m NGF. Il s'agit probablement d'un transfert de matériaux meubles sous l'effet de jets d'hélice de navires puissants par exemple.



Conserver la cote de l'affouillement local de -3.5m NGF au pied du quai n'a pas de sens au regard des besoins en tirant d'eau, dans la mesure où le fond culmine à -2.0m NGF au niveau du poste d'amarrage.

Le maintien de la cote -2.5m NGF au fond serait cohérent avec la bathymétrie actuelle. La conduite pourra être ensouillée sous la cote -3m NGF, laissant 0.5m de couverture sous le terrain naturel. La souille pourra être remblayée par des matériaux graveleux limitant le risque d'affouillement pour des hélices classiques, mais ne garantissant pas la stabilité du sol face à des jets puissants, type hydrojet, comme cela est parfois rencontré sur certains yachts de luxe, même de 30m de long.



Conduite ensouillée à -3.0m NGF, TN à -2.5m NGF

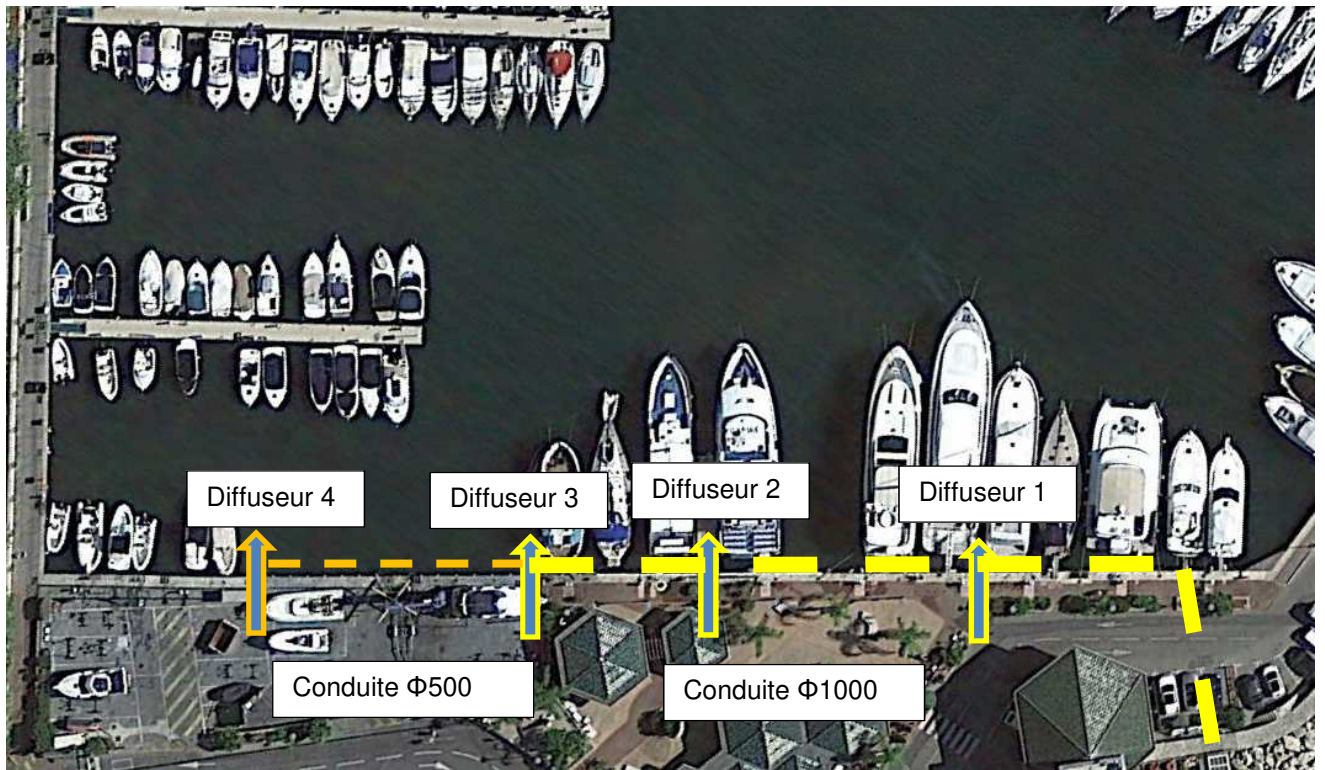
La conduite sera munie de quatre diffuseurs redistribuant chacun environ 1/4 du débit injecté par la pompe à hélice. Pour assurer une bonne répartition du débit, il importe que la section totale de sortie S_{sortie} soit bien inférieure à la section de la conduite nourricière $S_{nourrice}$. L'état de l'art [13] indique un rapport entre les sections tel que :

$$\frac{1}{3} < \frac{S_{sortie}}{S_{nourrice}} < \frac{2}{3}$$

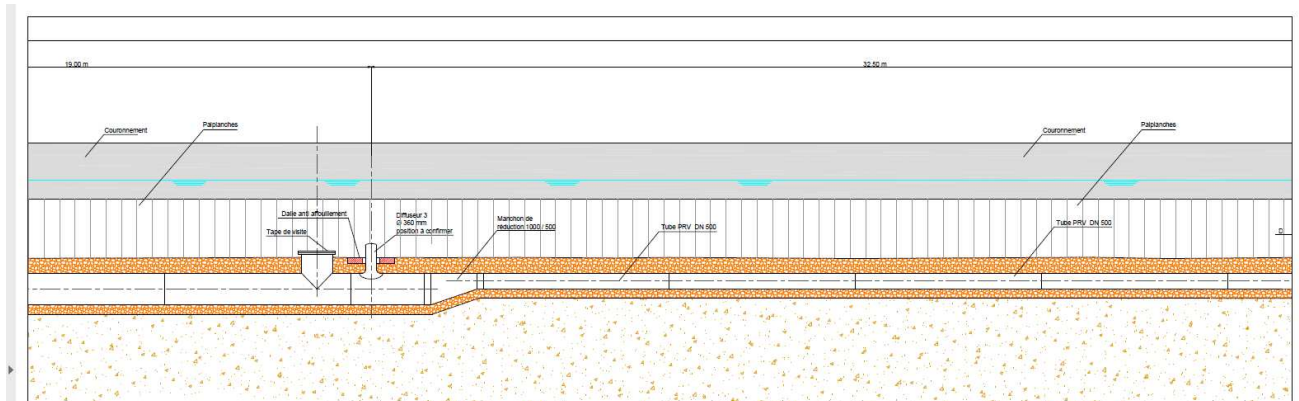
Pour une nourrice de diamètre $\Phi 1000$, soit $S_{nourrice} = 0.78 \text{ m}^2$, la section de sortie peut être conçue de telle sorte que $S_{sortie} \cong \frac{1}{2} S_{nourrice}$, soit $S_{sortie} = 0.39 \text{ m}^2$, équivalente à un diamètre de 0.36m pour chacune des sorties.

Lorsqu'une conduite-diffuseur est assez grande, il est par ailleurs intéressant de réduire le diamètre de la conduite en aval du rejet d'une partie significative du débit. Cela a l'avantage de réduire les coûts, notamment ceux associés aux volumes de dragage et d'évacuation des matériaux pollués pour constituer la souille. Il y aurait toutefois des inconvénients à l'entretien dans la mesure où les conduites de petit diamètre ne permettent pas l'accès direct des plongeurs.

Dans le cas présent, on examine la possibilité de réduire le diamètre de 1000mm à 500mm à l'aval du troisième rejet, au niveau du passage au pied du quai du chantier naval.

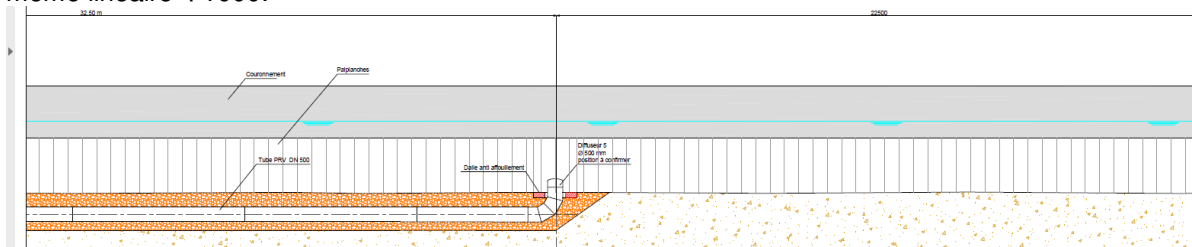


Transition conduite $\Phi 1000 - \Phi 500$



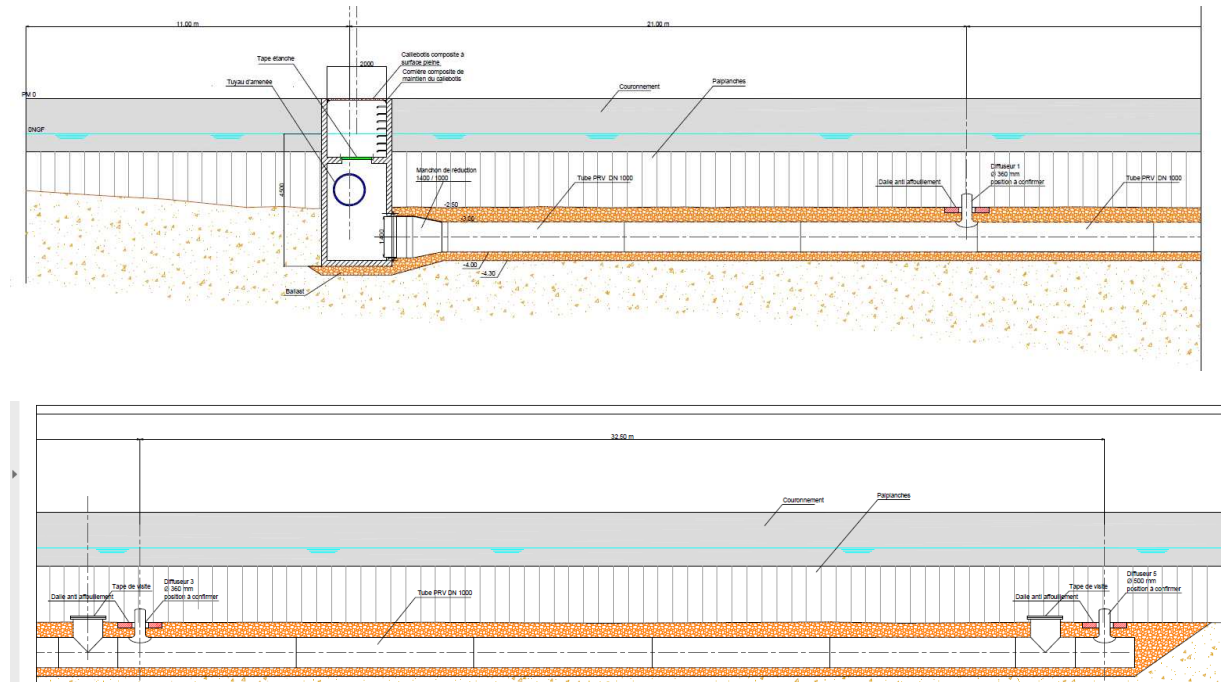
Principe de réduction de diamètre

Le quatrième diffuseur, en extrémité de la nourrice, doit être conçu différemment des trois autres, non seulement pour être compatible avec le diamètre $\Phi 500$, mais aussi pour assurer une bonne distribution des débits malgré la perte de charge augmentée dans le linéaire de conduite $\Phi 500$ par rapport à un même linéaire $\Phi 1000$.



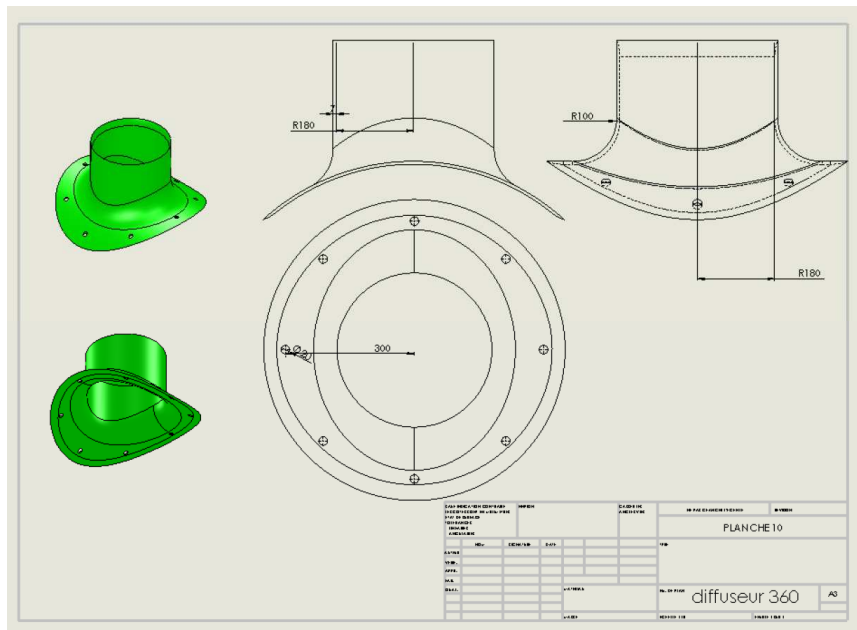
Diffuseur en bout de conduite $\Phi 500$

La solution avec conduite $\Phi 1000$ tout le long du quai Noël est schématisée ci-dessous. Les quatre diffuseurs sont identiques.



Conduite $\Phi 1000$ depuis la chambre jusqu'au dernier diffuseur

Tous les diffuseurs doivent être raccordés à la nourrice avec un profil arrondi, les arêtes vives, génératrices de pertes de charge élevées, étant à proscrire en entrée de diffuseur où les vitesses d'écoulement sont relativement élevées.



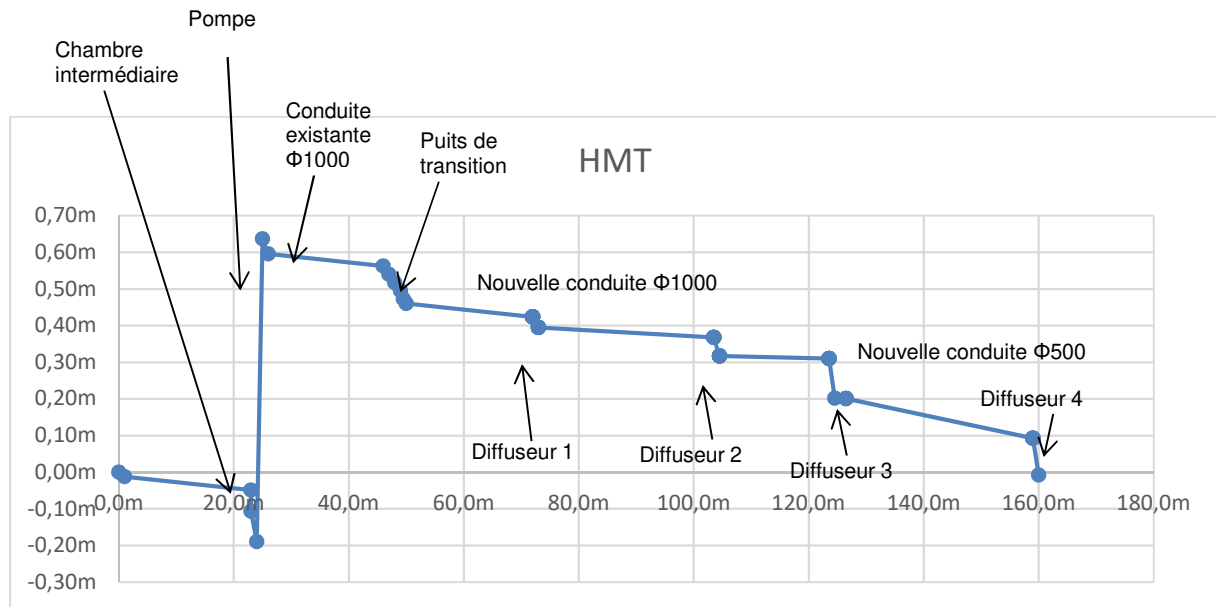
Formes arrondies au niveau des diffuseurs de sortie

5.5 INTEGRATION DES PERTES DE CHARGE GLOBALES

Le calcul de perte de charge a été développé spécifiquement en détaillant les linéaires de conduite et chaque organe hydraulique, source de perte de charge singulière. La répartition des débits par diffuseur a été calculée par itérations successives jusqu'à continuité des niveaux de pression dans la conduite principale et ceux nécessaires en amont des diffuseurs pour extraire le débit. Le tableau ci-après permet de suivre les niveaux de pression HMT le long du circuit hydraulique, dans les conditions nominales de débit $Q=1 \text{ m}^3/\text{s}$. Un exemple de calcul détaillé est reporté en annexe.

Position ou dispositif hydraulique	HMT le long du circuit hydraulique	Caractéristiques des extractions aux diffuseurs, $Q_{total} = 1m^3/s$	
Mer Méditerranée	0.000m		
Entrée dans la chambre de prise d'eau	-0.013m		
Tuyau 22m, $\Phi 1000^{(*)}$	-0.051m		
Coudes	-0.111m		
Sortie chambre intermédiaire	-0.197m		
Pompe HMT+0.84m	0.644m		
Entrée buse existante	0.601m		
Tuyau existant 20m, $\Phi 1000$	0.567m		
Sortie dans le puits de transition	0.543m		
1er coude vers le bas	0.520m		
2nd coude vers l'horizontal	0.498m		
Transition 1er - 2nd coude	0.475m		
Entrée conduite PRV	0.462m		
Tuyau 22m, $\Phi 1000$	0.425m		
Total HMT avant diffuseur	0.425m		
		Débit extrait	0.27m ³ /s
		Entrée diffuseur 1	0.066m
		Sortie diffuseur 1	0.359m
		HMT demandée pour extraction	0.425m
Aval diffuseur 1	0.392m		
Tuyau 30.5m, $\Phi 1000$	0.365m		
		Débit extrait	0.26m ³ /s
		Entrée diffuseur 2	0.032m
		Sortie diffuseur 2	0.333m
		HMT demandée pour extraction	0.364m
Aval diffuseur 2	0.315m		
Tuyau 19m, $\Phi 1000$	0.308m		
		Débit extrait	0.25m ³ /s
		Entrée diffuseur 3	0.013m
		Sortie diffuseur 3	0.295m
		HMT demandée pour extraction	0.308m
Aval diffuseur 3	0.199m		
Rétrécissement $\Phi 1000/\Phi 500$	0.199m		
Tuyau 32.5m, $\Phi 500$	0.090m		
		Débit extrait	0.23m ³ /s
		Entrée diffuseur 4	0.023m
		Sortie diffuseur 4	0.067m
		HMT demandée pour extraction	0.090m
Sortie finale bassin portuaire	0.000m		

Calcul fait avec $\Phi 990mm$, après examen des conduites PRV disponibles.



Hauteur manométrique (HMT) le long de l'écoulement hydraulique

On montre que l'on obtient une bonne répartition du débit avec trois diffuseurs de diamètre de sortie $\Phi 360\text{mm}$ répartis sur la conduite $\Phi 1000$, et un diffuseur de diamètre plus élevé, $\Phi 500\text{mm}$ au bout de la conduite $\Phi 500\text{mm}$. Pour ce dernier, un simple raccord en T associant les mêmes diamètres $\Phi 500\text{mm}$ serait suffisant.

Une synthèse des répartitions de débit et des pertes de charge globale est présentée dans le tableau ci-après, incluant quelques sensibilités sur les niveaux de débit et d'encrassement des conduites.

Débit généré par la pompe	Configuration	Q diffuseur 1 Φ360mm	Q diffuseur 2 Φ360mm	Q diffuseur 3 Φ360mm	Q diffuseur 4 Φ500mm	ΔH global
1.0 m ³ /s	nominale, conduites entretenues, rugosité 1mm	0.27 m ³ /s	0.26 m ³ /s	0.25 m ³ /s	0.23 m ³ /s	0.84m
1.2 m ³ /s	nominale, conduites entretenues, rugosité 1mm	0.31 m ³ /s	0.30 m ³ /s	0.30 m ³ /s	0.29 m ³ /s	1.17m
0.80 m ³ /s	nominale, conduites entretenues, rugosité 1mm	0.25 m ³ /s	0.24 m ³ /s	0.21 m ³ /s	0.10 m ³ /s	0.62m
1.0 m ³ /s	conduites encrassées, rugosité 1cm	0.29 m ³ /s	0.28 m ³ /s	0.25 m ³ /s	0.18 m ³ /s	1.02m
1.0 m ³ /s	conduites lisses, rugosité 0.1mm	0.26 m ³ /s	0.25 m ³ /s	0.24 m ³ /s	0.25 m ³ /s	0.73m

Le débit nominal $Q=1\text{m}^3/\text{s}$ est associé à une perte de charge estimée à $\Delta H = 0.84\text{m}$. Cela est compatible avec les possibilités de pompes à hélice de diamètre $\approx 0.8\text{m}$. De telles pompes admettent même une perte de charge atteignant $\Delta H = 1.2\text{m}$ pour un débit de l'ordre de $1.2\text{m}^3/\text{s}$. Cela signifie que la pompe pourrait être utilisée au maximum de sa capacité pour augmenter de 20% de renouvellement du bassin par rapport au débit nominal étudié $Q=1\text{m}^3/\text{s}$. A l'inverse, un refoulement $Q=0.8\text{m}^3/\text{s}$ augmenterait le temps de renouvellement, mais réduirait le besoin en perte de charge, donc la consommation d'énergie.

La variation du débit à la pompe est une option très intéressante pour ajuster la consommation électrique et surtout s'adapter aux besoins réels du bassin, face à la dégradation de la qualité des eaux. Cette étude est limitée à quelques ordres de grandeur. Le retour d'expérience réel, notamment le maintien d'une eau claire, permettra de choisir le débit de pompe adapté. Le boîtier de commande électrique du système de pompage devra dans ce cas inclure un variateur de fréquence imposant le nombre de tours et donc le débit de la pompe.

Au débit nominal $Q=1\text{m}^3/\text{s}$, ou plus $Q=1.2\text{m}^3/\text{s}$, les débits sont quasi-équitablement répartis dans les quatre diffuseurs, ce qui est recherché pour harmoniser le renouvellement du bassin. A débit moindre, $Q=0.8\text{m}^3/\text{s}$, la perte de charge en sortie est moins élevée, si bien que les jets ont tendance à être plus puissants sur les premiers diffuseurs. Ce fonctionnement, dit économique, sera réservé aux périodes peu propices à la dégradation de qualité des eaux.

Les pompes à hélice ont un rendement de l'ordre de 62% entre la puissance à l'arbre et la puissance hydraulique véritablement transmise. Le rendement entre la puissance totale absorbée bornes de la pompe et la puissance hydraulique est même de 50%. Les consommations attendues auraient les ordres de grandeur suivants :

Débit généré par la pompe	ΔH global	Puissance hydraulique	Consommation électrique estimée	Cout 90 jours à 0.10€ HT du kWh
0.80 m ³ /s	0.62m	5.0kW	10.0kW	2160 €
1.0 m ³ /s	0.84m	8.4kW	16.8kW	3628 €
1.2 m ³ /s	1.17m	13.9kW	27.9kW	6026 €

5.6 EFFETS DES ALTERNATIVES SUR LES PERTES DE CHARGE

Double-coudes

Sur la configuration nominale, $Q=1\text{m}^3/\text{s}$, l'emploi d'un double-coudes réduirait de 0.05m ($\Delta H=0.79\text{m}$ au lieu de $\Delta H=0.84\text{m}$) la perte de charge globale. Ce faible écart ne remet toutefois pas en cause le choix de la chambre émergente.

Conservation de la conduite $\Phi 1000$ jusqu'au bout

Un prolongement de la conduite $\Phi 1000$ exige un peu plus de dragage, mais offre l'avantage d'un entretien plus facile et plus sûr, dans la mesure où des plongeurs peuvent pénétrer sur tout le linéaire. Le nettoyage du $\Phi 500$ ne serait réellement faisable que par un écoulement hydraulique forcé, induisant de pouvoir boucher les trois diffuseurs en amont.

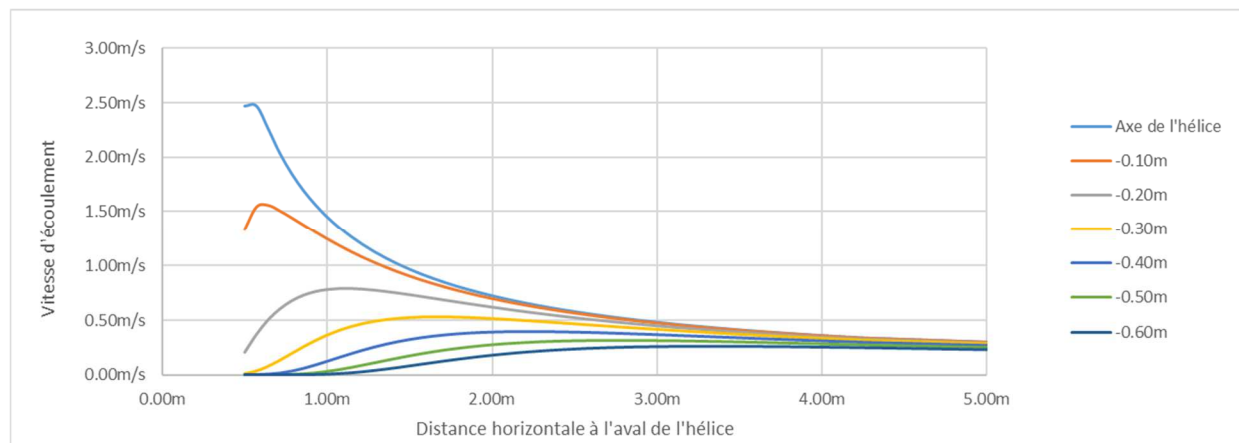
Sur la configuration nominale, $Q=1\text{m}^3/\text{s}$, le prolongement de la conduite $\Phi 1000$ induirait une perte de charge globale légèrement supérieure de 0.03m ($\Delta H=0.87\text{m}$ au lieu de 0.84m). Avec un diffuseur de 0.36m de diamètre en bout de conduite, identique aux 3 précédents, la répartition des débits serait légèrement moins homogène, $Q_{\text{dif1}}=0.28\text{m}^3/\text{s}$, $Q_{\text{dif2}}=0.27\text{m}^3/\text{s}$, $Q_{\text{dif3}}=0.25\text{m}^3/\text{s}$, $Q_{\text{dif4}}=0.20\text{m}^3/\text{s}$ mais acceptable.

Les fonctionnements hydrauliques entre les deux options « rétrécissement à $\Phi 500$ » et « $\Phi 1000$ continu » sont assez proches. L'option « rétrécissement à $\Phi 500$ » apporte une légère économie (9k€ sur $\approx 430\text{k€}$, soit 2%) mais peu substantielle au regard des inconvénients qu'elle engendre en termes d'entretien. L'option « $\Phi 1000$ continu » est retenue par la maîtrise d'ouvrage.

5.7 CARACTERISTIQUES DES JETS HYDRAULIQUES

5.7.1 Hélice de brassage

Le graphe ci-dessous indique l'évolution des vitesses à l'aval de l'agitateur. L'écoulement primaire à travers le diamètre $\approx 0.2\text{m}$ de l'hélice est d'environ 90 l/s, avec une vitesse de 2.5m/s, immédiatement en aval, dans l'axe de l'hélice.



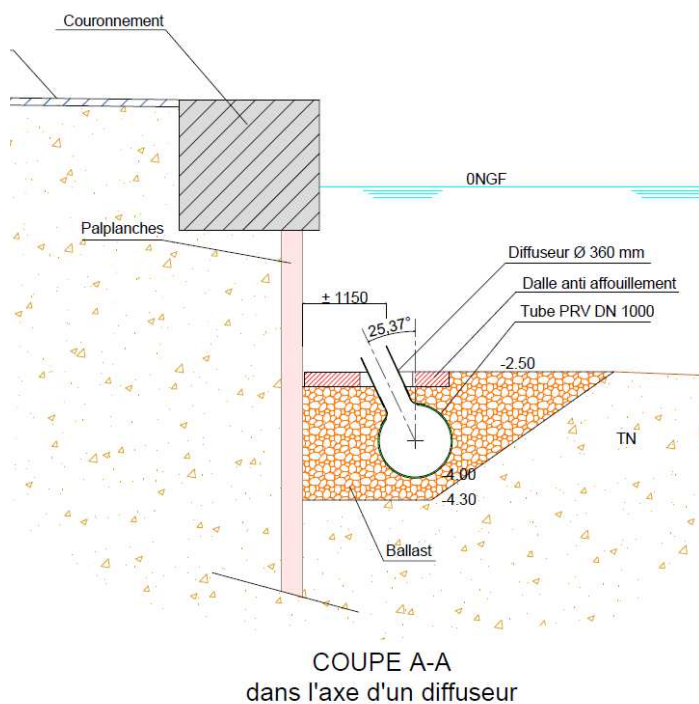
Estimation des vitesses d'écoulement en aval de l'agitateur [14]

La vitesse dans l'axe chute rapidement, devenant inférieure à 0.5m/s à 3m en aval. Une telle vitesse entraînerait une dérive locale d'un navire, mais avec des efforts très minimes (<100kg). A 5m en aval, la vitesse d'écoulement est déjà sous la barre $V=0.3\text{m}$ sur un rayon de 0.6m autour de l'axe. Elle est sous la barre $V=15\text{cm/s}$ à 10m sur un rayon de 1.5m.

Si l'hélice n'est pas suffisamment immergée, elle crée un vortex au niveau de la surface qui perturbe son fonctionnement et réduit sa durée de vie. Pour une hélice de 0.2m de diamètre, une plaque anti-vortex est nécessaire si elle est située à moins de 65cm de la surface libre. Il sera opportun de la placer sous le niveau -1.0m NGF (soit une couverture d'au moins 0.65m au niveau d'eau le plus bas 0m CM).

5.7.2 Sortie de diffuseur

Il a été montré numériquement que pointer les jets de sortie vers l'horizontale n'était pas une disposition essentielle. La conduite étant ensouillée, on privilégie un rejet plutôt vertical, même pointé vers le quai à l'arrière pour limiter l'impact local sur les bateaux. Le comportement du jet devra faire l'objet d'une approche plus précise (étude numérique CFD), notamment en fonction de la position définitive de la conduite par rapport au quai en palplanches.



Position pressentie de la sortie du diffuseur (à confirmer par étude CFD spécifique)

6 SYNTHÈSE DES OUVRAGES ET DISPOSITIFS

La méthode la plus sûre pour assurer une bonne qualité des eaux dans un bassin favorisant la stagnation des eaux est celle du renouvellement de l'eau. Cette méthode est adaptée à Golfe Juan, dans la mesure où une buse d'avivement est déjà présente. L'exploitation de la buse, à l'aide d'une pompe à hélice, déjà utilisée par le passé, mérite d'être optimisée pour assurer une circulation homogène sur l'ensemble du bassin. La pompe à hélice permet d'injecter un débit nominal de $1\text{m}^3/\text{s}$ (bassin renouvelé à 80% sur 48 heures), pouvant être poussé momentanément jusqu'à $1.2\text{m}^3/\text{s}$. Ce débit est réparti en quatre points d'injection le long du quai Saint-Pierre, via une conduite diffuseur. L'injection d'eau constamment renouvelée au pied du quai Saint-Pierre doit être complétée par l'action d'un petit agitateur, placé au coin Nord-Est du port, permettant d'attirer une grande partie du débit injecté vers les zones non renouvelées naturellement. Il est prévu d'ensouiller la conduite-diffuseur pour limiter l'interaction avec l'exploitation des zones de mouillage du quai Saint-Pierre.

Les principales caractéristiques des dispositifs et ouvrages appartenant au circuit de renouvellement sont rappelées ci-après.

Ouvrage ou dispositif	Caractéristiques principales
Chambre de prise d'eau	Ouvrage inséré dans les enrochements. Grille d'aspiration au moins 1m au-dessus des fonds meubles Vitesse d'aspiration à l'approche de la grille < 0.3m/s
Conduite d'amenée	$\Phi 1000$ existant entre chambre de prise d'eau et la chambre intermédiaire.
Chambre intermédiaire	Ouvrage existant
Buse $\Phi 1000$ sous le quai	Ouvrage existant, à nettoyer
Puits de transition ou coudes	Ouvrage au bout de la buse $\Phi 1000$ existante, débouchant sur le quai Saint-Pierre en palplanches. Chambre de transition émergeant entre la buse existante et la conduite diffuseur Accroche ou fondation de l'ouvrage à vérifier
Conduite diffuseur $\Phi 1000$ $\approx 100\text{m}$	Conduite en PRV ensouillée sur $\approx 100\text{m}$, munie de 4 diffuseurs à raccords arrondis de diamètre de sortie 360mm Tenue et comportement des palplanches à vérifier
Pompe à hélice	Diamètre d'hélice $\approx 80\text{cm}$ Débit variable $0.8\text{m}^3/\text{s}$ à $1.2\text{m}^3/\text{s}$ HMT, 0.6m à 1.2m Puissance absorbée aux bornes $\approx 10\text{ kW}$ à 28kW Pompe installée dans la chambre intermédiaire existante
Agitateur à hélice	Poussée nominale $\approx 0.2\text{kN}$ Diamètre d'hélice $\approx 20\text{cm}$ Vitesse dans l'axe de l'hélice $\approx 2.5\text{ m/s}$ Puissance absorbée aux bornes $\approx 1.0\text{ kW}$ Agitateur installé au niveau du quai de l'aire de carénage, vers mi-hauteur

7 ESTIMATION DES COUTS DE TRAVAUX

Avivement du plan d'eau, base conduite ensouillée (canalisation diamètre 1000 mm)

	Montant HT en €
Prix généraux	24 000
Infrastructure du réseau de diffusion	317 070
Matériel de pompage	68 500
Curage de la canalisation de pompage existante	25 000
TOTAL HT	434 570 €

Remarque 1 : un dragage complémentaire est souhaité par le MOA aux abords du quai, afin de retrouver un tirant d'eau de 2,50m (voir détail ci-après §9).

	Montant HT en €
Dragage complémentaire : 500 m ³	100 000
Evacuation en décharge 300 m ³	100 000
TOTAL HT	200 000 €

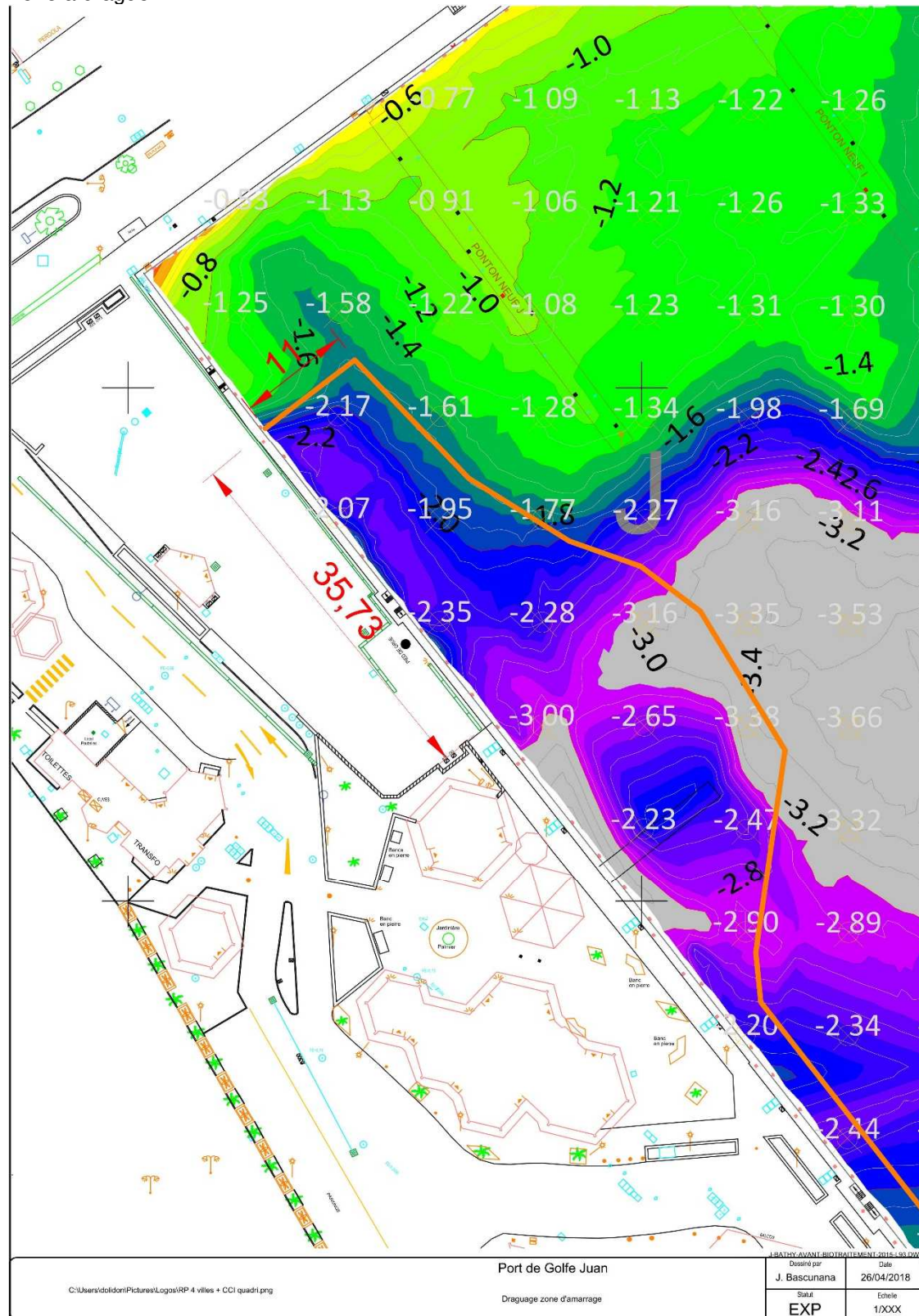
TOTAL HT	634 570 €
TOTAL TTC	761 484 €

8 REFERENCES

- [1] « Prises d'eau et rejets en mer », Jean Bougis 2014.
- [2] Analyse statistique des niveaux d'eau extrêmes, environnements maritime et estuarien, CETMEF, avril 2013.
- [3] Analyse des surcotes extrêmes le long des côtes métropolitaines. CETMEF, avril 2013.
- [4] « Le guide des enrochements, l'utilisation des enrochements dans les ouvrages hydrauliques » (version française du « rock manual »).
- [5] Coastal Engineering Manual, Part VI, Fundamental of design, Hans F. Burcharth and Steven A. Hughes (DE).
- [6] SHOM, références altimétriques maritimes. Ports de France Métropolitaine et d'Outre-Mer. Cotes du zéro hydrographique et niveaux caractéristiques de la marée. Edition 2014.
- [7] GIEC, changements climatiques 2013, les éléments scientifiques, résumé à l'attention des décideurs – Contribution du groupe de travail 1 au cinquième rapport d'évaluation du groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat.
- [8] Isabel Bravo et Al, « Studies on cultures of *Ostreopsis cf ovata*, life cycle observations », ICHA14 conference proceedings Crete 2010
- [9] M.R Shah et Al, « Growth characteristics of three benthic dinoflagellates in mass cultures and their antioxydant properties », journal of fisheries and aquatic science, juin 2016
- [10] Projet UEM Monaco, extension en mer au droit de l'anse du Portier, SAM Anse du Portier, « étude de courantologie renouvellement des eaux et devenir des macro-déchets », groupement Tractebel-Andromède-DHI, décembre 2015
- [11] GEOHAB 2012, Global Ecology and Oceanography of Harmful Algal Blooms. GEOHAB Core Research Project : HABs in benthic systems. E. Berdalet, P. Tester, A. Zingone, IOC of UNESCO and SCOR, Paris and Newark, 64pp.
- [12] A. LENCASTRE, "Hydraulique Générale", Editions Eyrolles, 633 p.
- [13] H.B FISCHER, E.J LIST, R.C.Y KOH, J. IMBERGER, N.H. BROOKS, "Mixing in inland and coastal waters", Academic press Inc.
- [14] BAW (Bundesanstalt für Wasserbau) Code of Practice, Prinples for the design of bank and bottom protection for inland waterways (GBB)

9 ANNEXE DRAGAGE

Zone à draguer



Zone de stockage des sédiments extraits pour essorage

