



HAL
open science

Dynamique des rejets d'effluents, issus de la production hors-sol de salmonidés, à la sortie du port des Flamands, en rade de Cherbourg

Emmanuel Poizot, Yann Méar

► To cite this version:

Emmanuel Poizot, Yann Méar. Dynamique des rejets d'effluents, issus de la production hors-sol de salmonidés, à la sortie du port des Flamands, en rade de Cherbourg. Université de Caen Basse-Normandie; LUSAC (Laboratoire Universitaire des Sciences Appliquées de Cherbourg), Université de Caen Basse Normandie; Institut National des Sciences et Techniques de la Mer. 2023, pp.31. <hal-04815586>

HAL Id: hal-04815586

<https://normandie-univ.hal.science/hal-04815586v1>

Submitted on 3 Dec 2024

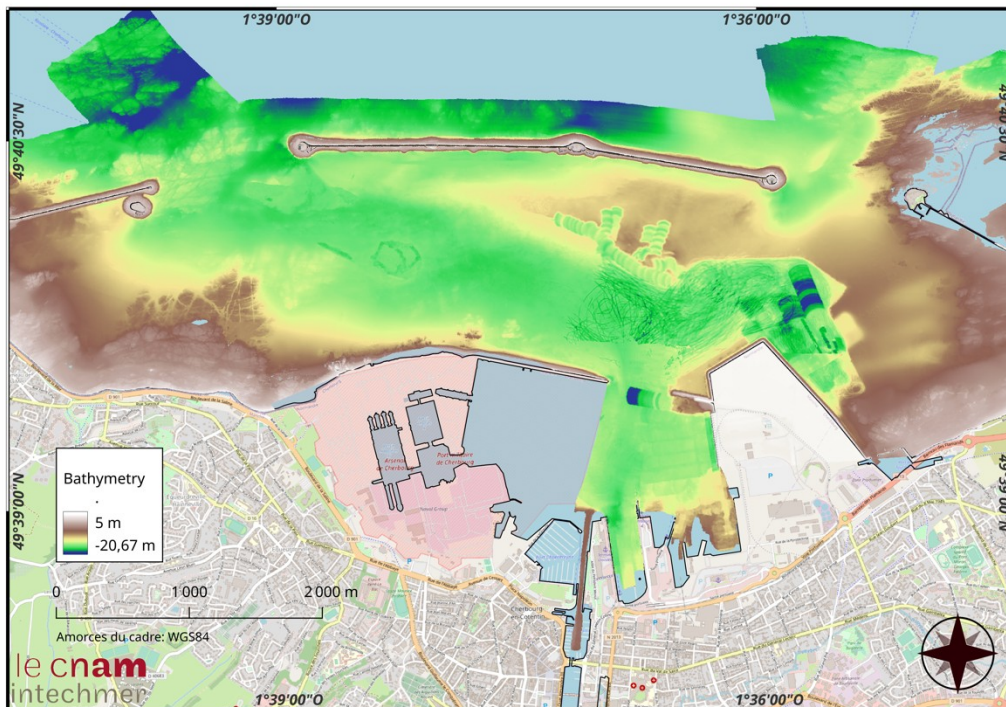
HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire HAL, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons CC BY 4.0 - Attribution - International License

Dynamique des rejets d'effluents,
issus de la production hors-sol de salmonidés,
à la sortie du port des Flamands, en rade de Cherbourg.
(19/10/2023)



Poizot Emmanuel et Méar Yann

Sommaire

I.	INTRODUCTION.....	4
II.	MÉTHODOLOGIE.....	5
III.	HYDRODYNAMIQUE.....	8
III.1.	A L'ÉCHELLE DE LA RADE.....	8
III.1.1.	<i>Circulation résiduelle.....</i>	<i>8</i>
III.1.2.	<i>Vitesse et direction des courants de marée pour des points remarquables.....</i>	<i>11</i>
IV.1.	AU NIVEAU DU POINT DE REJETS.....	15
IV.1.1.	<i>Circulation résiduelle.....</i>	<i>15</i>
IV.1.2.	<i>Vitesse et direction des courants.....</i>	<i>17</i>
IV.	DISPERSION SPATIALE DES REJETS.....	19
IV.1.	PRÉAMBULE.....	19
IV.2.	A L'ÉCHELLE DE LA RADE.....	20
IV.1.1.	<i>Au niveau des stations caractéristiques.....</i>	<i>20</i>
IV.1.2.	<i>Répartition spatiale en fin du flot à l'échelle de la rade.....</i>	<i>24</i>
IV.1.3.	<i>Répartition spatiale en fin du jusant à l'échelle de la rade.....</i>	<i>26</i>
V.2.	AU NIVEAU DU POINT DE REJETS.....	28
V.	DÉTERMINATION DES HEURES FAVORABLES AUX REJETS.....	28
VI.	CONCLUSION.....	29

Liste des figures

<i>Figure 1 : Localisation du point d'émission des rejets simulé dans la modélisation numérique. Chacun des documents cartographiques et graphiques est accompagné d'une analyse permettant une lecture et une compréhension synthétique des résultats.....</i>	<i>5</i>
<i>Figure 2 : Emboîtement des grilles utilisées pour les simulations MARS2D.....</i>	<i>7</i>
<i>Figure 3 : Courants de marée résiduels en rade de Cherbourg pour un coefficient de 40 (13/02/2023-18/02/23). Un gyre dextre est mis en évidence dans la petite rade de Cherbourg. Il y occupe la quasi-totalité tout en étant perturbé par le découpage du trait de côte dû à de nombreux quais et terre-pleins et par l'existence de deux petits gyres senestres localisés de part et d'autre.....</i>	<i>8</i>
<i>Figure 4 : Courants de marée résiduels en rade de Cherbourg pour un coefficient de 80 (04/02/2023-09/02/23).....</i>	<i>9</i>
<i>Figure 5 : Courants de marée résiduels en rade de Cherbourg pour un coefficient de 112 (20/02/2023-25/02/23).....</i>	<i>10</i>
<i>Figure 6 : Localisation des points caractéristiques des courants de marée dans la rade de Cherbourg.....</i>	<i>11</i>
<i>Figure 7 : Relation vitesse/direction des courants pour 7 points caractéristiques de l'hydrodynamique de la rade de Cherbourg.....</i>	<i>12</i>
<i>Figure 8 : Vitesses et directions des points remarquables sélectionnés dans la rade de Cherbourg et à l'extérieur (localisation des points à la figure 6).....</i>	<i>13</i>
<i>Figure 9 : Vitesses versus directions au point de rejet virtuel localisé à la sortie du port des Flamands.....</i>	<i>14</i>
<i>Figure 10 : Synthèse des paramètres de courant (vitesse/direction) à l'échelle de la rade de Cherbourg.....</i>	<i>14</i>
<i>Figure 11 : Courants de marée résiduels au large du port des Flamands pour un coefficient de 40 (13/02/2023-18/02/23).....</i>	<i>15</i>
<i>Figure 12 : Courants de marée résiduels au large du port des Flamands pour un coefficient de 80 (04/02/2023-09/02/23).....</i>	<i>16</i>
<i>Figure 13 : Courants de marée résiduels au large du port des Flamands pour un coefficient de 112 (20/02/2023-25/02/23).....</i>	<i>16</i>
<i>Figure 14 : Variations de la vitesse et de la direction des courants en fonction de la hauteur d'eau au niveau du point de rejet (coeff. 40).....</i>	<i>17</i>
<i>Figure 15 : Variations de la vitesse et de la direction des courants en fonction de la hauteur d'eau au niveau du point de rejet (coeff. 80).....</i>	<i>18</i>
<i>Figure 16 : Variations de la vitesse et de la direction des courants en fonction de la hauteur d'eau au niveau du point de rejet (coeff. 112).....</i>	<i>18</i>
<i>Figure 17 : Evolution des coefficients de marée pour chaque période de 5 jours de chaque coefficient de marée étudié (coeffs. 40, 80 et 112).....</i>	<i>19</i>
<i>Figure 18 : Dispersion des rejets conservatifs au point 1 pour les 3 coefficients étudiés.....</i>	<i>20</i>
<i>Figure 19 : Dispersion des rejets conservatifs au point 2 pour les 3 coefficients étudiés.....</i>	<i>21</i>
<i>Figure 20 : Dispersion des rejets conservatifs au point 3 pour les 3 coefficients étudiés.....</i>	<i>22</i>
<i>Figure 21 : Dispersion des rejets conservatifs au point 4 pour les 3 coefficients étudiés.....</i>	<i>22</i>
<i>Figure 22 : Dispersion des rejets conservatifs au point 5 pour les 3 coefficients étudiés.....</i>	<i>23</i>
<i>Figure 23 : Dispersion des rejets conservatifs au point 6 pour les 3 coefficients étudiés.....</i>	<i>24</i>
<i>Figure 24 : Dispersion spatiale à la fin du flot (coeffs 112, 80 et 40) des effluents à l'échelle de la rade.....</i>	<i>25</i>
<i>Figure 25 : Dispersion spatiale à la fin du jusant (coeffs. 112, 80 et 40) des effluents à l'échelle de la rade.....</i>	<i>27</i>
<i>Figure 26 : Dispersion des rejets conservatifs au point 7 pour les 3 coefficients étudiés.....</i>	<i>28</i>

Liste des tableaux

<i>Tableau 1 : Principales caractéristiques des courants au niveau du point de rejet virtuel.....</i>	<i>11</i>
<i>Tableau 2 : Evolution des coefficients de marée 2 jours avant et 2 jours après l'apparition des coefficients étudiés (coeffs. 40, 80 et 112).....</i>	<i>19</i>

I. Introduction

Dans le cadre du développement de l'AMTI en rade de Cherbourg, la société GMG a sollicité l'équipe du LUSAC-Cnam/Intechmer afin de répondre à deux questions principales :

- réaliser une étude de la dispersion des rejets dissous dans la rade de Cherbourg avec une analyse plus précise aux abords du port des Flamands ;
- définir les heures les plus favorables aux rejets de résidus de production en solution aux abords du port des Flamands.

Pour répondre à ces questions, l'équipe du LUSAC-Cnam/Intechmer met en place un modèle numérique hydrodynamique.

La première étape du travail demandé consiste en une étude de la **dynamique** de la masse d'eau (intensité et direction des courants) à l'échelle de **la rade de Cherbourg** ainsi que dans la zone proche du **port des Flamands**. Ce travail permet d'identifier les principales caractéristiques des vitesses et des directions des courants qui vont influencer la répartition géographique des rejets.

La seconde étape considère un volume constant d'eau contenant les matières dissoutes rejetées. Ce volume d'eau est injecté en un point défini d'un commun accord avec la société GMG. Le volume de rejet est aussi défini par la société GMG (Fig. 1).

L'analyse conjointe des résultats hydrodynamiques et de la dispersion des effluents au point de rejet permet la détermination des horaires les plus favorables à la dilution des rejets. En accord avec la société GMG, 3 périodes distinctes sont plus particulièrement analysées, correspondant à 3 valeurs de coefficient de marée : 40, 80 et 112.

Les résultats obtenus sont illustrés par :

- une carte à l'échelle de la rade de Cherbourg des courants résiduels pour chacun des coefficients de marée étudiés. Chacune des cartes représente la direction et la vitesse des courants aux nœuds d'une grille de 25 mètres de côtés ;
- des roses de courants définies sur des points d'intérêts particuliers ;
- une série de cartes à l'échelle du 1/12500^{ème} permettant de préciser la dynamique de la masse d'eau à la sortie du port des Flamands ;
- une série de graphiques permettant de visualiser au niveau du point de rejet, les variations temporelles de la hauteur d'eau, de la vitesse et de la direction des courants ;
- une série de graphiques concernant les variations de concentration des rejets sur des points d'intérêts localisés en grande rade et pour les 3 situations d'intensité de forçage marée ;
- une série de cartes à l'échelle de la rade de Cherbourg illustrant la dispersion géographique des rejets ;
- une série de cartes à l'échelle de la zone d'injection virtuelle illustrant la dispersion géographique des rejets .

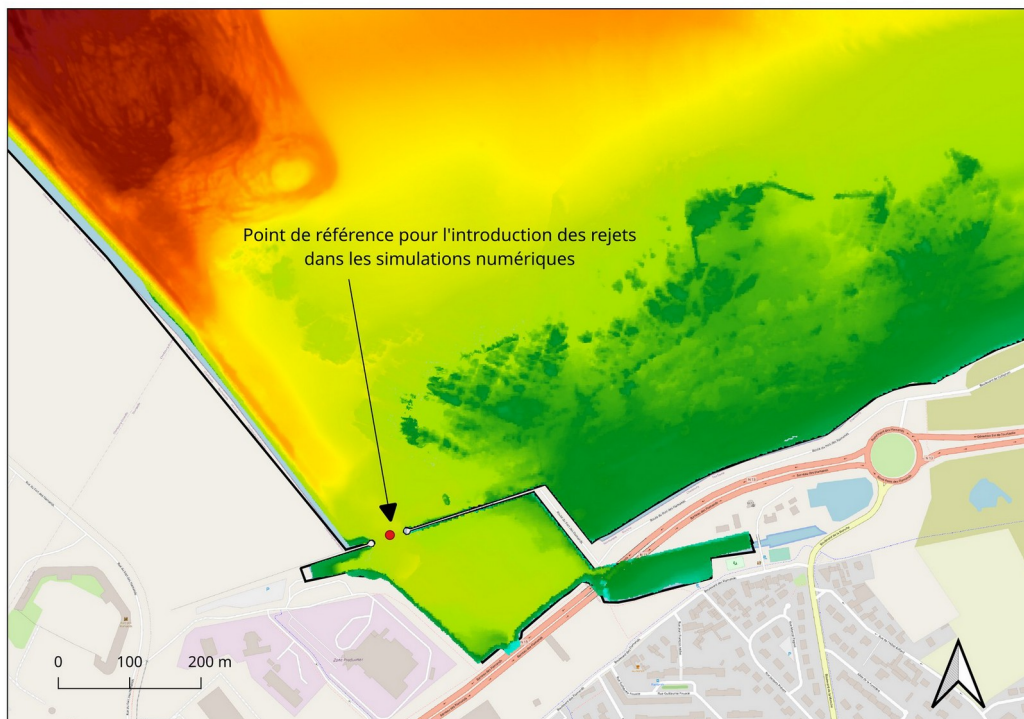


Figure 1 : Localisation du point d'émission des rejets simulé dans la modélisation numérique. Chacun des documents cartographiques et graphiques est accompagné d'une analyse permettant une lecture et une compréhension synthétique des résultats.

Avec le présent rapport d'analyse, une animation montrant les variations géographiques et temporelles de la concentration des rejets des matières dissoutes issues de la production de salmonidés est fournie.

II. Méthodologie

La propagation de la marée dans les mers littorales engendre des ondes de fréquences diverses qui sont à l'origine de la modification du niveau d'eau. Cette variation de niveau s'accompagne de **courants de marée**. Le courant de marée montante se nomme flux ou flot, le courant de marée descendante se nomme reflux ou jusant. En fonction des conditions locales (morphologie des fonds, complexité du littoral), une déconnexion du sens du courant (flot et jusant) avec les situations de pleine mer et de basse mer peut apparaître. Cette déconnexion peut aussi entraîner des durées de flot et de jusant différentes pour un cycle de marée.

La composante moyenne (fréquence nulle) de ces courants de marée prend le nom du **courant résiduel**. A chaque instant, la particule possède la vitesse locale du fluide. C'est ce courant résiduel qui est en partie responsable des transports moyens et son étude est fondamentale lorsque l'on veut étudier des phénomènes de dispersion. Une particule entraînée par l'écoulement aura, au cours d'une certaine période de temps, une dérive moyenne appelée « dérive Lagrangienne ». Cette dérive Lagrangienne est interprétée comme la somme de deux dérives, issues de processus différents : dérive Eulérienne (courant moyen en un point donné) et dérive de Stokes (effet des gradients de vitesse dans la direction de l'entraînement).

Le courant résiduel Eulérien est, d'un point de vue pratique, le courant qui reste quand on a retranché les composantes du courant de périodes finies, en un point. Responsable de tous les phénomènes de transport moyens, **le courant résiduel intéresse donc le transport** des sédiments, des microorganismes, des algues, **des substances dissoutes**. Ainsi, la connaissance

complète des courants instantanés rend possible l'établissement d'un modèle de prédiction de trajectoires d'un objet qui dériverait dans l'écoulement. C'est la problématique générale du travail accompli et présenté dans ce rapport.

Dans ce cadre, une série de modélisation de la dynamique des masses d'eau à partir du code de calcul MARS est mise en oeuvre. MARS (Model for Applications at Regional Scales) est un modèle communautaire développé et diffusé par l'équipe DYNECO/PHYSED (laboratoire de PHYsique et SEDimentologie du département DYNamiques de l'Environnement COtier) de l'IFREMER (Lazure and Dumas, 2008¹). Cet outil est dédié à la modélisation océanographique côtière, des échelles régionales (Bailly du Bois and Dumas, 2005²; Fiévet et al., 2021³; Connan et al., 2023⁴) jusqu'aux échelles littorales (quelques centaines voire dizaines de mètres) (Stanisiere et al., 2006⁵). Le modèle traite aussi les zones découvrantes (zone intertidale). MARS intègre également une forte composante environnementale (modules de sédimentologie et biogéochimie) (Cugier, 1999⁶ ; Jouanneau, 2014⁷).

Le modèle MARS-2D utilisé dans le cadre de cette étude, est un modèle hydrodynamique à surface libre, résolvant les équations classiques de la mécanique des fluides (Navier-Stokes) sous les hypothèses de Boussinesq et d'hydrostaticité ainsi que l'équation de dispersion-diffusion dans le plan horizontal. Ces équations sont résolues par une méthode aux différences finies.

Les hypothèses initiales principales sont :

- La composante horizontale du courant varie peu depuis la surface jusqu'à proximité du fond (courant de masse) ;
- Les vitesses verticales sont faibles.

MARS-2D calcule l'intensité, la direction des courants moyens sur la verticale et les hauteurs d'eau sur le domaine défini. Les conditions aux limites contiennent à chaque pas de temps les effets barotropes de la marée et du vent. Elles sont fournies grâce à un ensemble de 5 modèles gigognes. Le modèle le plus vaste fournissant les conditions aux limites du modèle immédiatement inférieur et ainsi de suite jusqu'au modèle de détail. Les conditions initiales du modèle le plus vaste peuvent donc être relativement approximatives, dans la mesure où elles sont assez éloignées de la zone d'étude et que par ailleurs, l'exploitation du modèle ne se fait qu'après la durée nécessaire à la convergence du calcul vers une solution jugée stable et donc satisfaisante.

¹ Lazure P., Dumas F., 2008. An external-internal mode coupling for a 3D hydrodynamical model at regional scale (MARS). *Adv. Wat. Res.*, 31, 233-250.

² Bailly du Bois P., Dumas F., 2005. Fast hydrodynamic model for medium- and long-term dispersion in seawater in the English Channel and southern North Sea, qualitative and quantitative validation by radionuclide tracers. *Ocean Modelling*. 9(2) : 169-210 <http://dx.doi.org/10.1016/j.ocemod.2004.07.004>

³ Fiévet, B., Plet, D. (2002) Estimating biological half-lives of radionuclides in marine compartments from environmental time-series measurements. *Journal of Environmental Radioactivity*, 65, 91-107.

⁴ Connan O., Bailly du Bois P., Solier L., Hebert D., Voiseux C. (2023). Flux of tritium from the sea to the atmosphere around a nuclear reprocessing plant: Experimental measurements and modelling for the Western English channel. *Journal of Environmental Radioactivity*, 257, 107068, /10.1016/j.jenvrad.2022.107068.

⁵ Stanisiere J.Y., Dumas F., Plus M., Maurer D., Robert S. (2006). Caractérisation des composantes hydrodynamiques d'un système côtier semi-fermé : Le Bassin de Marennes-Oléron. PNEC – Chantier Littoral Atlantique : Mode de fonctionnement des systèmes semi-fermés du littoral Atlantique. Thème 1 : Caractérisation des forçages hydrodynamiques. DOP/LER.LER/PC/06.1059

⁶ Cugier Ph. (2006). Modelling the fate in water and sediment of the main elements (N, P, Si) brought by the Seine river into the bay of Seine. Thèse de doctorat, Université de Caen. 256 pp.

⁷ Jouanneau N. (2013) Caractérisation de la dispersion de traceurs passifs dans un écoulement côtier soumis à un régime macrotidal. Étude d'impact de la dynamique sur la qualité de l'eau le long du littoral du Nord-Pas-de-Calais et de la Picardie. Thèse de doctorat, Université, ULCO. 250 pp

Dans le cas présent, les cinq grilles imbriquées ont une résolution croissante soit respectivement de la plus grande à la plus précise (Fig. 2) :

- Grille de rang 0 (Lahg0), résolution de 5630,0 m ;
- Grille de rang 1 (Ma151), résolution de 1666,6 m ;
- Grille de rang 2 (Gnbb2), résolution de 400,0 m ;
- Grille de rang 3 (Ch103), résolution de 100,0 m ;
- Grille de rang 4 (Ch24), résolution de 25,0 m.

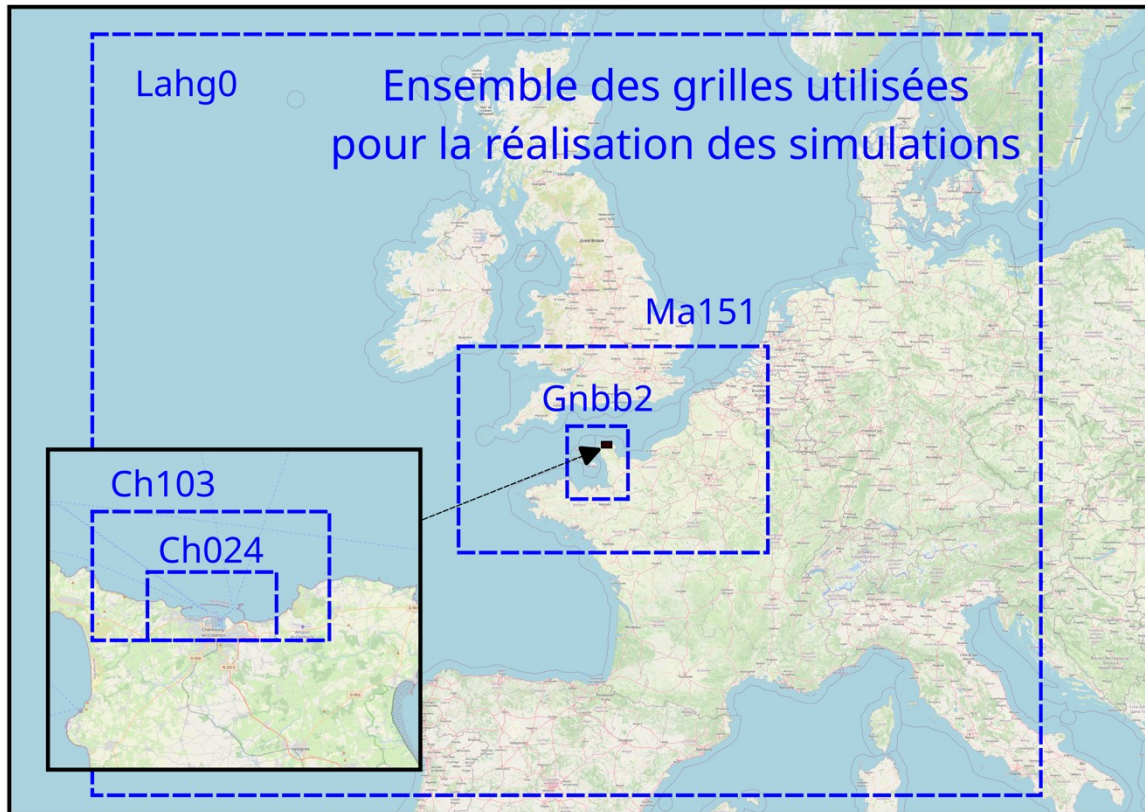


Figure 2 : Emboîtement des grilles utilisées pour les simulations MARS2D.

La simulation des vitesses et directions des courants à l'échelle de la rade de Cherbourg, est réalisée sur une période de trois jours avant et trois jours après, centrée sur la date du coefficient de marée visé. Cette approche permet d'améliorer la précision des résultats (vitesses et directions) en moyennant sur la période de simulation.

A partir des résultats obtenus et en particulier de la détermination des périodes optimales de rejets, la modélisation de la dispersion des rejets est réalisée avec fiabilité.

Sur la base d'informations fournies par la société GMG (nature, quantité et vitesse de dégradation des effluents), un effluent est injecté au niveau du point de rejet identifié à la sortie du port des Flamands (Fig. 1). L'effluent est considéré comme conservatif.

III. Hydrodynamique

III.1. A l'échelle de la rade

III.1.1. Circulation résiduelle

A l'échelle de la rade, la circulation résiduelle est étudiée pour les coefficients de marée 40, 80 et 112. Pour chaque situation, l'étude considère une durée de 5 jours au total avec 2 jours avant et après le jour du coefficient de marée étudié.

Le coefficient de marée de 40 correspond à une marée de morte-eau moyenne. À l'échelle de la grande rade, la circulation résiduelle se présente sous la forme d'un gyre sénestre (Fig. 3). L'eau pénètre par la passe de l'Ouest, traverse la grande rade, ressort par la passe de l'Est et s'oriente vers l'ouest. Au nord de la passe de l'Ouest, les courants s'orientent vers le sud pour fermer la boucle.

En plus de ce gyre principal, il faut noter la présence d'un courant orienté vers l'ouest qui part du fort de l'Ouest. Cette veine de courant longe la grande digue et sous l'action principalement des forces de frottement pénètre très légèrement dans la grande rade par la passe de l'Est. Il est rapidement rejeté vers le nord par le courant qui sort de la rade.

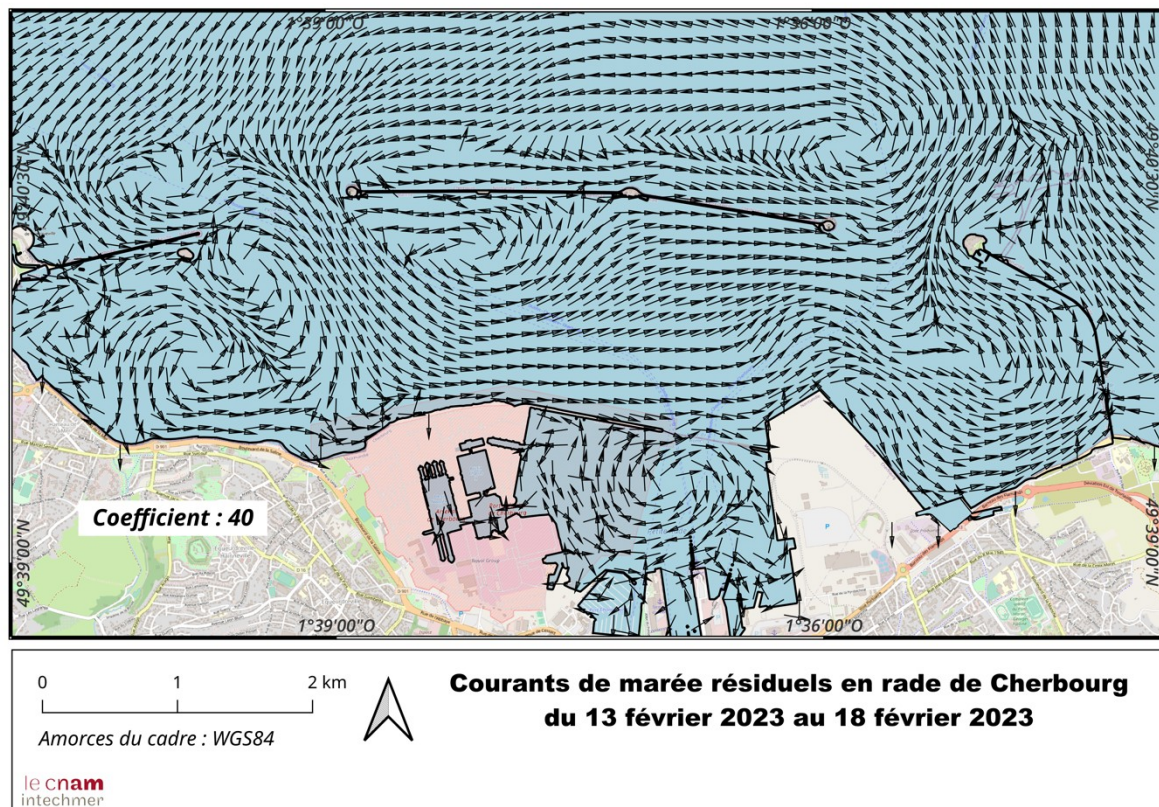


Figure 3 : Courants de marée résiduels en rade de Cherbourg pour un coefficient de 40 (13/02/2023-18/02/23). Un gyre dextre est mis en évidence dans la petite rade de Cherbourg. Il y occupe la quasi-totalité tout en étant perturbé par le découpage du trait de côte dû à de nombreux quais et terre-pleins et par l'existence de deux petits gyres sénestres localisés de part et d'autre.

Dans le détail, de nombreux gyres senestres ou dextres secondaires apparaissent :

- au nord-ouest (senestre) et au sud-est (dextre) du fort de Querqueville ;
- dans la baie de Sainte-Anne (senestre) ;
- à proximité immédiate des cages d'aquaculture localisées au sud-ouest du fort central (senestre) ;
- au nord de la passe de l'Est (senestre).

Le dernier gyre sénestre présente la plus grande emprise spatiale puisqu'il occupe la plus grande partie du secteur oriental de la grande rade. À noter que ce gyre reste ouvert. Il est alimenté par de l'eau venant de l'ouest dont la trajectoire est déviée par le nouveau terre-plein dédié aux activités liés aux énergies marines renouvelables. D'abord rejetée vers le nord, cette eau longe ensuite le côté oriental du terre-plein, puis heurte le littoral et prend une direction nord-est. La digue de Collignon s'oppose au courant qui est alors rejeté vers le nord et est capté par le flux d'eau principal qui rejoint la Manche par la passe de l'est.

Pour un coefficient de marée de 80 (marée moyenne), l'analyse des courants résiduels ne permet pas de mettre en évidence une modification notable des champs de courants (Fig. 4). Les principales structures hydrologiques précédemment décrites sont retrouvées. Cependant, certaines d'entre elles évoluent légèrement.

Au nord de la pointe septentrionale du nouveau terre-plein, le changement de direction des courants est responsable d'un début de formation d'un gyre dextre. L'influence du nouveau terre-plein est encore plus sensible. Les courants d'ouest sont brutalement rejetés vers le nord avant d'initier un gyre dextre.

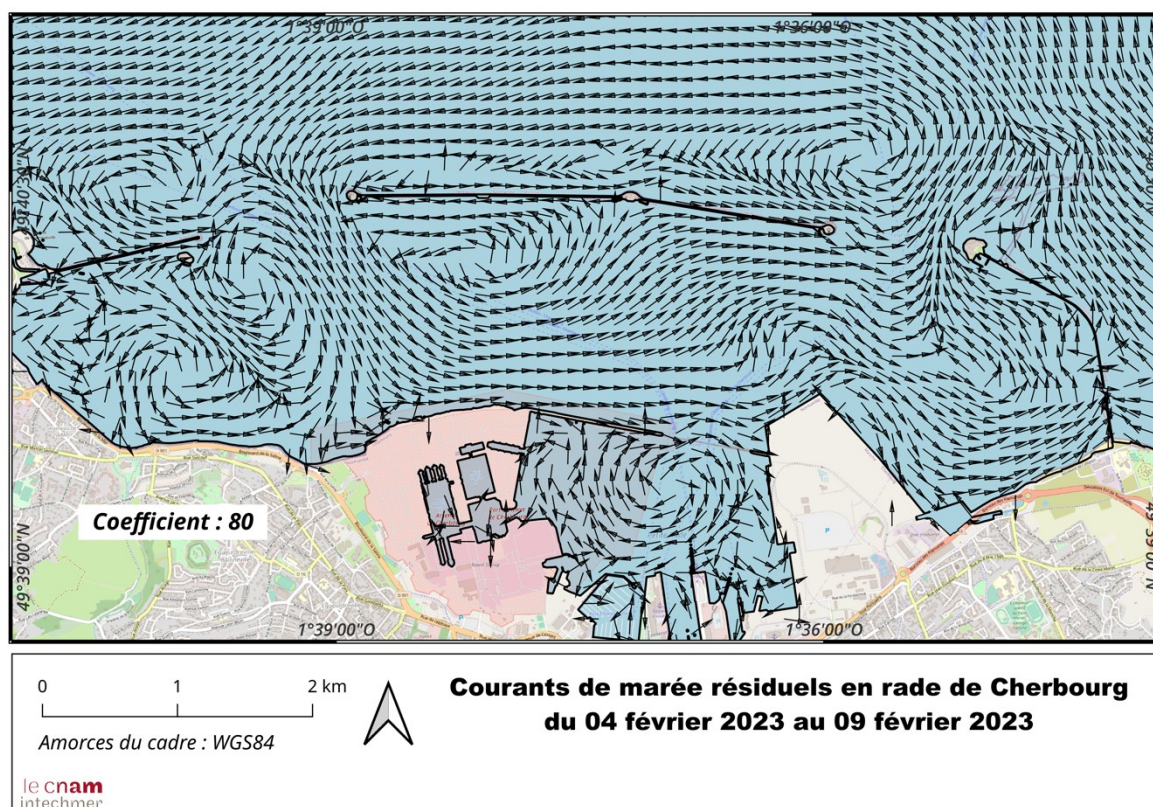


Figure 4 : Courants de marée résiduels en rade de Cherbourg pour un coefficient de 80 (04/02/2023-09/02/23).

Le coefficient de 112 correspond à une vive-eau. Les principales structures hydrologiques précédemment décrites persistent (Fig. 5).

A l'extérieur de la rade, la veine de courant collée à la digue centrale voit sa largeur réduite. Le fort central et ses fondations perturbent l'écoulement et des courants s'orientent vers le large suivant un éventail de directions allant de l'est nord-est au sud sud-ouest.

Le décalage progressif vers l'est du centre gyre localisée au sud de la ferme est confirmé.

Dans la partie orientale le gyre principal est maintenant un gyre beaucoup plus fermé. Ce dernier voisine avec une nouvelle structure tourbillonnaire qui est maintenant complètement formée au nord de la pointe du nouveau terre-plein.

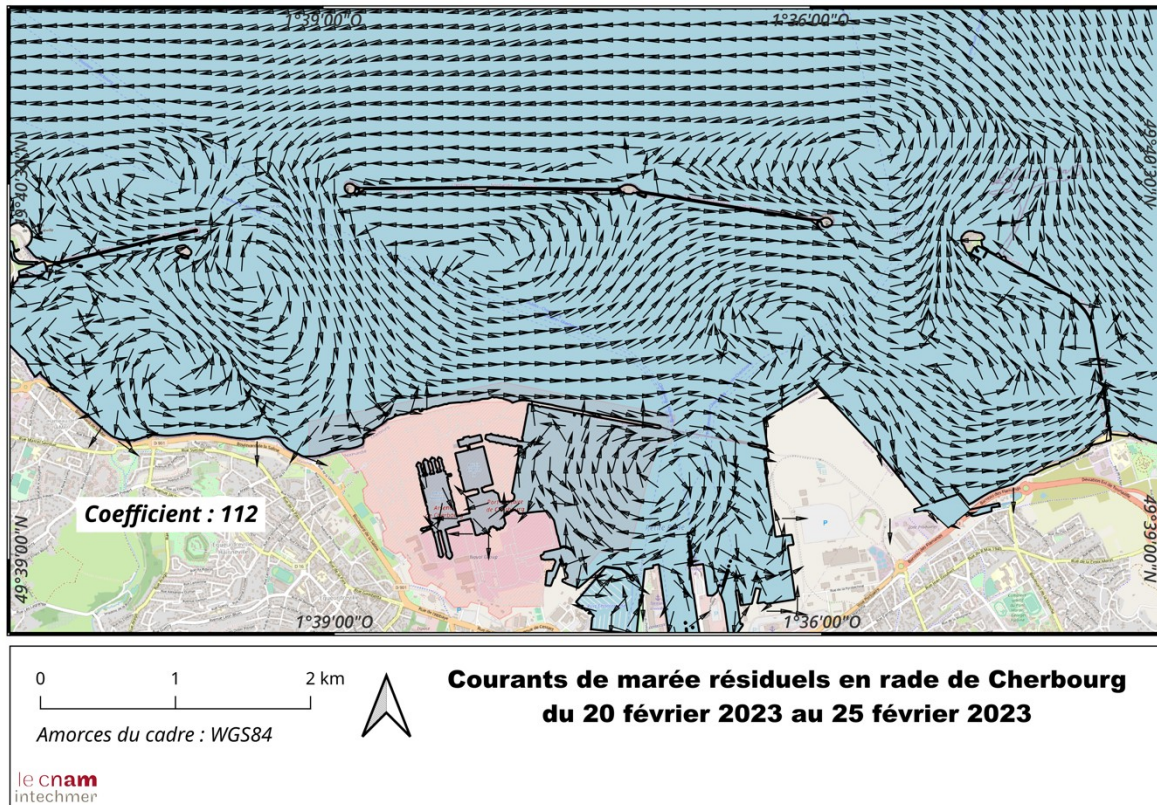


Figure 5 : Courants de marée résiduels en rade de Cherbourg pour un coefficient de 112 (20/02/2023-25/02/23).

En conclusion, la modélisation des courants de marée en rade de Cherbourg, met en évidence de nombreuses structures cycloniques et anticycloniques. Quel que soit le coefficient de marée considéré (coeffs. 40, 80 et 112), la plupart d'entre elles sont pérennes. Cependant, certaines d'entre elles évoluent dans le temps et l'espace (au sud de la ferme d'aquaculture) ou dans leur forme (au nord du nouveau terre-plein). Le coefficient de marée joue un rôle amplificateur dans la vitesse des courants.

III.1.2. Vitesse et direction des courants de marée pour des points remarquables

Pour une approche plus synthétique, des points caractéristiques de l'hydrodynamique de la rade de Cherbourg ont été sélectionnés (Fig. 6) afin d'illustrer les caractéristiques des vitesses et direction des courants de marée en ces points. Les roses de courant présentées ont été établies sur l'ensemble du jeu de données du 01/02/2023 au 30/04/2023.

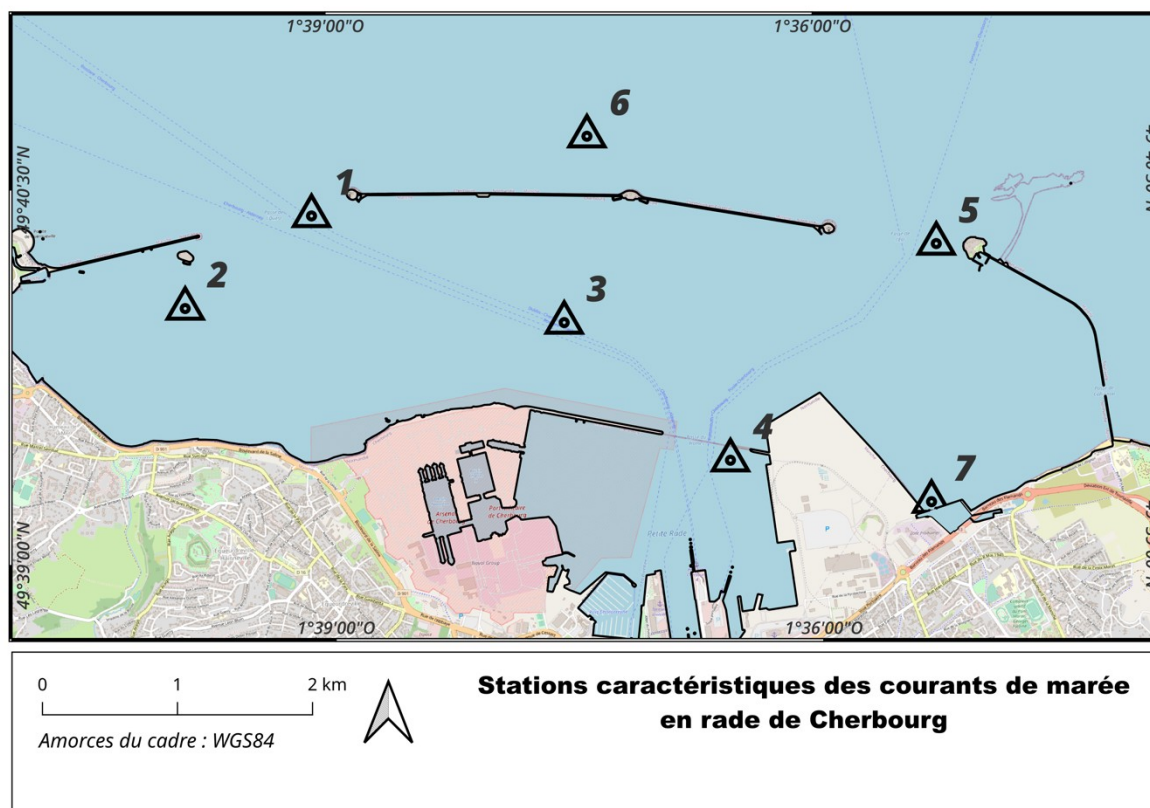


Figure 6 : Localisation des points caractéristiques des courants de marée dans la rade de Cherbourg.

La vitesse des courants augmente progressivement avec les coefficients croissants (Tab. 1). Au cours d'un cycle de marée, quel que soit le coefficient, la vitesse maximale apparaît entre le début de la remontée du niveau marin et la mi-marée. Les durées de flot et de jusant sont quasiment équivalentes.

Les variations plus ou moins rapides et intenses à la fois de la direction et de la vitesse des courants traduisent la présence de gyres et donc d'un certain niveau de turbulence.

Tableau 1 : Principales caractéristiques des courants au niveau du point de rejet virtuel.

Coefficient	Mar-nage (m)	Vitesse minimale (cm/s)	Vitesse maximale (cm/s)	Direc-tion Flot (°N)	Direc-tion Jusant (°N)
40	2,5	3	6	140	90
80	4,7	2	8	140	90
112	6,0	1	10	140	90

La figure 7 représente les relations entre vitesses et directions des courants de marée en 7 points de la rade de Cherbourg choisis pour leur contexte hydrodynamique. Les courants caractéristiques des coefficients 40 et 80 sont semblables aussi bien pour leur vitesse que pour

leur direction. Les courants liés au coefficient 112 présentent les mêmes relations mais les vitesses sont systématiquement plus élevées.

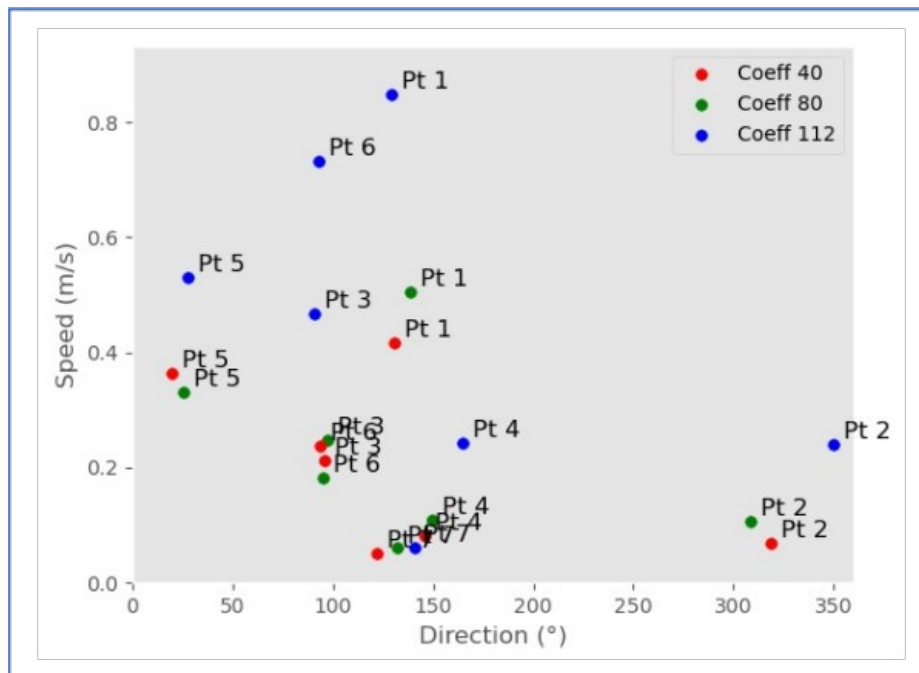


Figure 7 : Relation vitesse/direction des courants pour 7 points caractéristiques de l'hydrodynamique de la rade de Cherbourg

Pour l'ensemble des points choisis et des coefficients étudiés, les vitesses les plus rapides sont notés aux points 1, 2 et 3 soit dans les passes qui relient la rade avec l'extérieur soit à l'extérieur de la rade. La vitesse décroît à l'intérieur de la rade, de son centre vers la passe reliant la petite rade et la grande rade. Les vitesses les plus lentes sont observées dans la baie de Sainte Anne. Au niveau du point de rejet simulé, les vitesses sont les plus faibles quel que soit le coefficient de marée analysé.

Les courants aux points 1, 3, 4 et 6 présentent tous des directions alternatives. Le point 5 localisé dans la passe de l'Est présente une direction unique vers le nord nord-est (courant sortant). A l'inverse, la baie de Sainte Anne se caractérise par des courant de direction très variables de sud sud-ouest à nord nord-ouest. Toutes ces directions s'accordent pour caractériser un courant rentrant dans la baie quel que soit l'heure de la marée (Fig. 8).

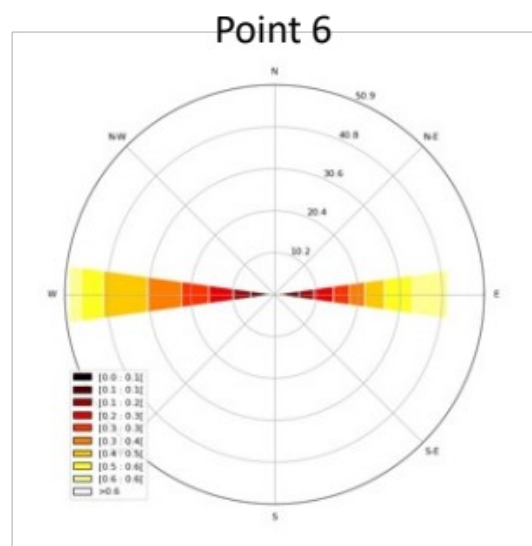
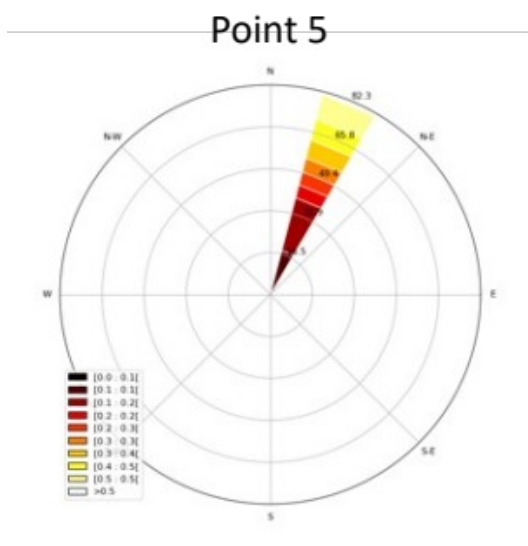
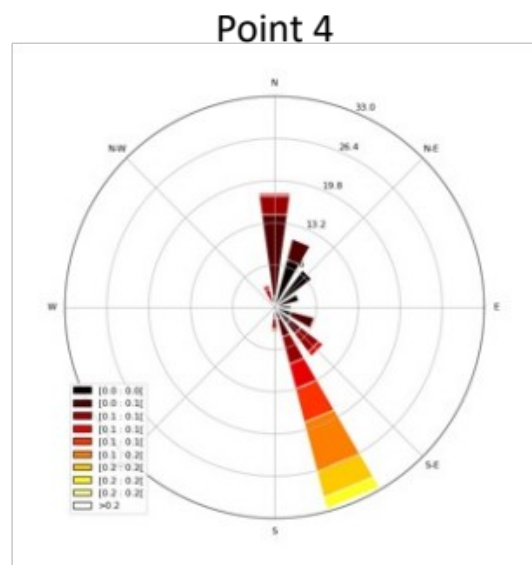
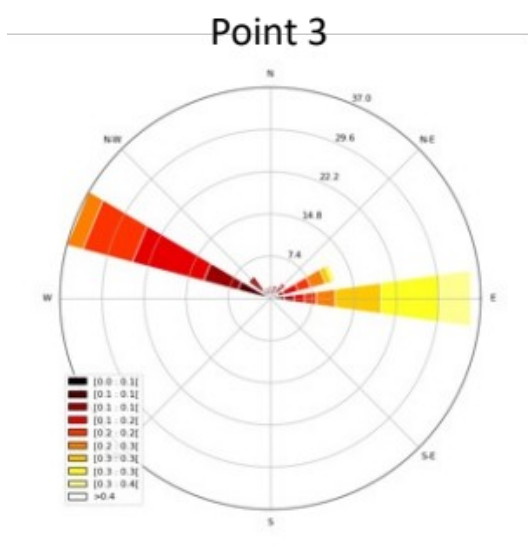
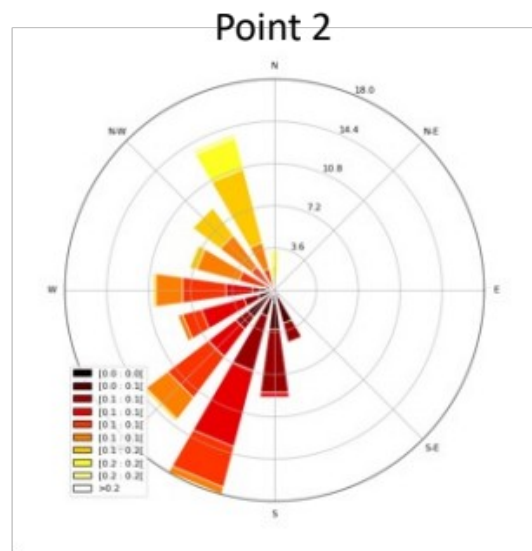
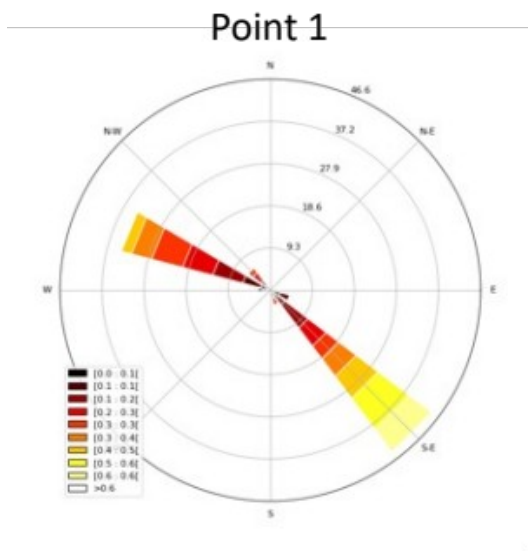


Figure 8: Vitesses et directions des points remarquables sélectionnés dans la rade de Cherbourg et à l'extérieur (localisation des points à la figure 6).

Au niveau du point de rejet simulé (point 7) la direction vers le sud-est est relativement constante (Fig. 9).

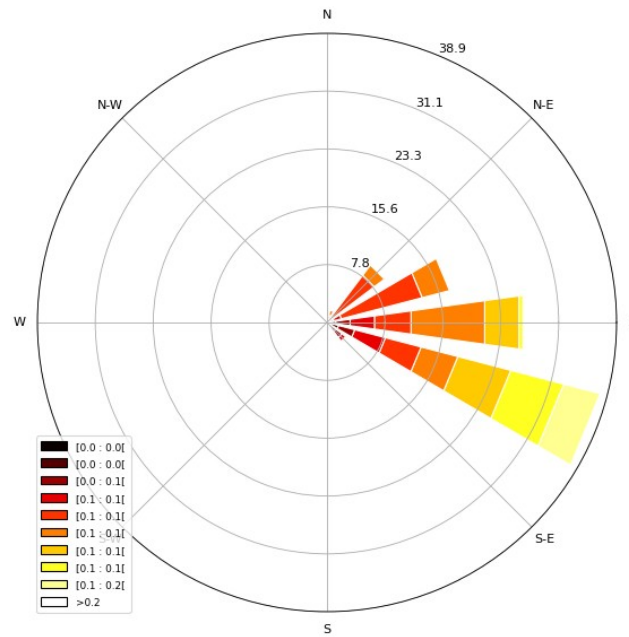


Figure 9 : Vitesses versus directions au point de rejet virtuel localisé à la sortie du port des Flamands.

La figure 10 présente une synthèse des informations qui viennent d'être présentées. Elle permet de mieux comprendre la modélisation des effluents à partir du point de rejet virtuel situé au large du port des Flamands.

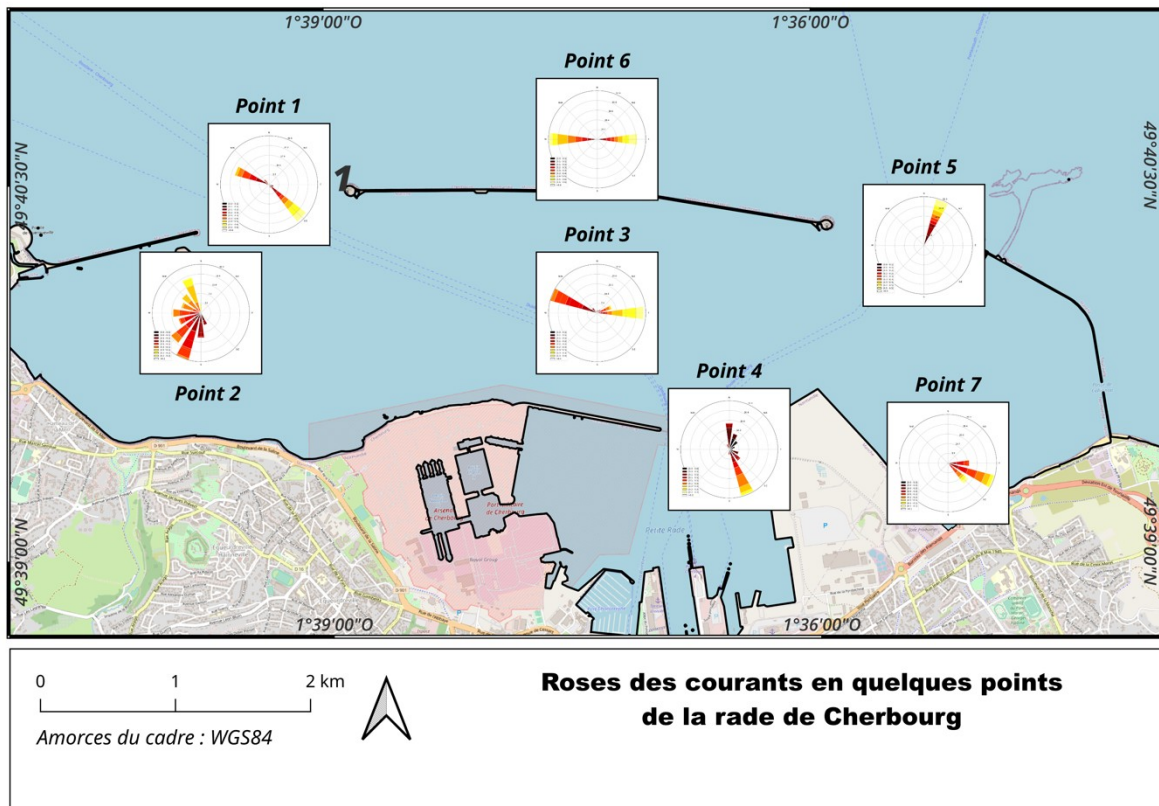


Figure 10 : Synthèse des paramètres de courant (vitesse/direction) à l'échelle de la rade de Cherbourg.

IV.1. Au niveau du point de rejets

IV.1.1. Circulation résiduelle

Afin de mieux mettre en évidence la circulation des masses d'eau au large du port des Flamands, une série de modélisations à plus petite distance a été réalisée pour les 3 mêmes coefficients de marée.

La première carte présente la situation **pour un coefficient de 40** (Fig. 11).

Au nord de la zone, les courants de marée portent à l'est, ils infléchissent rapidement leur trajectoire pour suivre le trait de côte. Ils longent donc la digue orientale du nouveau terre-plein, passe au large du port des Flamands et suivent la côte au large du boulevard de Colignon. Confrontés à la digue du même nom, ils repartent majoritairement vers le nord. Un flux mineur traverse la digue par la passe de Cabart. A cette circulation générale, se rajoutent quelques perturbations localisées. Les frottements avec la digue du terre-plein génèrent deux petits gyres dextres collés à la digue. Au centre de la zone, des affleurements rocheux modifient localement la circulation générale des courants vers l'est.

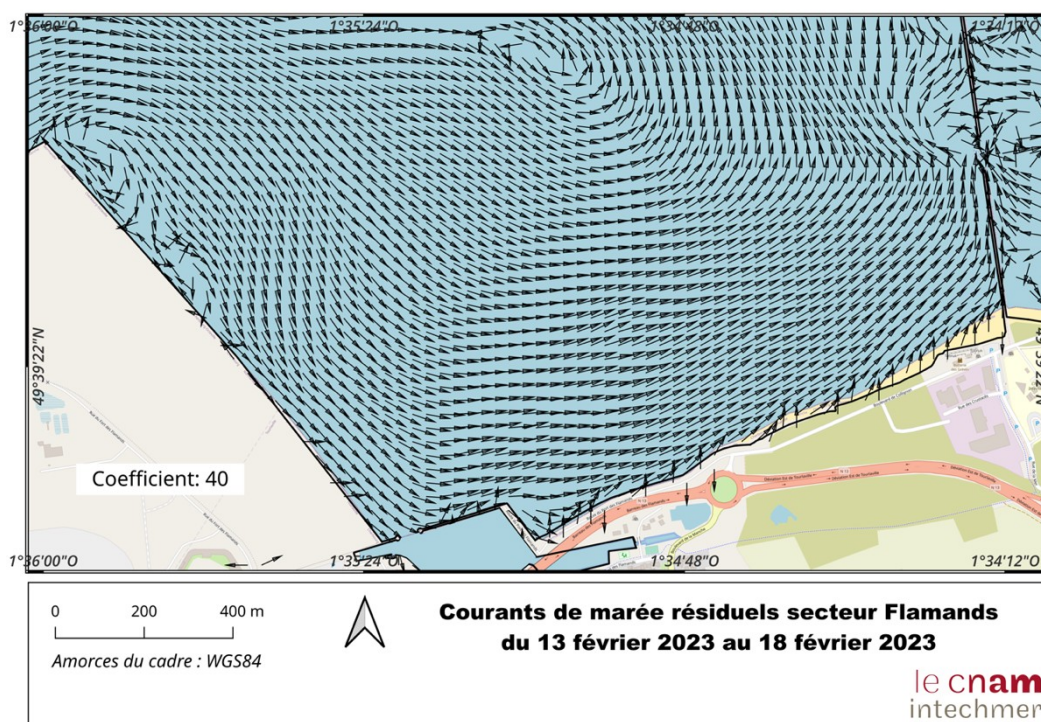


Figure 11 : Courants de marée résiduels au large du port des Flamands pour un coefficient de 40 (13/02/2023-18/02/23).

Pour un coefficient de 80, la figure 12 présente le champ de courants résiduels modélisés. Les structures principales précédemment décrites sont conservées. L'intensité des courants augmente comme cela avait été noté pour l'étude à l'échelle de la Grande Rade. La seule différence notable concerne l'apparition d'un tourbillon cyclonique au centre de la zone nord de la zone.

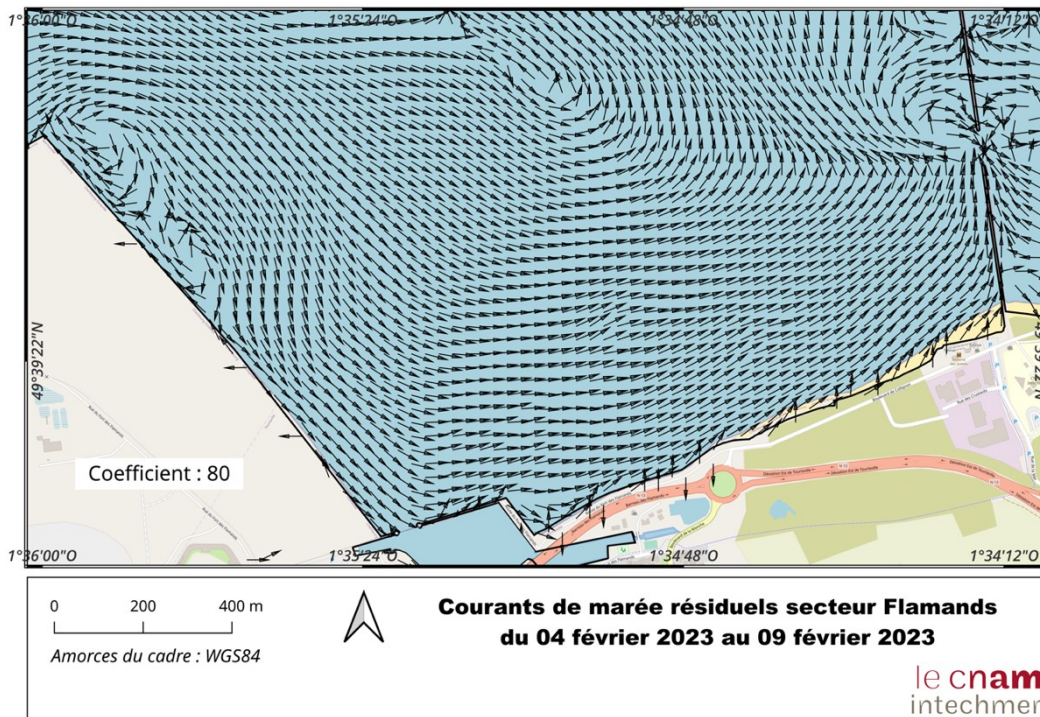


Figure 12 : Courants de marée résiduels au large du port des Flamands pour un coefficient de 80 (04/02/2023-09/02/23)

Pour un coefficient de 112, les remarques précédentes s’appliquent aussi (Fig. 13). Le gyre mis en évidence se développe encore. Il atteint maintenant une structuration complète tout en se déplaçant vers le sud-est.

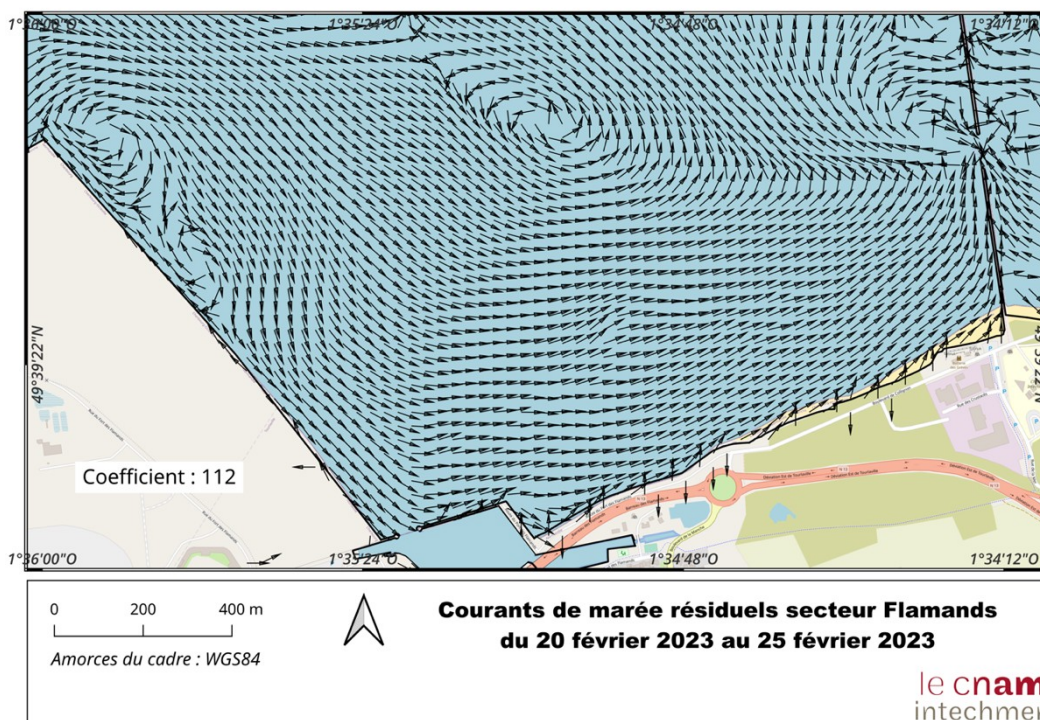


Figure 13 : Courants de marée résiduels au large du port des Flamands pour un coefficient de 112 (20/02/2023-25/02/23)

IV.1.2. Vitesse et direction des courants

Pour chacun des coefficients étudiés, deux graphiques sont présentés. Ces graphiques représentent les caractéristiques de la masse d'eau au niveau d'un point de rejet virtuel situé au niveau de la sortie du port des Flamands.

Le premier graphique représente la variation de la vitesse absolue horizontale de la masse d'eau en fonction de la hauteur d'eau et le second l'évolution de la direction des courants toujours en fonction de la hauteur d'eau.

Pour le coefficient de 40 (Fig. 14), deux directions principales sont notées (140 °N et 90 °N). Avant et pendant la basse mer, le courant peut prendre, pour une très courte période et de manière assez chaotique, une direction vers le 50 °N.

A partir d'une direction vers l'est, le changement vers le sud sud-est demande en moyenne une durée de 3 h. La direction vers le 90 °N est alors stable pendant environ 3 h. Le reste de la durée du cycle de marée (environ 6 h) est consacré à un retour très progressif (6 h) vers l'est (giration senestre).

La vitesse maximale est observée vers la mi-marée montante (flot). Le flot débute à la basse mer et augmente progressivement jusqu'à la moitié de la pleine mer où il atteint son maximum. La décroissance de la vitesse est beaucoup plus complexe avec une vitesse minimale autour de la pleine mer.

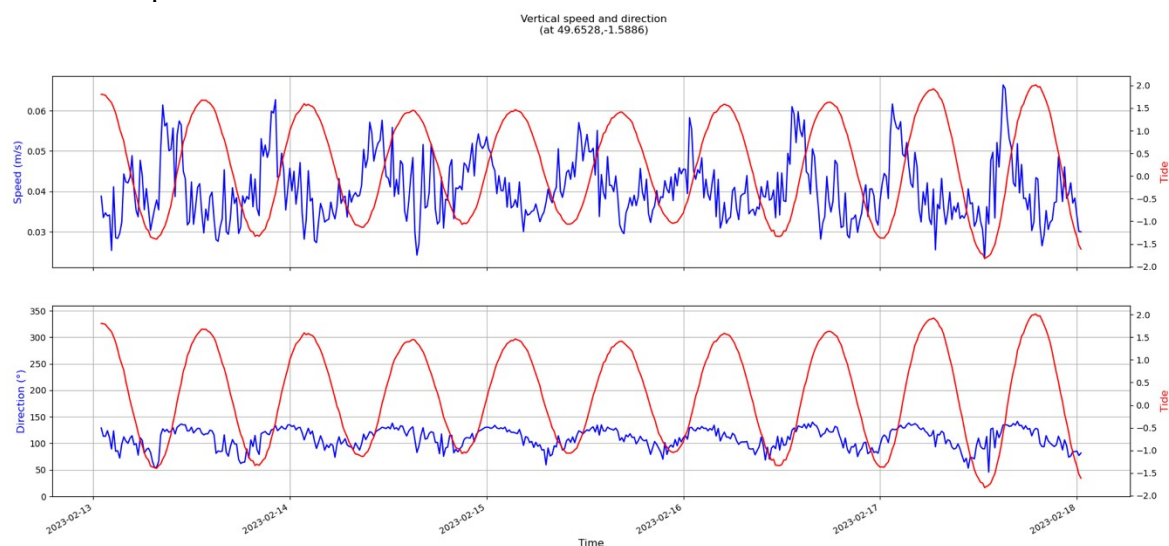


Figure 14 : Variations de la vitesse et de la direction des courants en fonction de la hauteur d'eau au niveau du point de rejet (coeff. 40).

Pour un coefficient de 80 (Fig. 15), la direction de 140 °N est retrouvée mais la direction vers le 50 °N apparaît plus prééminente que pour le cas précédent. On note des incursions vers le 25 °N. Le changement de direction suit cependant le schéma mis en évidence précédemment, avec un changement rapide de 50 °N à 150 °N, une stabilisation vers le 140 °N - 150 °N puis une décroissance vers le nord-est voir épisodiquement vers le nord nord-est. Ce changement de direction progressif accompagne la baisse du niveau de l'eau (HM → BM). Des modifications quasi instantanées de la direction des courants pour une période très courte, sont mis en évidence au moment de la basse mer. Ces pics sont tout à fait semblables à ceux qui ont été observés dans les situations précédentes mais ils n'apparaissent pas systématiquement à chaque basse mer.

La vitesse maximale (environ 8 cm/s) est atteinte aux environs de la mi-marée montante. On note donc aucun décalage par rapport à la situation correspondante au coefficient 40.

La décroissance de la vitesse est d'abord rapide avant de se stabiliser vers 4 cm/s. La vitesse minimale est atteinte au moment de la basse mer.

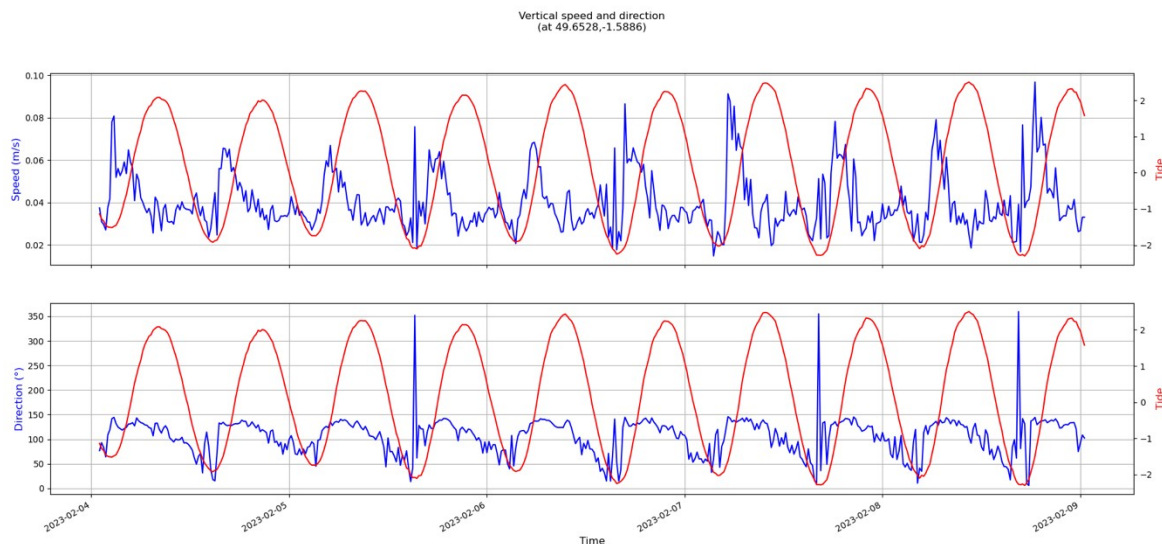


Figure 15 : Variations de la vitesse et de la direction des courants en fonction de la hauteur d'eau au niveau du point de rejet (coeff. 80).

Pour un coefficient de 112 (Fig. 16), la direction des courants change alternativement entre deux pôles organisés entre le 140°N et le 25°N . le schéma général de l'évolution temporelle des directions est le même que ceux mis en évidence lors de l'étude des coefficients 40 et 80. Cependant, les pics évoqués lors de l'étude du coefficient 80 apparaissent maintenant systématiquement. Ils peuvent même apparaître sous forme de doublets ou de triplets. La vitesse maximale apparait au début de la marée montante ce qui reproduit le schéma observé pour le coefficient 80. La différence essentielle entre les deux situations concerne l'apparition de fortes fluctuations de la vitesse au moment de la basse mer et donc au moment où la vitesse moyenne est la plus faible.

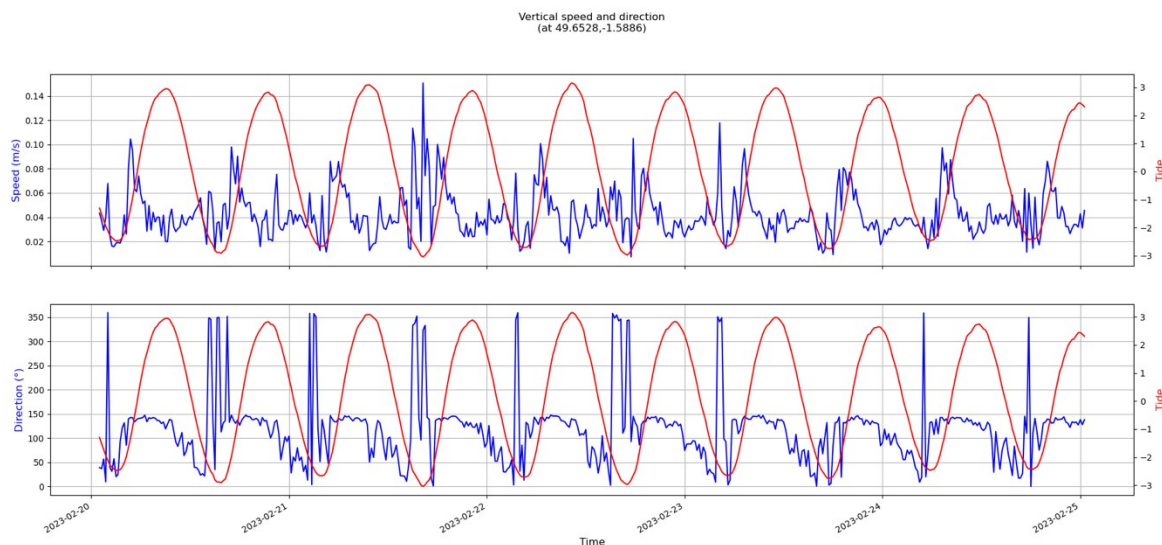


Figure 16 : Variations de la vitesse et de la direction des courants en fonction de la hauteur d'eau au niveau du point de rejet (coeff. 112).

En conclusion, quel que soit le coefficient étudié, les directions des courants de flot et de jusant sont quasiment identiques. Le flot s'oriente vers le 140°N et le jusant vers 50°N . Cette dernière direction évolue progressivement vers la direction 25°N avec l'augmentation du coefficient de marée (Tab. 1).

Le changement de direction entre le nord-est (50°N) et le sud-est (140°N) est rapide pour les trois cas étudiés. Le plateau qui lui fait suite traduit une direction stable vers le 140°N , sa

durée augmente avec le coefficient. En revanche, le changement de direction ($140^{\circ}\text{N} \rightarrow 50^{\circ}\text{N}$) occupe un laps de temps indépendant du coefficient de marée.

A partir du coefficient 80, la basse mer se caractérise par des variations rapides et intenses de la direction. Cette variabilité devient plus intense et affecte aussi la vitesse pour le coefficient de 112. Ces fluctuations sont interprétées comme résultantes du passage de gyres liés aux frottements sur le quai du nouveau terre-plein et sur les affleurements rocheux localisés au nord-est du point de rejet virtuel.

IV. Dispersion spatiale des rejets

IV.1. Préambule

Avant l'interprétation des variations de concentrations des rejets de matières dissoutes en suspensions, en différents points de la rade de Cherbourg, il est nécessaire de préciser l'évolution des coefficients avant et après la date de d'apparition des coefficients étudiés (Tab. 2 et Fig. 25).

Le coefficient de marée 40 étant le plus faible de la période modélisée, il est tout naturellement au centre d'une parabole avec des coefficients décroissant avant et augmentant ensuite. Le coefficient de marée 80 évolue quant à lui de manière croissante tout au long des 5 jours pour atteindre un plateau le dernier jour. La période centrée sur le coefficient de marée 112 a un comportement inverse de celui du coefficient 40, avec une croissance avant et une décroissance après le coefficient de marée, centré sur 112.

Tableau 2 : Evolution des coefficients de marée 2 jours avant et 2 jours après l'apparition des coefficients étudiés (coeffs. 40, 80 et 112).

Coefficients	J-2	J-1	J	J+1	J+2
40	59/54	49/45	42/40	42/46	52/56
80	65/69	72/75	78/80	81/82	82/82
112	100/105	109/111	112/110	107/103	97

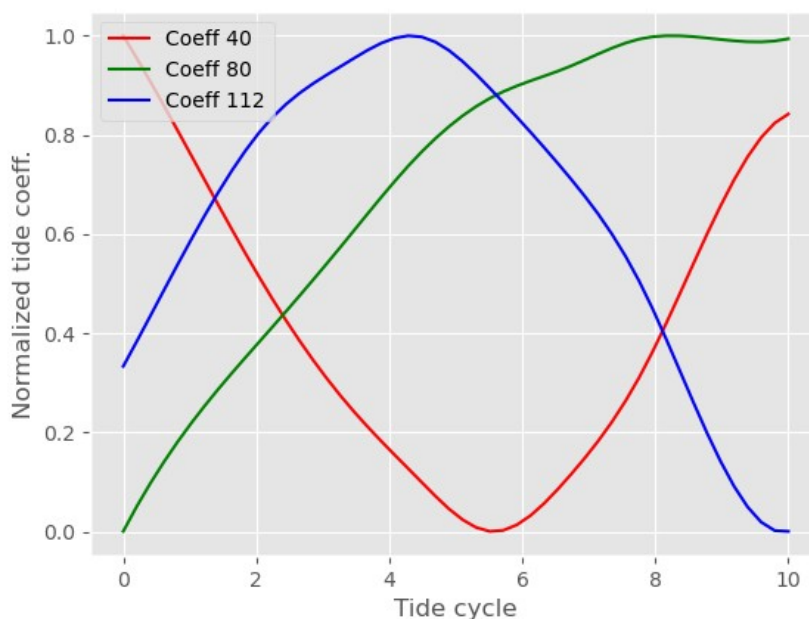


Figure 17 : Evolution des coefficients de marée pour chaque période de 5 jours de chaque coefficient de marée étudié (coeffs. 40, 80 et 112).

IV.2. A l'échelle de la rade

IV.1.1. Au niveau des stations caractéristiques

Pour les 6 points remarquables déterminés dans la grande rade et à son extérieur (Fig. 18, Fig. 19, Fig. 20, Fig. 21, Fig. 22 et Fig. 23), l'évolution de la concentration de l'effluent dissous conservatif a été évaluée. L'axe des abscisses des graphiques représente le temps compté à partir de la date du coefficient étudié. Les 3 courbes ne débutent donc pas en même temps.

L'axe des ordonnées représente la concentration affectée d'un coefficient 10^{-6} identique pour tous les graphiques. Pour une meilleure lisibilité des variations de dispersion, les échelles verticales sont adaptées à chaque situation. Les graphiques peuvent donc être comparés en ce qui concerne les variabilités temporelles mais pas pour les concentrations de rejets.

A la station 1, localisée dans la passe de l'Ouest, les concentrations les plus fortes sont notées pour le plus faible coefficient (Fig. 18). Pour les coefficients 80 et 112, les flux sont quasiment identiques et représentent environ la moitié du flux noté pour le coefficient 40.

A l'échelle de la période de temps analysée (10 cycles), les flux pour les coefficients 80 et 112 évoluent de manière globalement identique. Après une baisse légère, une stabilisation du flux se met en place. A l'opposé, pour le coefficient 40, une nette augmentation (maximale au septième cycle) précède une décroissance tout aussi rapide.

A l'échelle du cycle, les 3 coefficients présentent des variations très rapides avec des périodes de faible flux qui diminuent avec l'augmentation du coefficient.

En conclusion, le flux de rejets qui transite par la passe de l'Ouest est plus important pour les faibles coefficients. Cependant, il est soumis à de très fortes variations dues aux alternances flot-jusant.

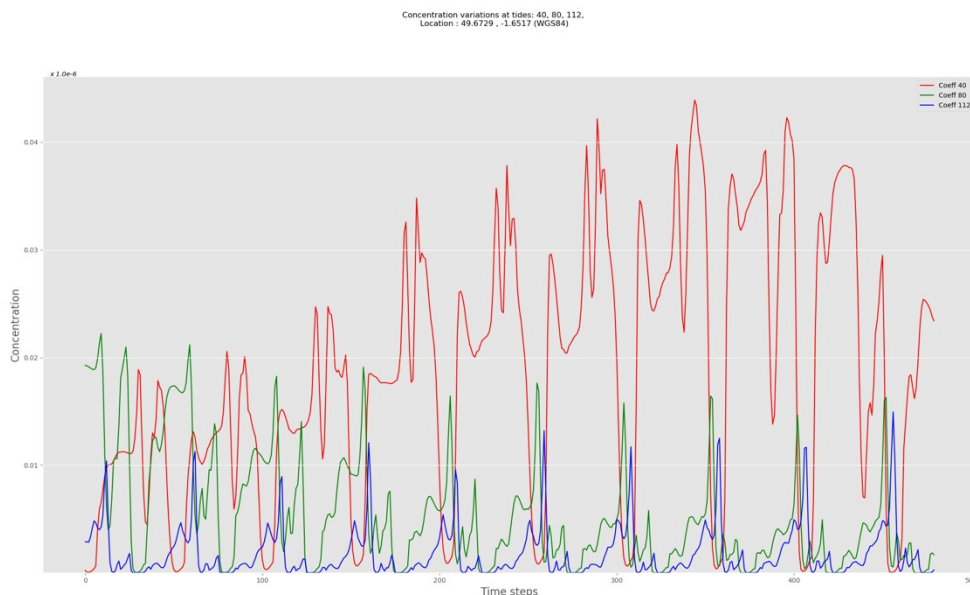


Figure 18 : Dispersion des rejets conservatifs au point 1 pour les 3 coefficients étudiés.

A la station 2, localisée à l'entrée de la baie de Sainte-Anne, les plus hautes valeurs de concentrations sont notées pour le plus faible coefficient de 40 (Fig. 19). Pour les 3 coefficients, les flux sont quasiment identiques au début du calcul de dilution. A partir du quatrième cycle, les flux calculés pour les 3 coefficients évoluent de manière autonome.

A l'échelle de la période de temps analysée, les flux pour le coefficient 40 augmente de manière continue. Pour le coefficient 80, c'est une baisse progressive du flux qui est mise en évidence. Le coefficient 112 présente la plus forte variabilité à l'échelle du cycle de marée mais aucune évolution importante est notée.

En conclusion, les concentrations de $3,0 \times 10^{-4}$ sont observées pour les plus faibles coefficients. Pour la période étudiée, les forts coefficients ne contribuent pas à la concentration dans la baie et ne favorise pas l'évacuation des suspensions qui y seraient préalablement concentrées.

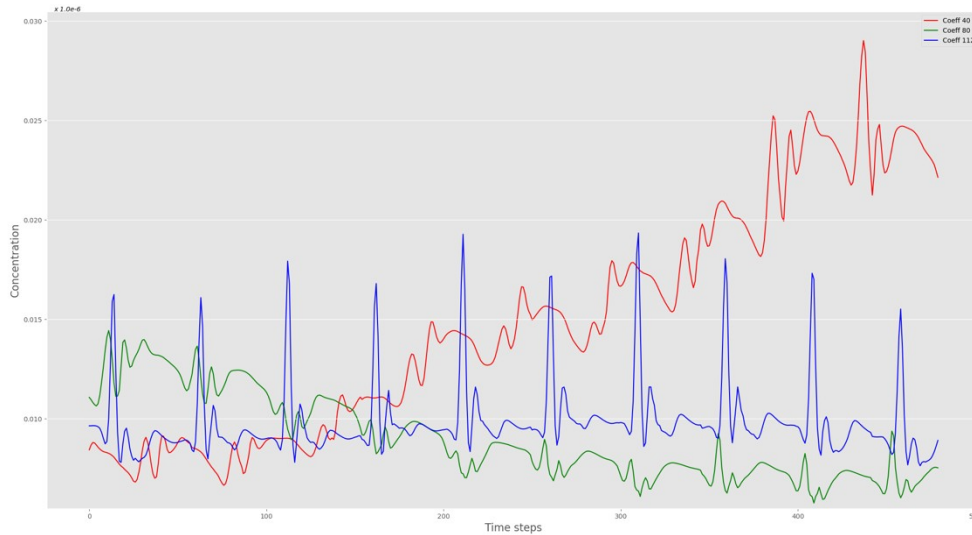


Figure 19 : Dispersion des rejets conservatifs au point 2 pour les 3 coefficients étudiés.

La station 3 est localisée en plein centre de la grande rade de Cherbourg. Les flux de concentration les plus forts sont notés pour le coefficient 112. Au début de la simulation, les concentrations sont faibles et identiques (pendant 2 cycles) pour les coefficients 40 et 80. Par la suite, les deux courbes évoluent différemment (Fig. 20). Pour le coefficient 40, une augmentation constante du flux moyen est notée jusqu'au neuvième cycle. Une légère décroissance est notée au dixième cycle. Au cours des différents cycles, les concentrations ne varient que très peu. La courbe représentative du coefficient 80 suit à peu près le même schéma. On note cependant que des fluctuations à l'échelle du cycle sont nettement plus importantes.

La variation temporelle du flux de rejets transportés lors d'un coefficient de vive-eau apparaît très différents des 2 précédents (Figs. 18 et 19). Les fluctuations à l'échelle du cycle sont très marquées avec des pics qui atteignent $8,0 \times 10^{-4}$ de concentrations et des périodes où le flux est considéré comme nul. L'évolution globale présente une augmentation progressive avec un maximum situé entre le quatrième et le sixième cycle (centré sur le coefficient 112) puis une décroissance lente et constante.

En conclusion, au centre de la rade, la concentration la plus importante de rejet est notée lors des coefficients les plus faibles. Lorsque le coefficient augmente les rejets concentrés sont repris par la circulation des courants de marée. Cette reprise est d'autant plus forte que le coefficient est élevé. Ce matériel est remis à la disposition pour alimenter le reste de la zone étudiée.

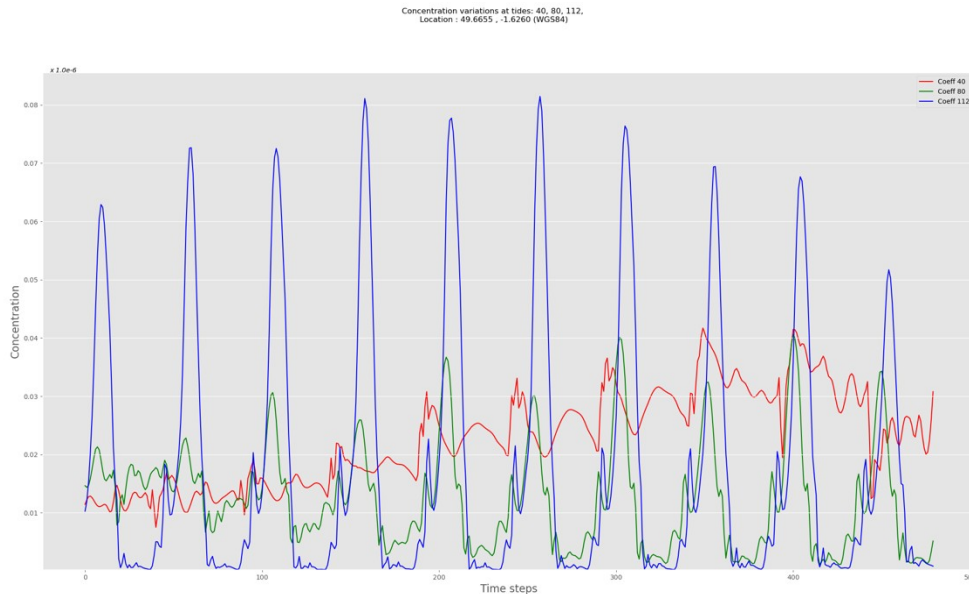


Figure 20 : Dispersion des rejets conservatifs au point 3 pour les 3 coefficients étudiés.

A la sortie de la petite rade, la station 4 présente un système de courants alternatifs orientés nord-sud. L'évolution de la concentration en rejets dissous varie assez nettement en fonction des coefficients de marée étudiés (Fig. 21).

Lors de la morte-eau, la concentration en rejets dissous augmente faiblement mais de manière continue. Avec un coefficient 80, la concentration maximale n'est pas supérieure mais elle est s'exprime sous forme de pics individualisés. C'est le même schéma qui est observé pour une vive-eau avec cependant des pics de concentration très élevés mais temporellement très contraints.

En conclusion, il apparaît que les périodes de morte-eau sont favorables à l'accumulation de substances dissoutes dans la petite rade. L'augmentation du coefficient favorise les échanges avec la grande rade avec une augmentation régulière des apports, ponctuée de bouffées (pics) situés en fin de flot et au tout début de jusant.

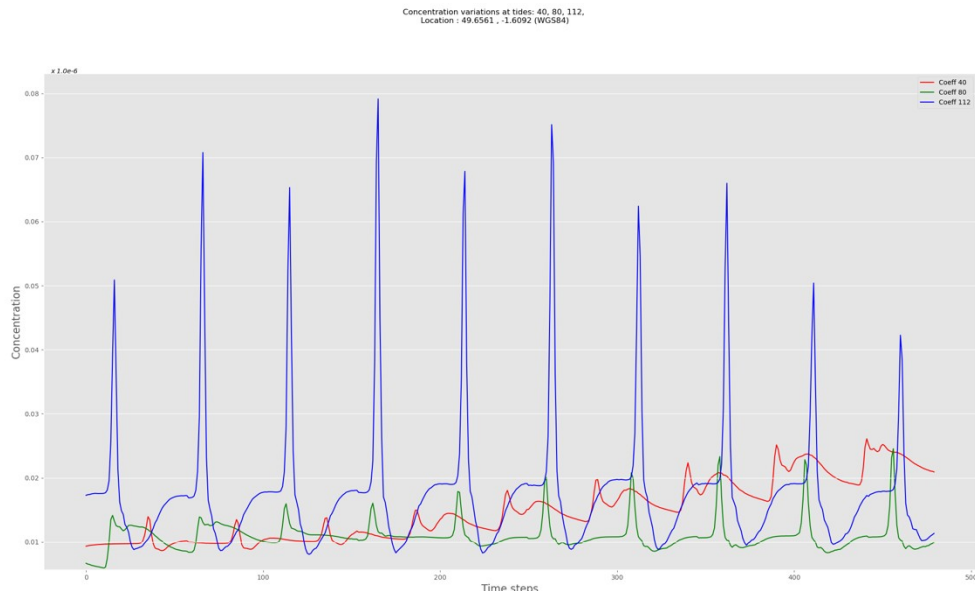


Figure 21 : Dispersion des rejets conservatifs au point 4 pour les 3 coefficients étudiés.

La station 5 permet d'étudier les échanges entre la grande rade et l'extérieur par la passe de l'est. A l'échelle de la période de temps analysée, le flux de rejets transporté est constant pour

les coefficients de 40 et de 112 (Fig. 22). Le flux représentatif du coefficient 40 est cependant nettement plus important (plus du double) que celui caractéristique d'une vive-eau. Le flux caractéristique du coefficient 80 évolue différemment avec au début de l'analyse des valeurs identiques à celles qui ont été calculées pour le coefficient 40 et à la fin de la période de simulation des valeurs qui rejoignent celles représentatives du coefficient 112.

En conclusion, la passe de l'est de la rade de Cherbourg voit passer des rejets avec des concentrations relativement élevées quel que soit le coefficient de marée étudié. Cette passe peut être considérée comme une zone de transfert entre l'extérieur et l'intérieur de la grande rade. Le transfert des concentrations est d'autant plus important que le coefficient est faible.

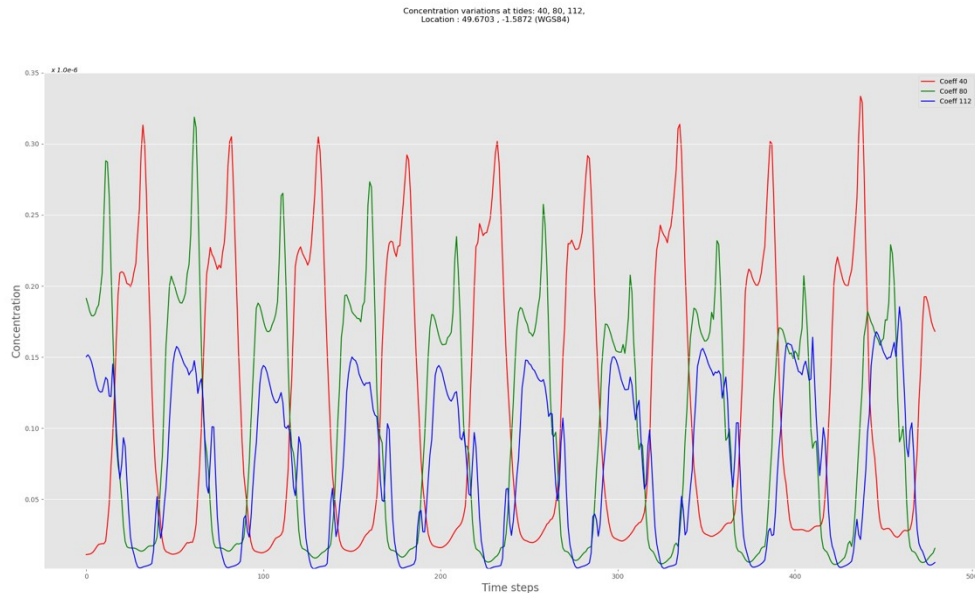


Figure 22 : Dispersion des rejets conservatifs au point 5 pour les 3 coefficients étudiés.

La station 6 est la seule station localisée à l'extérieur de la rade, au nord du fort central. La simulation des flux présente des spécificités unique à cette station (Fig. 23).

Les flux calculés pour les coefficients 80 et 112 sont identiquement distribués dans le temps. L'intensité des flux est lui aussi identique sauf pour deux cycles localisés en début d'analyse. Les pics de fortes intensités, notés pour le coefficient 112, traduisent la présence d'un gyre de courant qui apparaît entre le fort central et la station 6 lors de la vive-eau.

Lors de la morte-eau (40) la concentration en effluents rejetés apparaît comme la plus forte. La concentration augmente globalement pour atteindre un maximum vers le sixième cycle de marée pour décroître ensuite progressivement. Contrairement aux deux autres coefficients, elle n'est presque jamais nulle. Pour chaque cycle, la présence de deux pics souligne un passage vers l'est qui alterne avec un passage vers l'ouest d'une concentration maximale de rejets dissous.

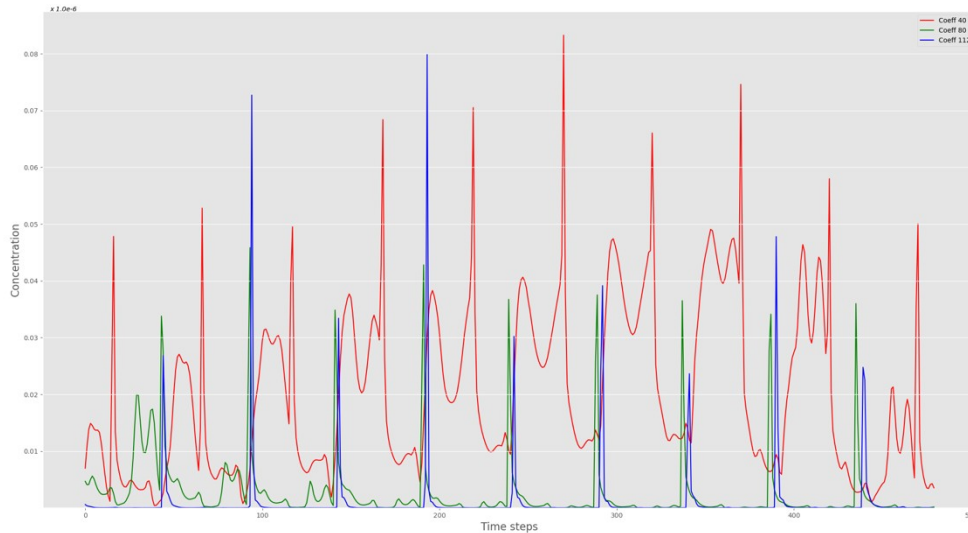


Figure 23 : Dispersion des rejets conservatifs au point 6 pour les 3 coefficients étudiés.

En conclusion, au nord de la digue centrale, les faibles coefficients s'accompagnent d'une concentration maximale de rejets. Ces rejets oscillent alternativement vers l'est et l'ouest. L'augmentation du marnage ne s'accompagne pas d'une augmentation de la concentration. Les valeurs de flux alternent alors entre un flux nul et le passage très rapide d'un nuage de matières dissoutes constitués par les rejets.

Deux séries de cartes établies pour caractériser la situation en fin de flot et en fin de jusant sont établies (Fig. 24 et Fig. 25). Elles comprennent une carte pour chacun des coefficients de marée étudiés (coeffs. 40, 80 et 112).

IV.1.2. Répartition spatiale en fin du flot à l'échelle de la rade

Quel que soit le coefficient étudié, le schéma de dispersion est le même pour les 3 coefficients étudiés (Fig. 24). Seule la concentration varie avec le coefficient. Elle est d'autant plus élevée que le coefficient de marée est faible. Les forts courants liés à la vive-eau sont responsables d'une dilution plus importante de la substance dissoute.

A partir du point d'émission, le flux modélisé s'étend vers l'est, le long de la côte pour se trouver bloqué par la digue de Collignon. Une partie du flux remonte le long de cette digue tout en restant collée à la digue (à l'intérieur de la grande rade) jusqu'au fort de l'Est. Là, le flux sort, en partie, par la passe de l'est pour s'étendre en mer. Dans la baie du Becquet, située à la sortie de la passe Cabart, une proportion mineure du flux d'eau chemine le long du littoral jusqu'au port du Becquet (dans le cadre de la simulation réalisée). La majorité du flux rentré dans la baie du Becquet est immédiatement rejeté au nord vers l'île Pelée (nord du fort de l'Est). Le flux est ensuite repris par celui sortant par la passe de l'Est. Il participe alors à mettre en évidence un gyre ce qui favorise la création d'une zone de concentration en son centre.

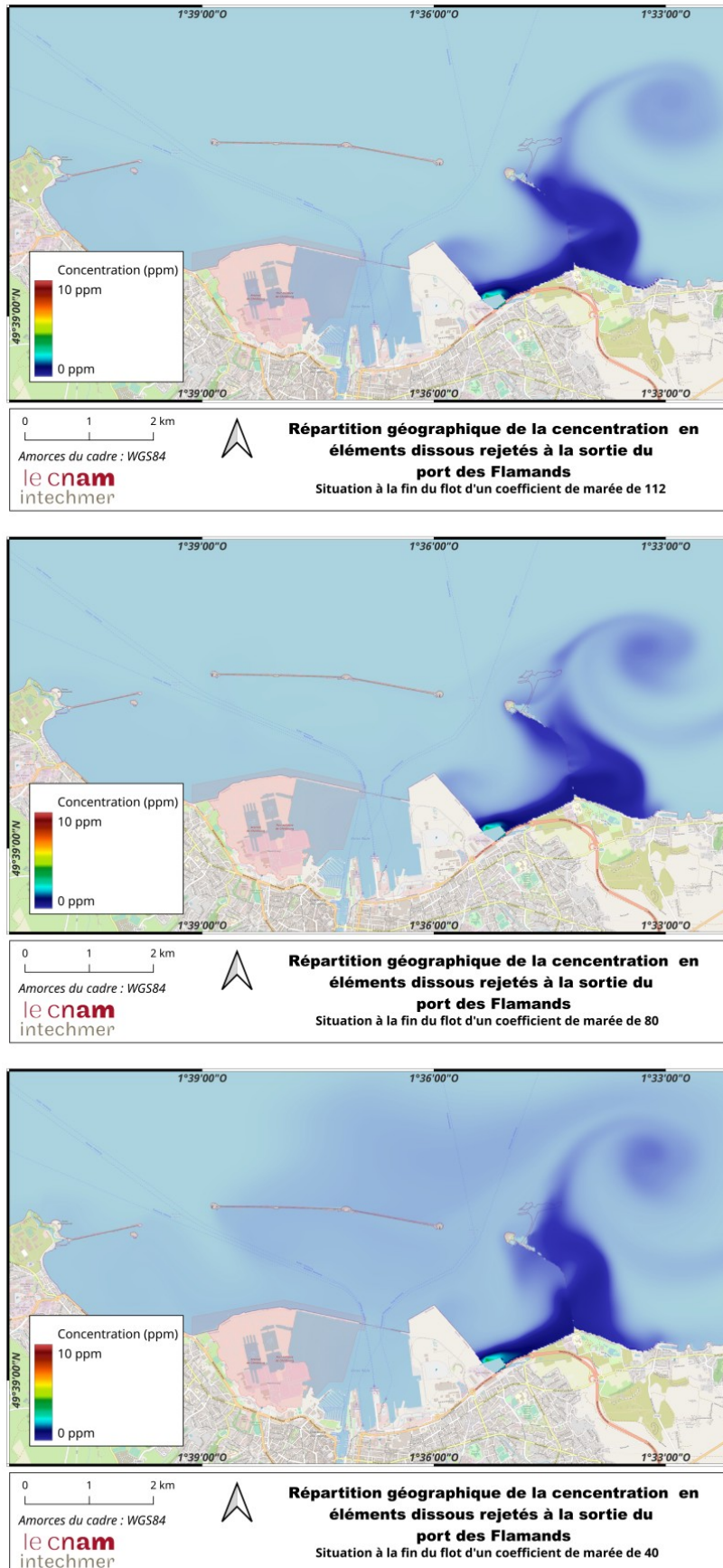


Figure 24 : Dispersion spatiale à la fin du flot (coeffs 112, 80 et 40) des effluents à l'échelle de la rade

IV.1.3. Répartition spatiale en fin du jusant à l'échelle de la rade

A l'instar de ce qui a été observé pour le flot, les figures de dispersion de concentration des rejets montrent des caractéristiques générales identiques. Là encore, l'augmentation du coefficient de marée favorise la dilution à l'échelle du domaine modélisé (Fig. 25).

En fin de jusant, les concentrations les plus fortes sont situées, depuis le point de rejet, le long de la côte est de la grande rade, bloquées par la digue de Collignon. Le flux est ensuite dévié vers le nord en direction du fort de l'Est. Au niveau de ce point, les concentrations se séparent en deux branches distinctes. La première poursuit une trajectoire vers le nord, pour sortir par la passe de l'Est. La seconde s'incurve vers l'ouest (vers le centre de la grande rade), en initiant un mouvement de rotation dextre d'autant plus marqué que le coefficient de marée est important. Les plus fortes concentrations pour le coefficient de 40 sont majoritairement cantonnées dans la partie orientale de la grande rade. Néanmoins en fin de jusant, des linéaments de concentrations hérités sont encore présents et n'ont pas été totalement éjectés du domaine modélisé au nord et au large de la grande rade.

La situation du coefficient de 80 montre deux différences principales avec la précédente (coeff. 40). La première est l'entrée d'une veine de courant d'eau « propre » par la passe de Cabart (est de la rade). Ce courant, dirigé d'est en ouest, s'oriente vers le nord à la sortie de la passe pour suivre la digue de l'Est. Une partie du flux est alors repoussée vers l'ouest. Deux gyres contrarotatifs se mettent ensuite en place, séparés l'un de l'autre par la pointe la plus septentrionale du nouveau terre-plein dédié aux EMR. Le premier gyre senestre plus concentré s'initie à l'est et le second gyre dextre à l'ouest vers le centre de la rade avec des concentrations plus faibles. La seconde différence avec la situation du coefficient 40, est la présence de turbulences importantes au niveau du platier rocheux entre le port des Flamands et la digue de Collignon. Ces affleurements rocheux sont responsables de fortes variations spatiales, à courtes distances, des valeurs de concentration des rejets à ce niveau.

Pour le dernier coefficient (coeff. 112), le schéma organisationnel des concentrations est globalement identique à celui du coefficient de 80. La différence majeure réside dans l'intensité des mouvements déjà notés. L'entrée d'eau « propre » par la passe de Cabart est bien plus marquée ce qui a comme conséquence d'amplifier le rejet vers l'ouest d'une plus grande partie des concentrations. Le flux de concentration passant par la passe de l'Est est alors fortement diminué. Les deux gyres contrarotatifs sont encore plus marqués avec un effet ciseau au niveau de la pointe nord des nouveaux terre-pleins encore plus net.

Au large, les concentrations des rejets éjectées de la rade au cycle précédent, sont d'autant plus expulsées vers l'ouest que les coefficients sont importants. Ces concentrations sont susceptibles d'entrer à nouveau en rade par la passe de l'Ouest au cours des courants de flot suivant pour les faibles coefficients. Cet effet n'est pas à craindre pour les coefficients plus importants (> à 65). Le temps des courants de jusant étant plus faible que celui de flot, les concentrations des rejets en rade ont une tendance globale à rester entre le centre et la partie orientale.

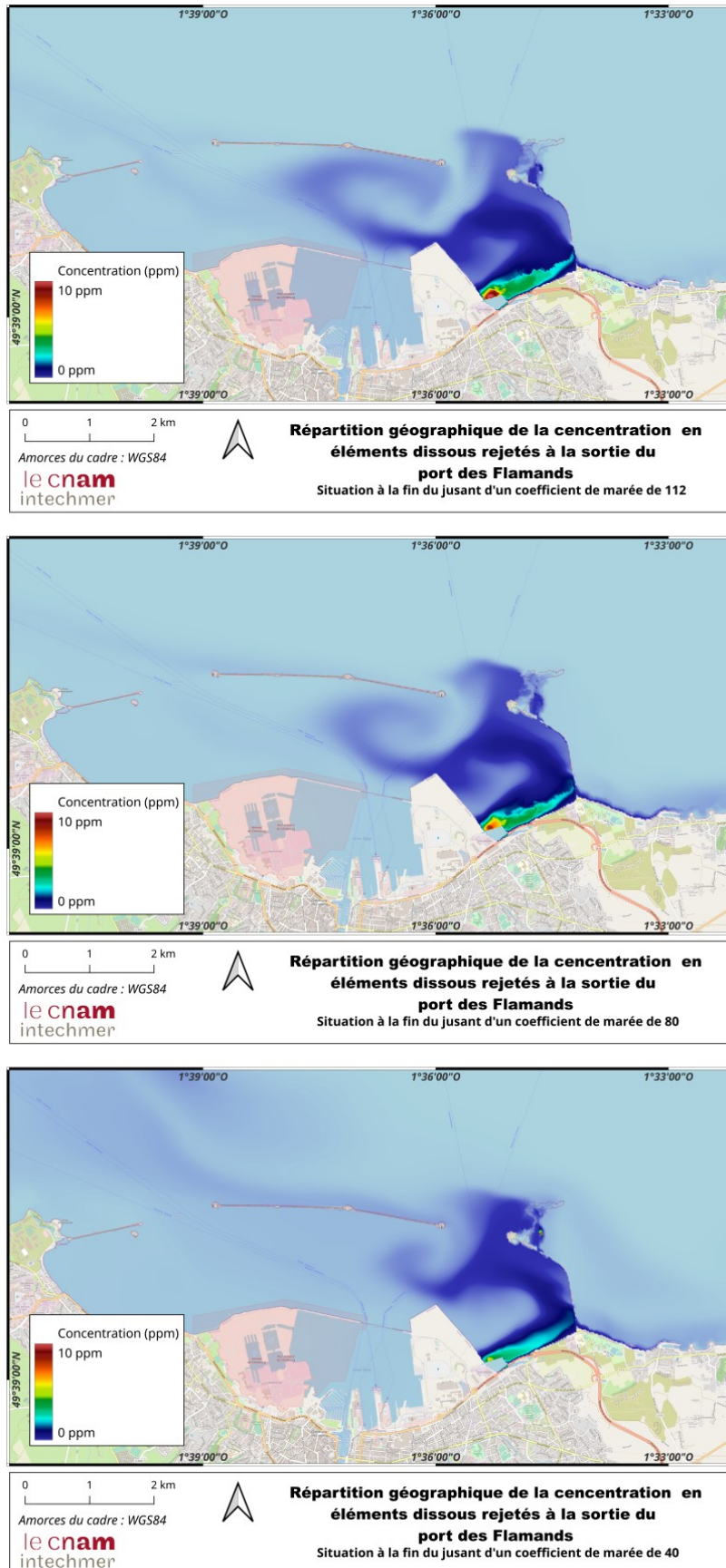


Figure 25 : Dispersion spatiale à la fin du jusant (coeffs. 112, 80 et 40) des effluents à l'échelle de la rade

V.2. Au niveau du point de rejets

La station 7 est localisée à proximité immédiate du point de rejet et donc au nord du port des Flamands. Dans cette zone, l'évolution temporelle des flux dissous de rejet apparaît assez simple (Fig. 26).

A l'échelle de la série temporelle analysée, le flux transporté augmente fortement avec le coefficient de marée.

Le coefficient 40 présente une légère augmentation du flux simulé en fin de période. Cette évolution est inversée dans le cas du coefficient de 112. Le coefficient de 80 présente des fortes irrégularités d'un cycle à l'autre ce qui empêche de déduire une tendance à plus long terme.

A l'échelle du cycle, la simulation montre un schéma simple pour les 3 coefficients avec une période de faible concentration suivie par une période de forte concentration. Cette alternance est liée à l'alternance des courants de flot et de jusant, le maximum de concentration étant systématiquement noté au moment du flot.

En conclusion, lors des petits coefficients, la concentration augmente lentement et de manière continue. Les coefficients plus élevés sont responsables d'une alternance de passage de fortes et faibles concentration en un même cycle de marée.

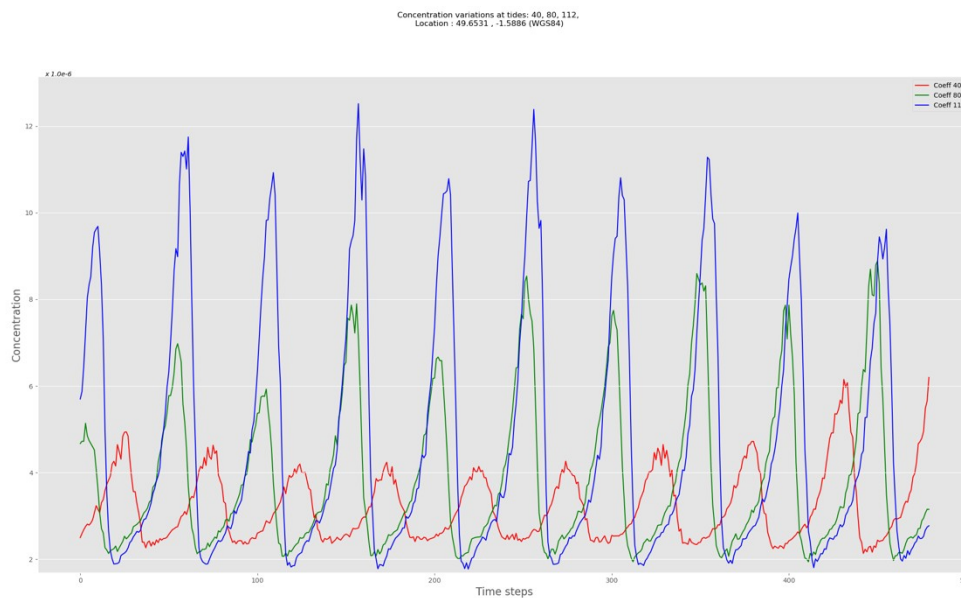


Figure 26 : Dispersion des rejets conservatifs au point 7 pour les 3 coefficients étudiés.

V. Détermination des heures favorables aux rejets

D'une manière générale, quel que soit le coefficient et l'heure, au point de rejet analysé, les effluents sont systématiquement transportés vers l'est de la grande rade (Fig. 9). Cependant, en fonction du coefficient et de l'heure du rejet, des périodes sont plus efficaces dans la dilution des rejets.

Pour les faibles coefficients (< 65), la vitesse maximale ne concorde jamais avec la direction idéale (90°N). Aucune direction n'étant défavorable, ce sont les périodes de plus fortes vitesses des courants, qu'il faut rechercher. Le rejet optimal doit donc être réalisé vers la mi-marée montante sur un laps de temps d'environ 2 h.

Pour les coefficients moyens (65-90), la vitesse la plus favorable apparaît à mi-marée montante comme pour les coefficients précédents. En revanche, des faibles vitesses (mi-marée descendante) coïncident avec les directions optimales pour une dilution des effluents. Pour ces coefficients, deux périodes apparaissent donc favorables aux rejets.

Pour les grands coefficients (> 95), la situation est globalement identique à celle caractéristique des coefficients moyens. Les vitesses élevées des courants autorisent des rejets tout au long du cycle de marée.

VI. Conclusion

A l'échelle de la rade de Cherbourg, les concentrations maximales des effluents sont notées dans la partie orientale. Ils sont expulsés principalement par la passe de Cabart et la passe de l'Est vers la Manche. A l'extérieur de la rade, il faut plusieurs cycles de marée (environ 3 jours en fonction du coefficient de marée) pour que les effluents soient définitivement rejetés vers l'ouest. Le courant rentrant par la passe de l'Ouest ne ramène aucun effluent. Par la suite, ils sont repris par la circulation générale de la Manche avec une direction résultante vers l'est (échelle de la dizaine de jours).

A long terme, nous proposons de réaliser une surveillance de quelques points particuliers de la zone étudiée :

- Les affleurements rocheux localisés au large du boulevard de Collignon ;
- La petite rade de Cherbourg dans sa partie orientale ;
- La baie de Saint-Anne dans sa partie septentrionale ;
- La plage de Collignon dans sa partie la plus proche de la digue.

Pour mieux illustrer le fonctionnement hydrodynamique de la zone étudiée, nous joignons à ce rapport trois vidéos représentatives d'une morte-eau moyenne (coeff 40), d'une marée moyenne (coefficient de 80) et d'une vive-eau (coefficient 112).