

67211

C126 2000 - HIT - M

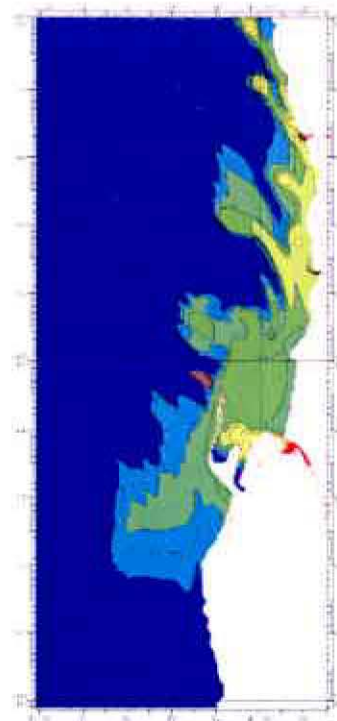
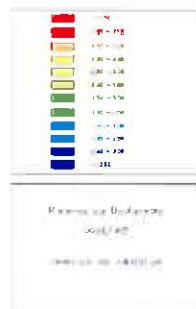
Direction de l'environnement et de l'aménagement littoral
Laboratoire côtier de Boulogne sur mer

Coordination : Benoist HITIER

....
Janvier 2000

IFREMER

Modélisation mathématique du transport, de la dispersion et de la dégradation des rejets bactériens sur le littoral Nord-Pas de Calais-Picardie



Agence de l'Eau Artois-Picardie

IFREMER Bibliothèque de BREST



OEL10474

Modélisation mathématique du transport, de la dispersion et de la dégradation des rejets bactériens sur le littoral Nord-Pas de Calais-Picardie

Etude réalisée en collaboration par :

Benoist HITIER	IFREMER Boulogne
Robert BOTTESINI	IFREMER Boulogne
René OLIVESI	IFREMER Saint Valéry / Somme
Marc MOREL	IFREMER Boulogne
Jean-Claude SALOMON	IFREMER Brest
Marguerite BRETON	IFREMER Brest

Avec l'aide des agents du laboratoire DEL de l'Ifremer
Boulogne pour les prélèvements et les analyses

Introduction.....	4
1. La modélisation mathématique	6
1.1. Généralités	7
1.2. Hypothèses de calcul et équations.....	7
1.3. Emprise des modèles	10
1.4. Bathymétrie	12
1.5. L'étude hydrodynamique.....	13
1.5.1. Conditions extérieures de simulation	13
1.5.2. Les hauteurs d'eau	13
1.5.3. Les courants	16
2. Exercices de validation des modèles.....	20
2.1. Méthodologie	21
2.2. validation du modèle de Boulogne	22
2.2.1. campagne du 2 juin 1997	23
2.2.2. Campagne du 26 janvier 1998.....	26
2.3. Validation du modèle de Baie de Somme.....	30
2.3.1. Méthodologie.....	30
2.3.2. Campagne du 22 juin 1998.....	31
2.3.3. Campagne du 8 octobre 1998	35
2.4. Conclusion sur les campagnes de validation	38
3. Les flux de contaminants microbiens	40
3.1. Les flux bactériens potentiels	41
3.1.1. Les flux potentiels.....	41
3.1.2. Les données bibliographique des flux bactériens mesurés.....	44
3.1.3. Comparaison des flux potentiels calculés et mesurés.	45
3.2. Estimation des flux bactériens observés	46
3.2.1. Généralités.....	46
3.2.2. Les secteurs concernés.....	48
3.2.3. Conclusion	67
4. La dispersion des principaux rejets	68
4.1. Méthodologie	69
4.2. Les images de dispersion	72
4.2.1. La Liane	72
4.2.2. La Manchue	73
4.2.3. La Pointe aux Oies	74
4.2.4. La Slack	75
4.2.5. Le Wimereux.....	76
4.2.6. Le Portel.....	77
4.2.7. Les rivières du Boulonnais.....	78
4.2.8. La Maye	79
4.2.9. Le Canal de la Maye.....	80
4.2.10. Le Courant à Poissons	81

sommaire

4.2.11. La Somme.....	82
4.2.12. Les rejets de la Baie de Somme	83
4.2.13. Les canaux de Calais	84
4.2.14. L'Aa	85
4.2.15. Le port ouest de Dunkerque	86
4.2.16. L'ensemble des panaches de la région de Oye-Plage.....	87
5. La fonction de transfert.....	89
5.1. Généralités.....	90
5.2. Simplification et application.....	91
Conclusion.....	96
Annexes.....	99
Bibliographie.....	101

Introduction

Partant du constat que la qualité sanitaire des eaux du littoral Nord - Pas de Calais - Picardie n'est pas toujours compatible avec les activités de baignade et plus encore conchylicoles malgré les réalisations en matière d'assainissement effectuées depuis de nombreuses années, un programme de modélisation mathématique du transport, de la dispersion et de la décroissance des rejets bactériens inventoriés sur le littoral a été décidé afin de mieux connaître l'impact des sources de pollutions.

Ce travail a bénéficié d'un financement de l'Agence de l'Eau Artois - Picardie, du Conseil Régional Nord - Pas de Calais et de l'Ifremer. Sa réalisation a demandé près de quatre années d'études et a commencé à la fin du premier trimestre 1996. C'est le laboratoire côtier de la Direction de l'Environnement et de l'Aménagement littoral (DEL) de l'Ifremer Boulogne sur mer qui a été chargé de la coordination du programme en relation avec le service "Application Opérationnelles" de Brest.

L'étude a consisté à la mise au point d'un modèle mathématique de courant et de dispersion sur 3 sites côtiers qui posent plus particulièrement des problèmes de qualité des eaux de baignades et / ou conchylicoles :

- la Baie de Somme,
- le port de Boulogne et ses environs,
- la région de Oye-Plage.

Un quatrième modèle a du être développé pour donner une vision d'ensemble de toute la façade Nord - Pas de Calais - Picardie. Il a été également nécessaire de procéder à une évaluation fine sur un an des flux bactériens rejetés à la mer dans les trois secteurs géographiques déterminés.

L'objectif de cette étude est de dégager des voies d'amélioration de la situation actuelle de la qualité sanitaire des eaux littorales. Pour y parvenir nous nous sommes attachés tout d'abord à simuler la dispersion des différents rejets et à essayer de voir les zones maximum impactées. Nous avons ensuite cherché à connaître la part de chacun dans une hypothèse de déplacement des émissaires ou de réduction des flux.

Le présent rapport reprend la totalité des résultats obtenus en matière de réalisation et de validation des modèles, d'estimation des flux et de simulations effectuées.

1. La modélisation mathématique

1.1. Généralités

Dans le milieu marin littoral, les études hydrodynamiques (courantologie et hauteurs d'eau) sont désormais remplacées avantageusement par la méthode de la modélisation mathématique. Cette méthode consiste à résoudre, grâce à un code de calcul spécifique dénommé modèle mathématique, et avec un minimum d'hypothèses simplificatrices, les équations de l'hydrodynamique. On peut ainsi, à partir de la seule connaissance des niveaux d'eau sur le périmètre d'une zone, connaître et prédire les courants et les dénivellations à l'intérieur de ce périmètre. On en déduit aussi le mouvement et la dispersion de toute substance dissoute ou en suspension, sous l'action des courants.

Dans cette méthode, les conditions hydrodynamiques aux limites, évoquées ci-dessus, n'étant pas disponibles, puisque dépendantes des conditions extérieures de marée, de météorologie, de débit fluvial, sont elles-mêmes le résultat d'une modélisation de plus grande emprise. On procède donc par la méthode des modèles gigognes : A partir d'un premier modèle général du plateau continental et de la Manche, et moyennant des modèles intermédiaires d'ampleur de plus en plus réduite et de précision de plus en plus fine, on définit les conditions ambiantes nécessaires au fonctionnement du modèle de détail destiné à résoudre le problème qui se pose.

Le processus d'enchaînement de ces modèles gigognes est actuellement parfaitement maîtrisé et automatisé. Aucune opération de mesure des courants n'est réellement indispensable. La comparaison des résultats du modèle avec les atlas de courants disponibles et les prédictions de marée est suffisante pour s'assurer que le fonctionnement du modèle est correct.

1.2. Hypothèses de calcul et équations

Les courants marins dans l'ensemble de la Manche, sont essentiellement des courants de marée. Ils intéressent donc toute la masse d'eau, ce qui permet de les étudier dans une schématisation bidimensionnelle (chaque grandeur : vitesse, salinité, turbidité, etc. est décrite par sa valeur moyenne sur la hauteur d'eau).

Le logiciel de modélisation utilisé pour cette étude, est le code MARS-2D de l'IFREMER. Très largement utilisé depuis une vingtaine d'années, MARS-2D est un logiciel moderne, robuste, flexible et performant qui

permet des calculs de haute définition. IFREMER valide régulièrement ce code dans des épreuves internationales de test et d'inter comparaison.

Le programme MARS effectue le calcul des courants, des hauteurs d'eau et des concentrations en substances dissoutes, dans un écoulement liquide plan, quasi-horizontale. La forme des fonds peut être absolument quelconque.

Pour fonctionner, le programme a besoin de trois types d'information :

1. La topographie du domaine fournie par la matrice des profondeurs;
2. Les conditions aux limites sur les frontières ouvertes du domaine. Pour la partie hydraulique, on utilisera des conditions aux limites fortes de dénivellation et des conditions faibles de vitesse des courant ;
3. Les flux d'eaux et de matière dissoutes (ou en suspension) à l'intérieur du domaine (rivières, sources émissaires..).

Les hypothèses de calcul sont les suivantes :

- La composante horizontale ne varie pas beaucoup sur l'ensemble de la colonne d'eau. le modèle calcule la moyenne des courants sur la verticale et cette valeur moyenne a une forte signification physique.
- Les vitesses verticales sont faibles.

Sous ces hypothèses, les lois qui décrivent le comportement physique du système, à savoir le second principe de Newton et la loi de la conservation de la masse se traduisent par le système d'équation dit de Saint Venant :

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - fv - \varepsilon \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + g \frac{u \sqrt{u^2 + v^2}}{k^2 H^{4/3}} + \frac{\partial Pa}{\partial x} + \frac{\tau_x}{\rho H} = 0$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + fu - \varepsilon \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + g \frac{v \sqrt{u^2 + v^2}}{k^2 H^{4/3}} + \frac{\partial Pa}{\partial y} + \frac{\tau_y}{\rho H} = 0$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial (Hu)}{\partial x} + \frac{\partial (Hv)}{\partial y} = 0$$

U Composante de la vitesse selon Ox

V Composante de la vitesse selon Oy

ζ Cote de la surface libre

f Facteur de Coriolis

kr Coefficient de frottement de fond, de Strikler

H Hauteur de la colonne d'eau

C Concentration

K Coefficient de diffusion horizontale

Ce système est complété par l'équation de transport-diffusion-décroissance d'un élément chimique (ou assimilé) transporté en suspension.

$$\frac{\partial (HC)}{\partial t} + \frac{\partial (HUC)}{\partial x} + \frac{\partial (HVC)}{\partial y} - \frac{\partial \left(HK_x \frac{\partial C}{\partial x} \right)}{\partial x} - \frac{\partial \left(HK_y \frac{\partial C}{\partial y} \right)}{\partial y} + IHC + S = 0$$

K Coefficient de diffusion horizontale

C. Coefficient de diffusion horizontale

L Coefficient de décroissance propre

S Source

MARS-2D intègre ces équations différentielles de manière totalement automatique, quelle que soit la forme du domaine, qui peut d'ailleurs évoluer dans le temps (zones découvrantes, mur immergé...)

Le problème posé est résolu par une méthode d'évolution : A partir d'un instant t0, où toutes les variables sont supposées connues, les calculs progresseront vers l'instant t0+δt, en intégrant le système de Saint Venant (pour l'hydrodynamique)

et l'équation d'advection-dispersion-décantation-décroissance pour le transport d'un scalaire.

1.3. Emprise des modèles

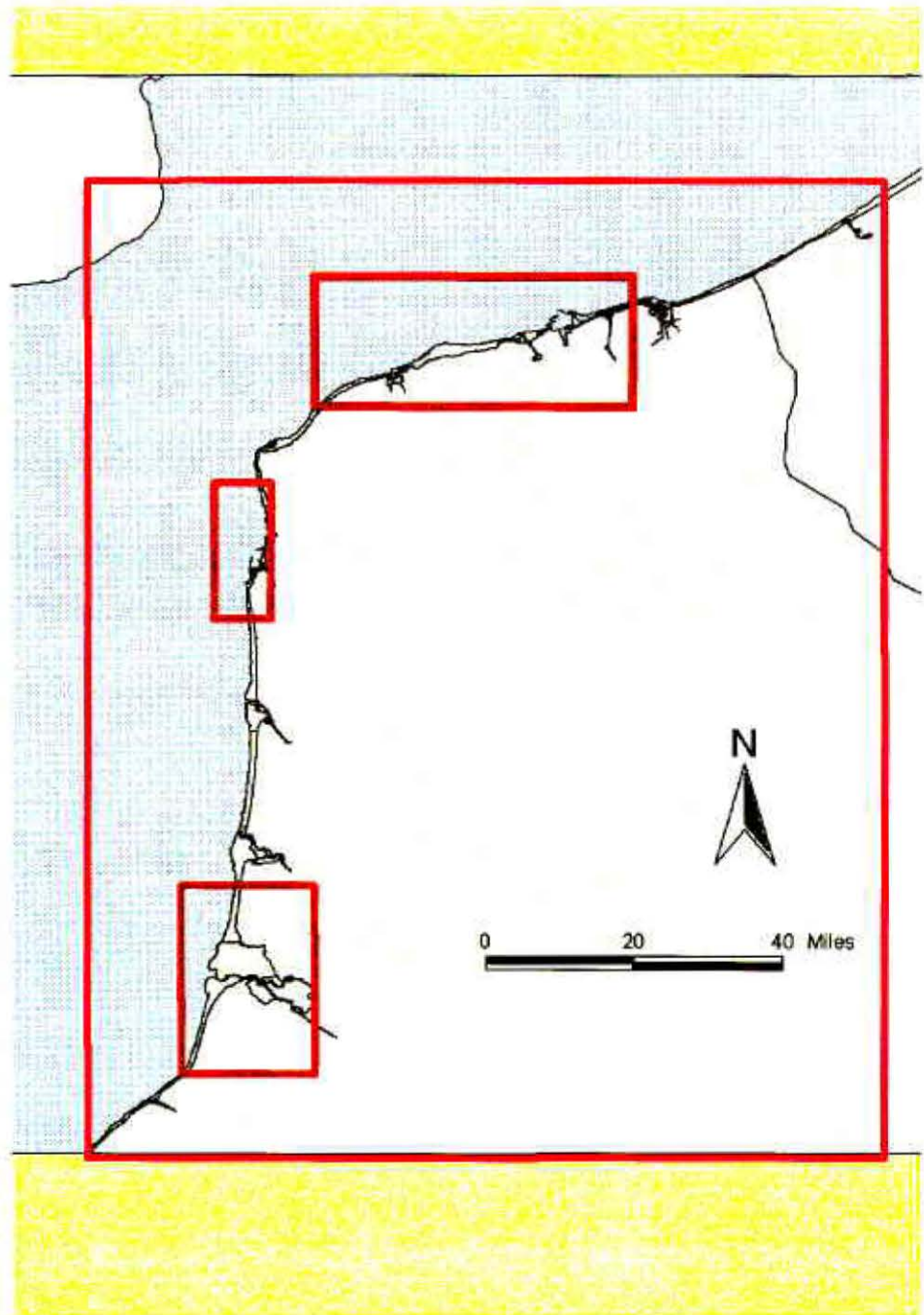


Figure 1 :Emprise des modèles

Les quatre modèles réalisés, dont l'emprise est représentée figure 1 sont :

- Le modèle d'ensemble qui s'étend depuis la frontière belge et au-delà, jusqu'aux environs de Dieppe (maille de 200 m ; environ 170 000 points de calcul effectifs). Ce modèle recouvre également la totalité du détroit du Pas de Calais
- Le premier modèle de détail qui concerne le secteur de Boulogne - Wimereux - Ambleteuse (maille de 50 m ; 50 000 points de calcul effectifs).
- Le modèle de la Baie de Somme et du littoral adjacent, qui va de Fort Mahon (au nord), jusqu'à Woignarue (au sud). Sa maille est de 75 m, représentant 60 000 points de calcul effectifs, dont un très grand nombre se trouve alternativement émergé et immergé.
- Le troisième modèle de détail, relatif à la région de Oye-Plage, s'étend du cap Blanc Nez à Dunkerque. Il représente 187 000 mailles de calcul de dimension 65m.

Tous ces modèles prennent en compte les variations du coefficient de marée, du vent, des débits fluviaux et des émissaires. Le modèle de Oye-Plage prend également en compte les effets de houle. Les quatre modèles sont désormais opérationnels et ont été transférés au laboratoire côtier de Boulogne sur mer qui les a utilisés pour la présente étude et pourra traiter de toute question d'environnement qu'il pourra envisager.

1.4. Bathymétrie

La matrice des fonds a été construite à partir des cartes marines éditées par le Service Hydrographique et Océanographique de la Marine. Des données complémentaires ont été recueillies auprès de la DDE 80 et des Services Maritimes de Boulogne et Calais.

La figure ci-dessous représente une vue 3D des fonds du modèle général.



Figure 2 : Topographie des fonds du modèle régional

1.5. L'étude hydrodynamique

1.5.1. Conditions extérieures de simulation

Le modèle peut être utilisé pour toute situation combinée de marée et de météorologie. Cependant, nous préférons donner ci-dessous une description des hauteurs d'eau et des courants lors d'une situation de marée moyenne (coefficient 70) et en absence de vent. Ceci permet d'expliquer le comportement des masses d'eau dans la zone d'étude sans qu'interviennent les modifications induites par la modification du coefficient de marée et l'influence du vent simplifiant par conséquent la compréhension des phénomènes.

1.5.2. Les hauteurs d'eau

Comme on peut le constater sur la figure 3, le régime de marée du littoral du Nord Pas de Calais est cyclique. La période de cette marée moyenne est de 12 heures et 24 minutes. En revanche, elle n'est pas symétrique. La durée du montant est inférieure à la durée du perdant.

L'amplitude de la marée est maximum à l'entrée de la baie de Somme et décroît du sud vers le nord. La marée haute atteint environ 9 mètres à Boulogne, elle est encore de 7,5 mètres dans le détroit du Pas de Calais, mais seulement de 6 mètres au niveau de Dunkerque. Les 4 points de mesure sont localisés en figure 4.

L'heure de la marée haute est retardée à mesure que l'on se déplace vers le nord et vers l'est. Ce retard par rapport au point situé au sud de la zone est d'une demi-heure à Boulogne et atteint une heure et demie à Dunkerque.

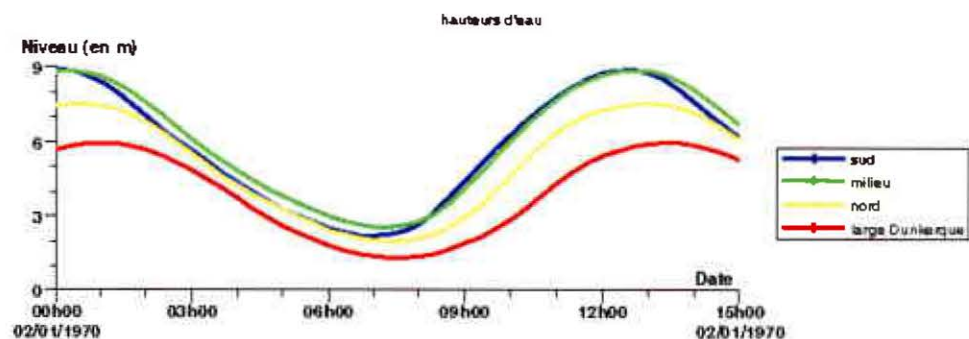


Figure 3 : hauteurs d'eau

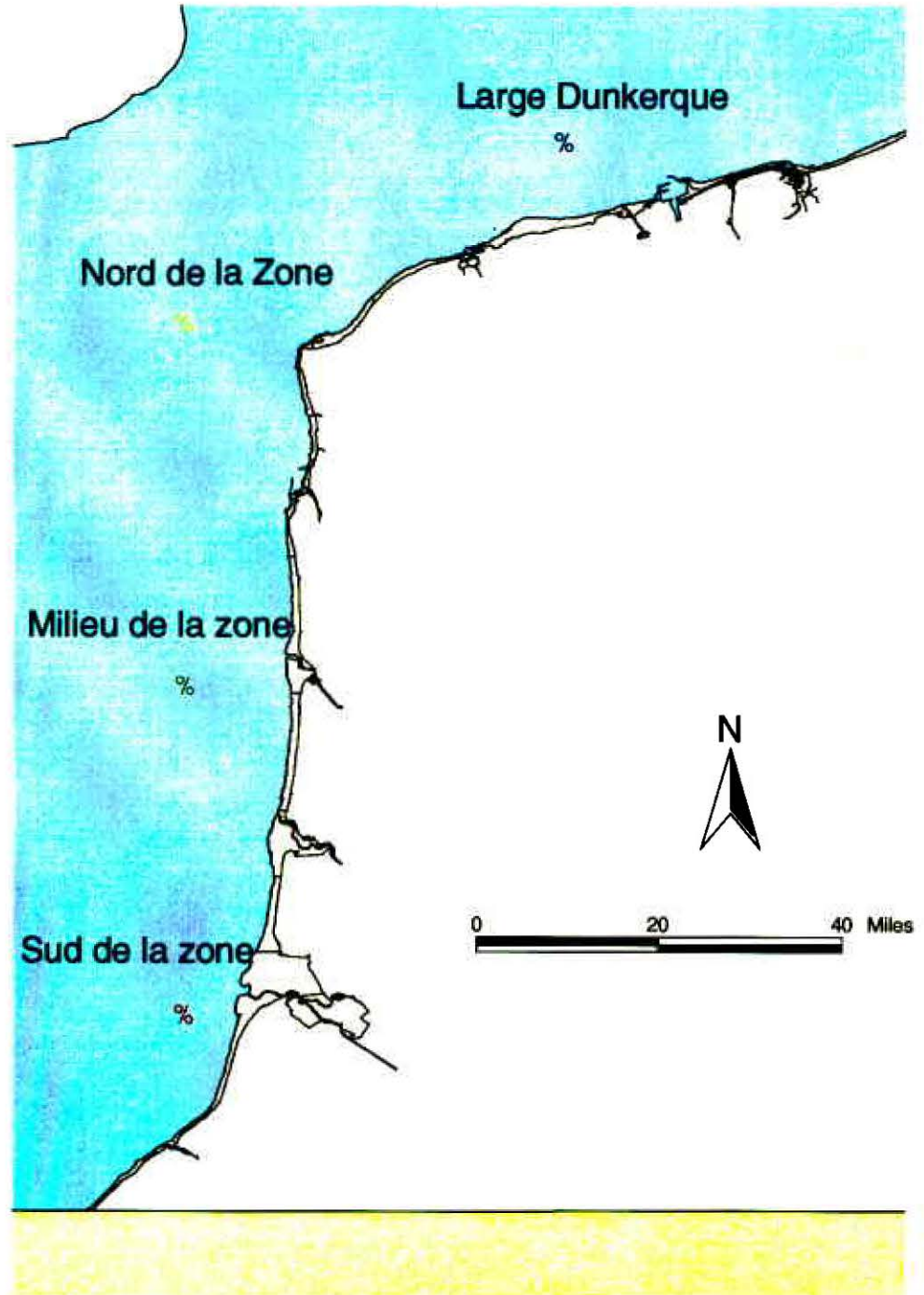


Figure 4 : localisation des points de mesure

En ce qui concerne la marée basse, le décalage horaire est du même ordre que ce qui a été constaté pour la marée haute. Par rapport au zéro local, les niveaux s'élèvent du sud vers le nord et vers l'est, sauf une petite inversion entre la baie de Somme et la baie de Canche qui traduit une déformation de l'onde de marée.

La figure 3 illustre l'onde de marée qui se propage dans la Manche avant de franchir le détroit du Pas de Calais et qui se compose progressivement avec une autre onde de marée qui descend le long des côtes anglaises. La composition de ces deux ondes provoque un point amphidromique au large des côtes néerlandaises.

1.5.3. Les courants

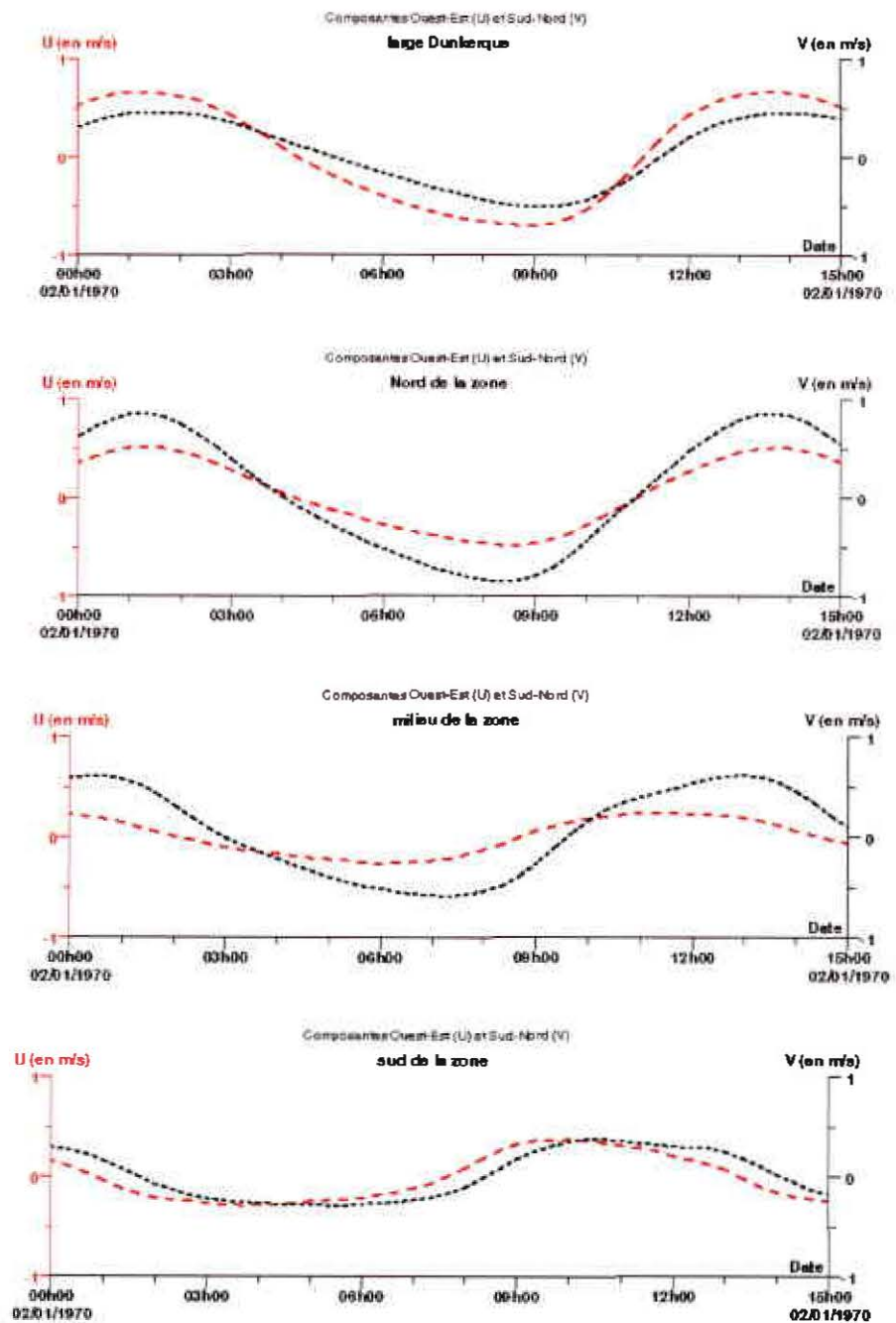


Figure 5 : Tracés chronologiques de vecteurs vitesse

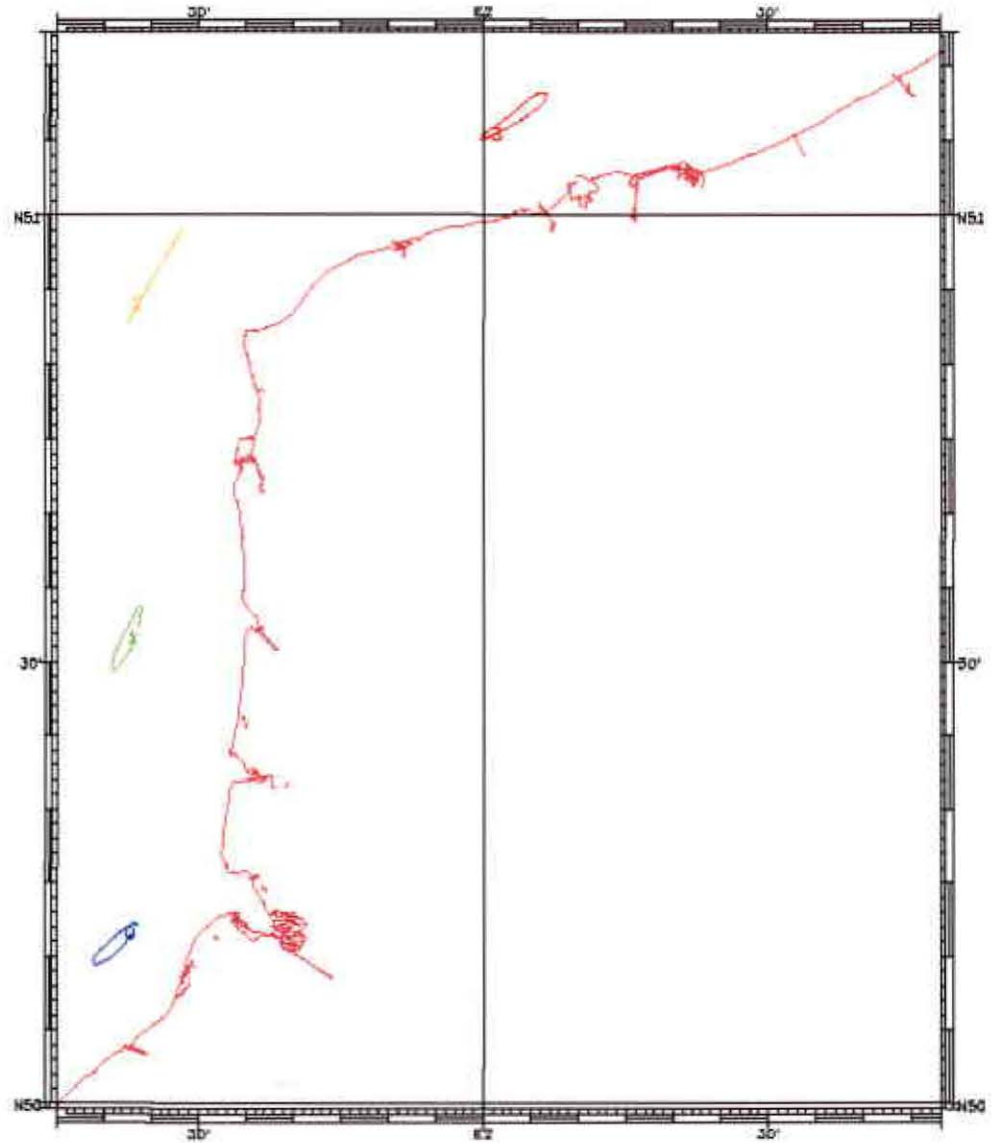


Figure 6 : trajectoires au large

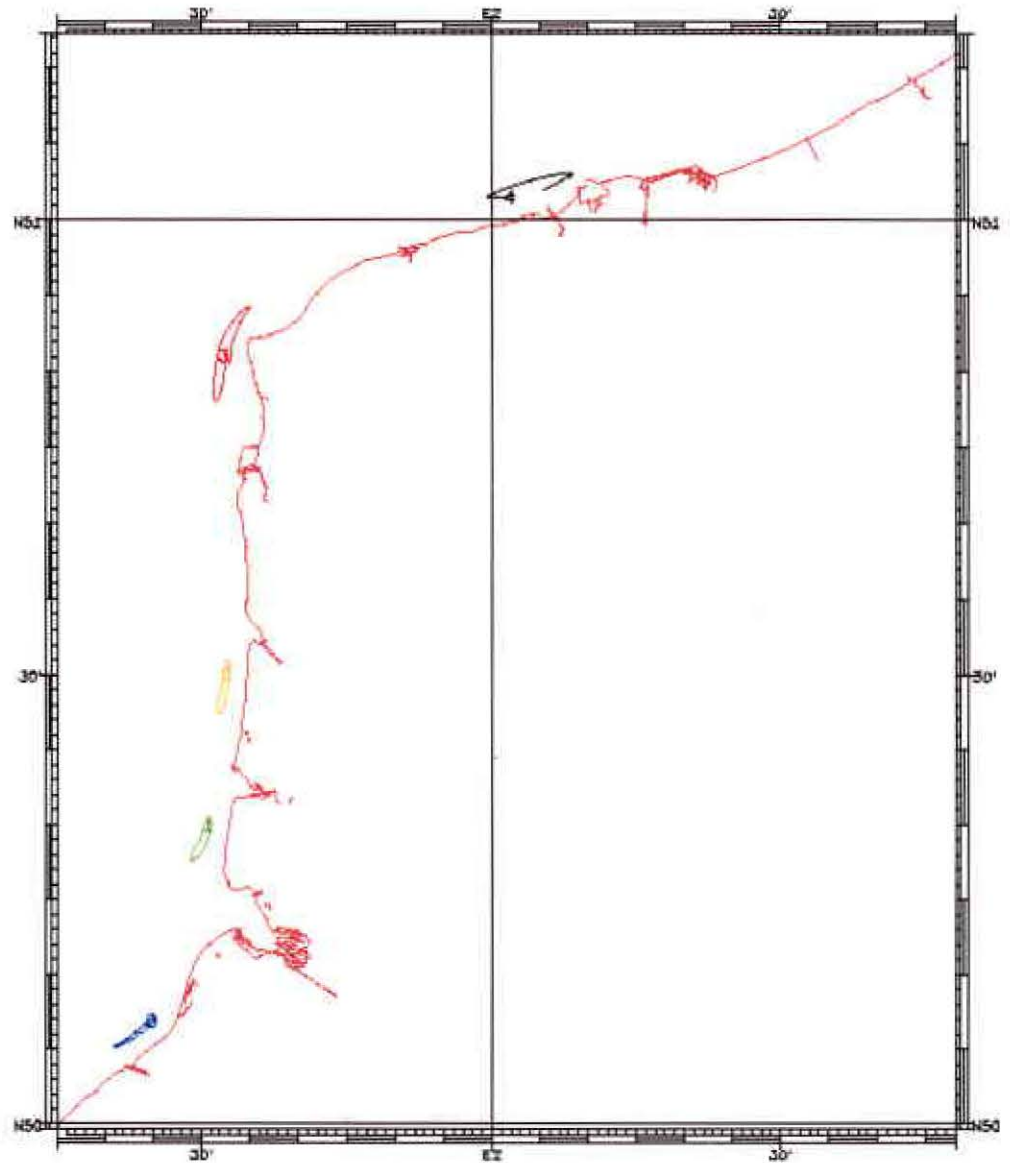


Figure 7 : trajectoires près de la côte

Comme nous avons pu le voir pour les hauteurs d'eau, le courant de marée est cyclique (fig. 5). La période est légèrement supérieure à 12 heures. Au sud du détroit, le courant de marée est décalé d'environ 2 heures par rapport à la marée proprement dite. Au niveau du détroit, l'intensité du courant est maximale au moment des étales de marée. Au Nord-Est du détroit, la marée et le courant sont synchronisés. Le flot (temps pendant lequel la composante V est positive comme le montre la figure 5) dure moins longtemps que le jusant. Le détroit du Pas de Calais est l'endroit où l'intensité du courant est la plus importante de la zone d'étude. A cet endroit, les 2 composantes U et V changent de sens simultanément. Ailleurs, le changement de sens intervient d'abord sur la composante horizontale (U). Ceci signifie que les changements de direction des courants se font toujours dans le sens contraire des aiguilles d'une montre.

La figure 6 montre des trajectoires de particules d'eau au cours d'un cycle de marée avec les points de départ situés au large. Nous constatons que les trajectoires ont la forme d'une ellipse dont le plus grand axe est orienté Sud-Ouest / Nord-Est. Les particules circulent dans le sens contraire des aiguilles d'une montre et reviennent à proximité de leur point de départ. Le grand axe pivote légèrement vers le Nord en montant vers le détroit, puis s'oriente à nouveau vers le Nord-Est en allant vers la Belgique. Au niveau du détroit, le mouvement des masses d'eau suit une trajectoire alternative rectiligne.

En regardant la figure 7 qui représente les trajectoires à partir de points situés plus près de la côte, on constate que l'excursion des particules est plus courte que pour des points situés plus au large. En revanche les ellipses sont plus étroites. Les trajectoires sont parallèles à la côte. Au niveau du cap Gris Nez, le mouvement des masses d'eau est une ellipse déformée par la forme du cap

Le fait que ces trajectoires ne se referment pas exactement à l'issue d'une période de marée traduit le mouvement résiduel (Lagrangien) des masses d'eau.

2. Exercices de validation des modèles

2.1. Méthodologie

Les modèles ont été installés au laboratoire IFREMER de Boulogne sur mer afin de pouvoir étudier les rejets d'eaux usées du littoral. Une fois les modèles construits pour chacun des sites d'étude, nous procédons à des exercices de validation pour s'assurer que le modèle est conforme avec le terrain.

Le jour de la validation, une équipe va mesurer le débit et prélever de l'eau dans les rejets (rivières ou émissaires). Dans le même temps, une seconde équipe sort en bateau prélever de l'eau à des stations situés dans le panache des principaux rejets.

D'une part, les échantillons d'eau sont analysés au laboratoire de manière à connaître la concentration bactérienne aux différentes stations. Pour la station la plus proche d'un rejet, la concentrations bactérienne et le débit du rejets servent à estimer le flux de contaminant selon la formule :

$$\text{flux} = \text{concentration} \times \text{débit}$$

D'autre part, le modèle calcule la concentration en contaminant pour chaque maille du modèle et à intervalle régulier. Les résultats de ces calculs sont écrits dans des fichiers.

Un logiciel de visualisation permet d'extraire de ces fichiers les concentrations aux différentes stations. Ces valeurs sont comparées aux résultats des analyses effectuées au laboratoire. Deux campagnes de validations ont eu lieu pour chacun des deux sites Boulogne et Baie de Somme. Pour le site de Oye-Plage aucune validation sur le terrain n'a pu être effectuée à cause d'un retard dans l'estimation des flux fournis par les services des Voies Navigables

Pour exécuter une simulation, le programme informatique va lire des fichiers contenant les informations qui décrivent entre autre :

- les conditions de marées et de météo ;
- les coordonnées et le débit des rivières ;
- le T90¹, les coordonnées d'un rejet ;
- et le flux de contaminant.

Ces fichiers sont rassemblés dans un journal.

¹ C'est le temps de disparition de 90 % des bactéries

2.2. validation du modèle de Boulogne

Les deux campagnes de validation du bouloonnais ont été effectuées suivant le même protocole. Le jour de la campagne de prélèvement est défini en fonction de la disponibilité en personnel et du coefficient de marée. La première sortie du bateau se fait le matin à marée haute pendant le flot. Les stations sont réparties le long d'une radiale qui part des écluses de la Liane et se dirige vers Wimereux. La sortie de l'après midi se déroule à marée basse qui correspond à une période de jusant. La radiale va des écluses de la Liane vers le Portel. Les 5 stations situées à l'intérieur du port et de la rade de Boulogne sont communes aux deux simulations (voir fig. 8).

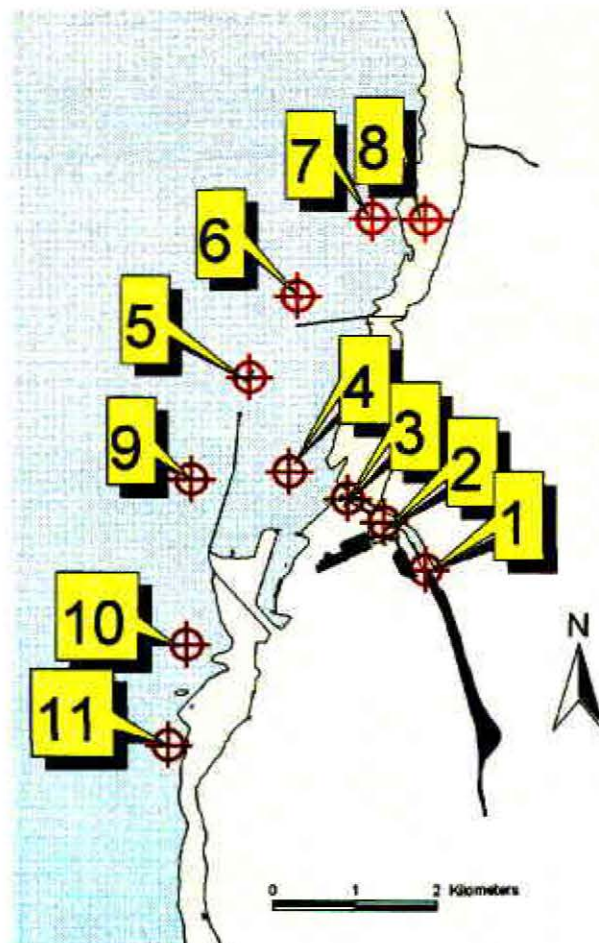


Figure 8 : localisation des points de prélèvements pour la validation de Boulogne

2.2.1. campagne du 2 juin 1997

Les conditions et les résultats de la campagne sont reportés ci-dessous dans les tableaux 1 et 2.

Date	Matin			Après-midi		
	Coef.	PM	BM	Coef.	PM	BM
02/06/97	74	10h26	5h11	78	22h53	17h41

Tableau 1 : la marée à Boulogne² le 02 juin 1997

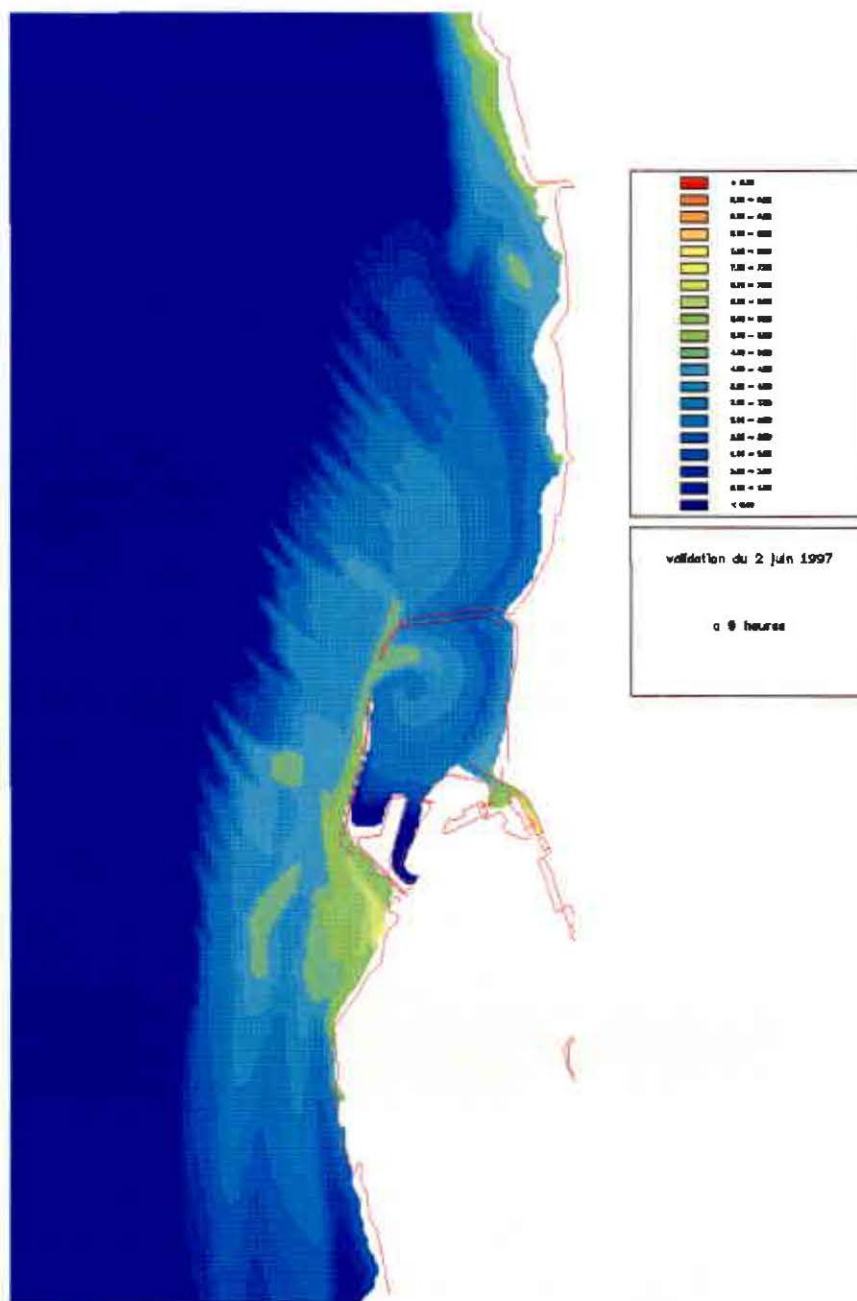
		coliformes fécaux		
		microplaques		modèle
		brut ³	log ⁴	log
point 1 : 9h05	Eaux	> 34 659	8,5	7,9
point 2 : 9h15	Eaux	>34 659	8,5	7,5
point 3 : 9h20	Eaux	4 854	7,7	6,7
point 4 : 9h25	Eaux	< 15	< 5,2	5
Point 5 : 9h30	Eaux	15	5,2	6
Point 6 : 9h40	Eaux	< 15	< 5,2	
Point 7 : 9h50	Eaux	< 15	< 5,2	3
Point 8 : 10h00	Eaux	< 15	< 5,2	
point 1 : 16h40	Eaux	27 726	8,4	8,2
point 2 : 17h05	Eaux	718	6,9	7,6
point 3 : 17h08	Eaux	449	6,7	7,3
point 4	Eaux	249	6,4	6,5
point 5 : 17h18	Eaux	< 15	< 5,2	5
point 9 : 17h27	Eaux	15	5,2	5
point 10 : 17h35	Eaux	15	5,2	
point 11	Eaux	30	5,5	5

Tableau 2 : Résultats de la validation du 02 juin 1997

² Source SHOM

³ Les résultats bruts sont donnés en nombre de coliformes * 100 ml⁻¹

⁴ les résultats sont donnés en logarithmes du nombre de coliformes * m⁻³



⁵Figure 9 : validation du 2 juin 1997 à 9 heures

⁵ la légende des images est reproduite dans les annexes du présent rapport.

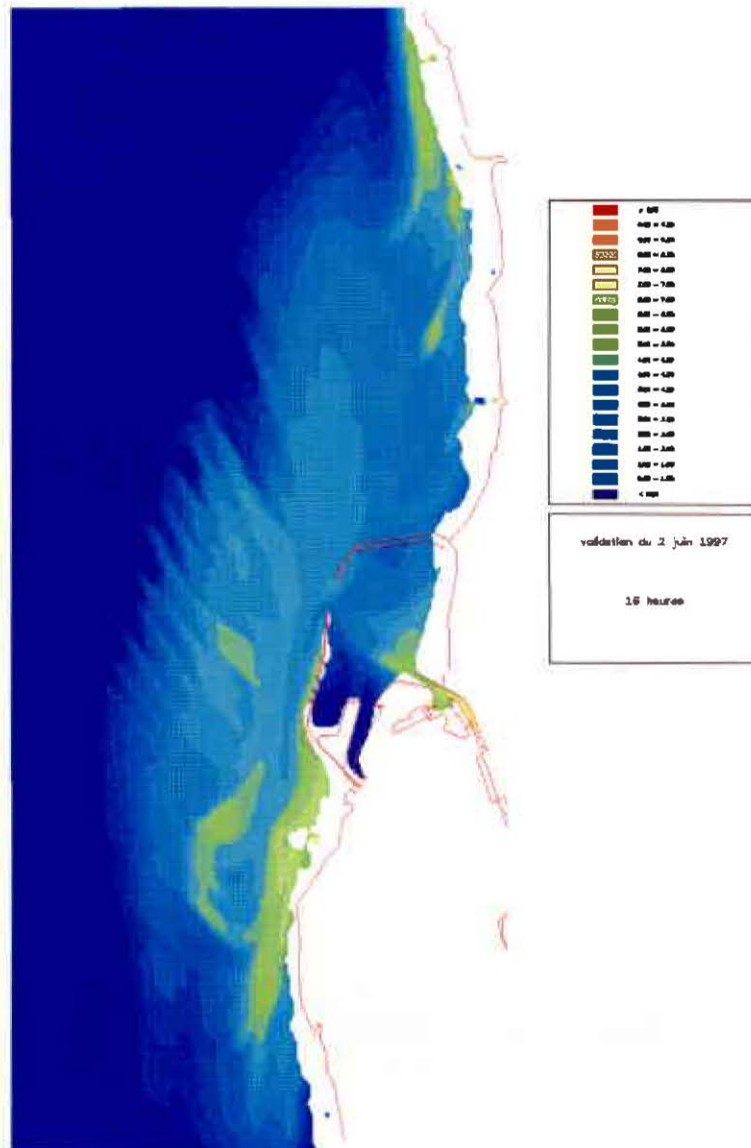


Figure 10 : validation du 2 juin 1997 à 16 heures

Le tableau 2 présente les concentrations bactériennes de l'eau à différents endroits du panache du rejet de la Liane. En comparant les deux colonnes de droite nous pouvons constater que les résultats sont assez proches.

Le matin, les mesures effectuées à proximité du point d'injection (station 1) sont supérieures aux calculs du modèle. Le panache du rejet se dilue légèrement moins rapidement que ce que calcule le modèle. Les bactéries deviennent indétectables dès que le panache arrive dans la rade de Boulogne (station n°4).

L'après midi, les résultats sont tout à fait semblables ; les écarts entre les résultats donnés par le laboratoire et ce qui a été calculé par le modèle sont très faibles. On constate encore une fois que les bactéries sont en nombre trop faible pour être détectées par la mesure avant que le panache n'ait atteint la digue ceinturant la rade de Boulogne. Les figures 9 et 10 montrent l'évolution du panache des rejets à 9 heures et 16 heures le 2 juin 1997.

2.2.2. Campagne du 26 janvier 1998

Les conditions et les résultats de la seconde campagne de validation sont présentés ci-dessous dans les tableaux 3 et 4.

Date	Matin			Après-midi		
	Coef.	PM	BM	Coef.	PM	BM
26/01/98	69	10h25	5h16	75	22h51	17h44

Tableau 3 : la marée à Boulogne le 26 janvier 1998

		coliformes fécaux		
		microplaques		modèle
		brut	log	log
point 1 : 9h30	Eaux	> 34 659	> 8,5	8,9
point 2 : 9h35	Eaux	16 740	8,2	8,0
point 3 : 9h40	Eaux	15 199	8,2	6,7
point 4 : 9h45	Eaux	1 007	7,0	6,1
Point 5 : 9h50	Eaux	127	6,1	5,1
Point 6 : 9h55	Eaux	30	5,4	5,3
Point 7 : 9h58	Eaux	< 30	< 5,4	5,3
Point 8 : 10h05	Eaux	110	6	5,6
point 1 : 16h35	Eaux	> 34 659	> 8,5	8,7
point 2 : 16h40	Eaux	23 671	8,4	8,2
point 3 : 16h45	Eaux	>34 659	> 8,5	7,6
point 4 : 16h50	Eaux	5 035	7,7	6,9
point 5 : 16h55	Eaux	< 30	< 5,4	5,0
point 9 : 17h00	Eaux	197	6,3	5,5
point 10 : 17h05	Eaux	143	6,1	4,9
point 11 : 17h10	Eaux	77	5,9	4,9

Tableau 4 : Résultats de la validation du 26 janvier 1998

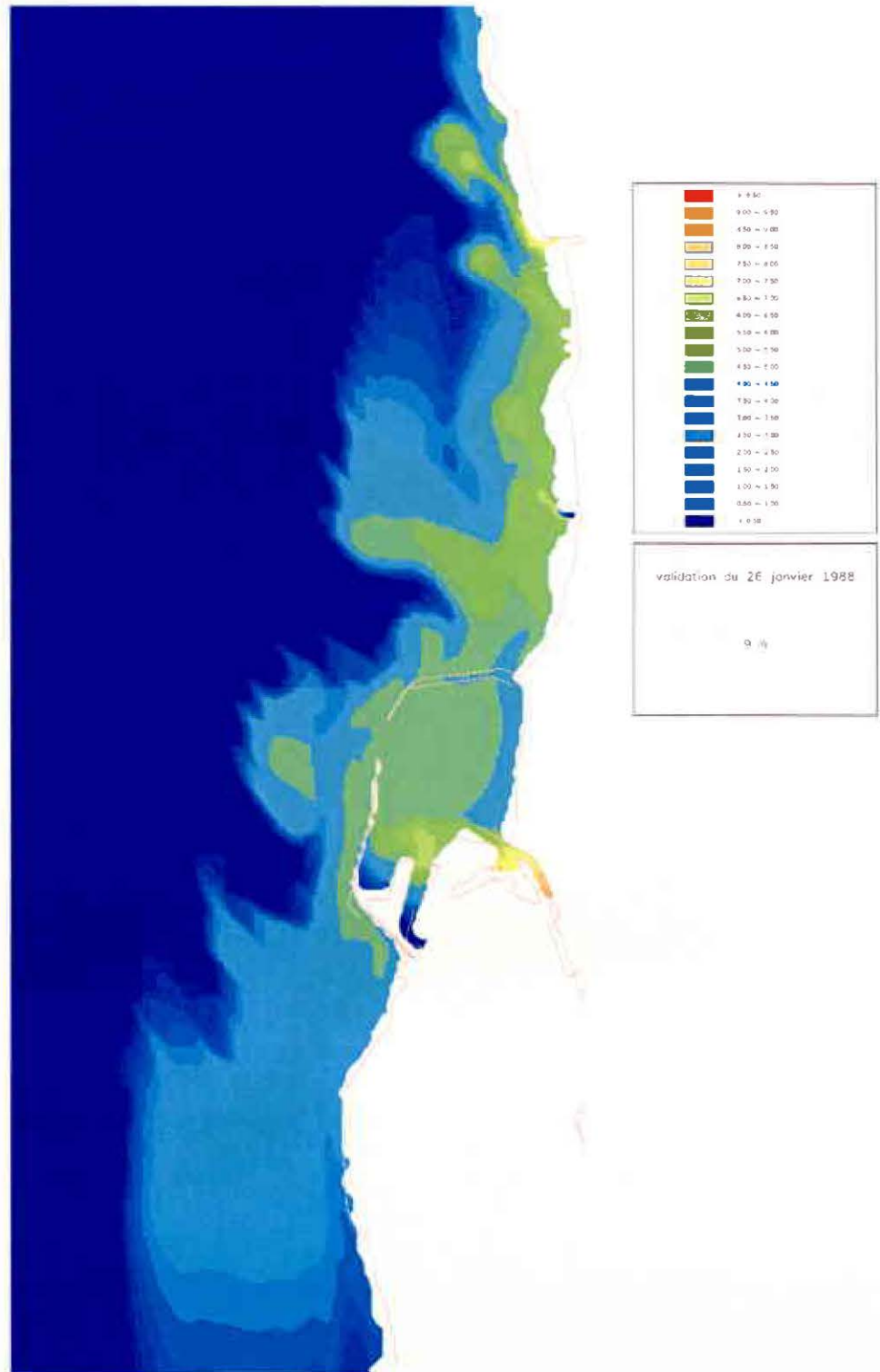


Figure 11 : validation du 26 janvier 1998 le matin

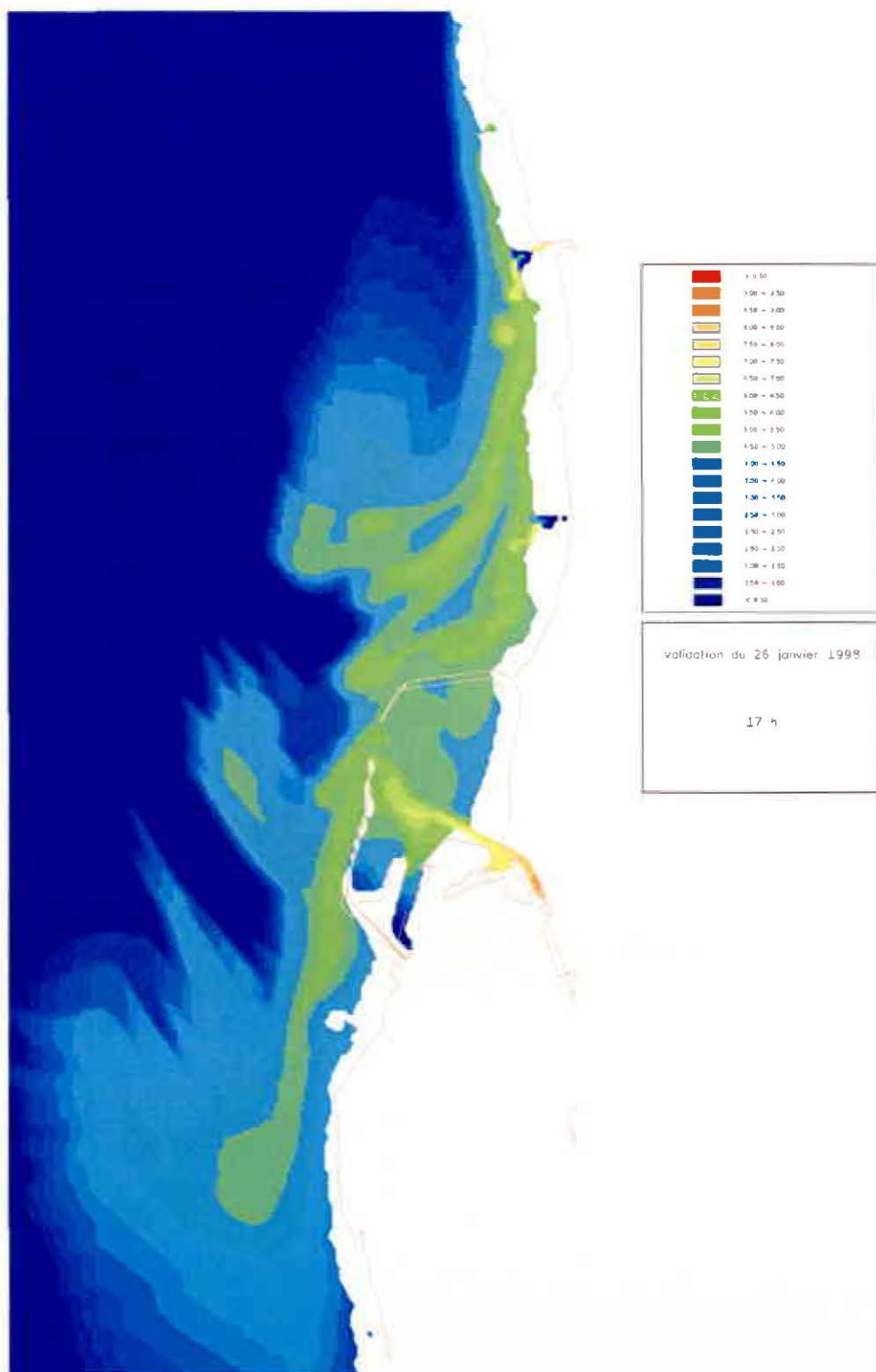


Figure 12 : validation du 26 janvier 1998 l'après midi

Le 26 janvier, au point 1, la concentration calculée par le modèle est légèrement supérieure à celle obtenue par le laboratoire à la dilution choisie.

Les résultats des analyses bactériologiques au point 3 situé au niveau des jetées du port de Boulogne sont élevées pour les deux sorties ; sans que l'on puisse trouver d'explication simple.

Le matin, on voit clairement la disparition des bactéries que cela soit par analyse ou par calcul. Toutefois les résultats des analyses sont toutes supérieures aux calculs du modèle. L'écart entre les deux méthodes pouvant même atteindre 1,5 log. Les valeurs font apparaître la bonne qualité des eaux à l'extérieur de la digue nord de Boulogne au large de la pointe de la Crèche. A la dernière station, la qualité se dégrade à nouveau légèrement car ce point est sous l'influence de la rivière Wimereux.

L'après-midi, les écarts entre les deux méthodes sont plus faibles. On constate une contamination élevée qui persiste jusqu'à la station 3 située entre les jetées. Il n'y a pratiquement plus de contamination lorsque le panache atteint le caisson (station 5). Les analyses révèlent qu'elle augmente légèrement en se dirigeant vers le Portel. Le modèle ne fait pas apparaître le phénomène étant donné que nous n'avons pas introduit dans le modèle de source de pollution au sud de Boulogne ; à l'exception du rejet de la station d'épuration du Portel qui est peu contaminé. Les figures 11 et 12 montrent l'évolution du panache des rejets le matin et l'après-midi du 26 janvier 1998. Sur la figure 12, on voit une langue d'eau légèrement contaminée à l'extérieur du port de Boulogne qui se prolonge en face du Portel.

Les deux simulations ne font pas apparaître de divergence importantes entre les calculs du modèle et les résultats d'analyses faites au laboratoire. On peut considérer que le modèle du boulonnais est correctement calé.

2.3. Validation du modèle de Baie de Somme

2.3.1. Méthodologie

La configuration de la Baie de Somme et les moyens nautiques dont on dispose ne permettent pas de faire deux campagnes de prélèvement dans la journée. De plus, nous nous préoccupons de suivre le panache de la rivière Somme pour voir la disparition des bactéries. A priori, le jusant est la meilleure période pour voir l'évolution de la concentration bactérienne. La campagne de prélèvement nautique commence à pleine mer. Le bateau part de l'écluse de la Somme pour atteindre le large en faisant des prélèvements le long du parcours. Le retour à l'écluse de la Somme se fait en faisant un crochet par le Hourdel et le Crotoy. On est alors en jusant. La localisation des stations de prélèvement est présentée figure 13.

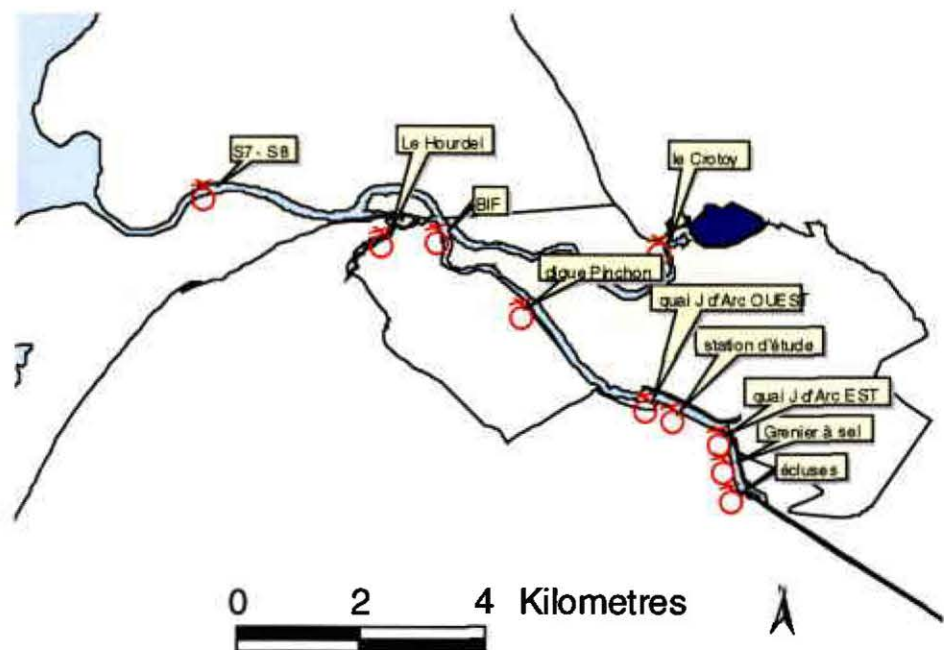


Figure 13 : localisation des stations de prélèvement pour la validation de la Baie de Somme

2.3.2. Campagne du 22 juin 1998

Les conditions et les résultats de la campagne sont présentés dans les tableaux 5 et 6.

Date	Matin			Après-midi		
	Coef.	PM	BM	Coef.	PM	BM
22/06/98	82	11h10	5h52	86	23h32	18h18

Tableau 5 : les marées à Fort Mahon le 22 juin 1998

		coliformes fécaux		
		microplaques		modèle
		brut	log	log
Ecluses 11h00	Eaux	292	6,5	6,8
Station d'étude 11h10	Eaux	520	6,7	5,4
S7-S8 11h55	Eaux	< 30	< 5,4	3,6
Bif 12h30	Eaux	< 30	< 5,4	4,2
Le Hourdel 12h20	Eaux	109	6,0	5,3
Le Crotoy 12h45	Eaux	734	6,9	5,5
Extrémité digue Pinchon 13h30	Eaux	472	6,6	5,0
Station d'étude 13h35	Eaux	1 638	7,2	5,9
Grenier à sel 13h40	Eaux	419	6,6	7,0
Ecluse 13h45	Eaux	524	6,7	6,9

Tableau 6 : Résultats de la validation du 22 juin 1998

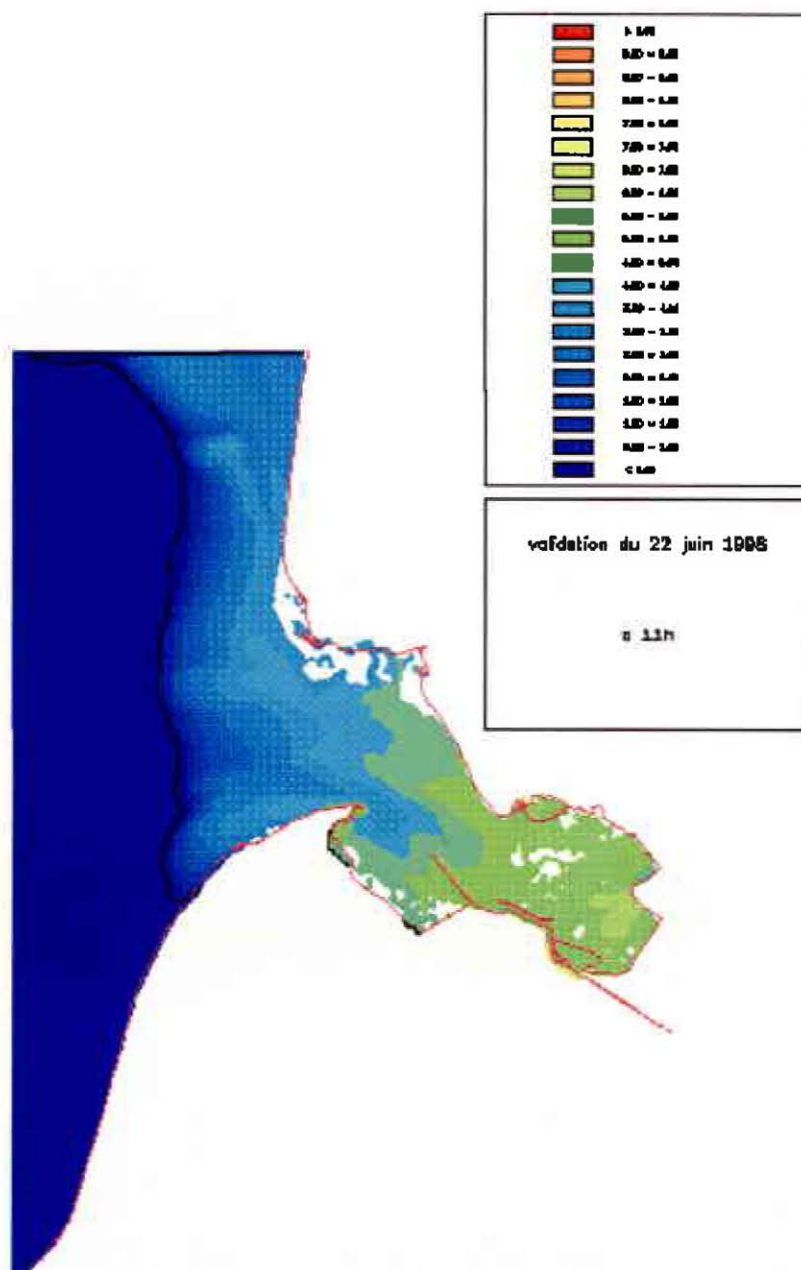


Figure 14 : validation du 22 juin 1998 à 11 heures

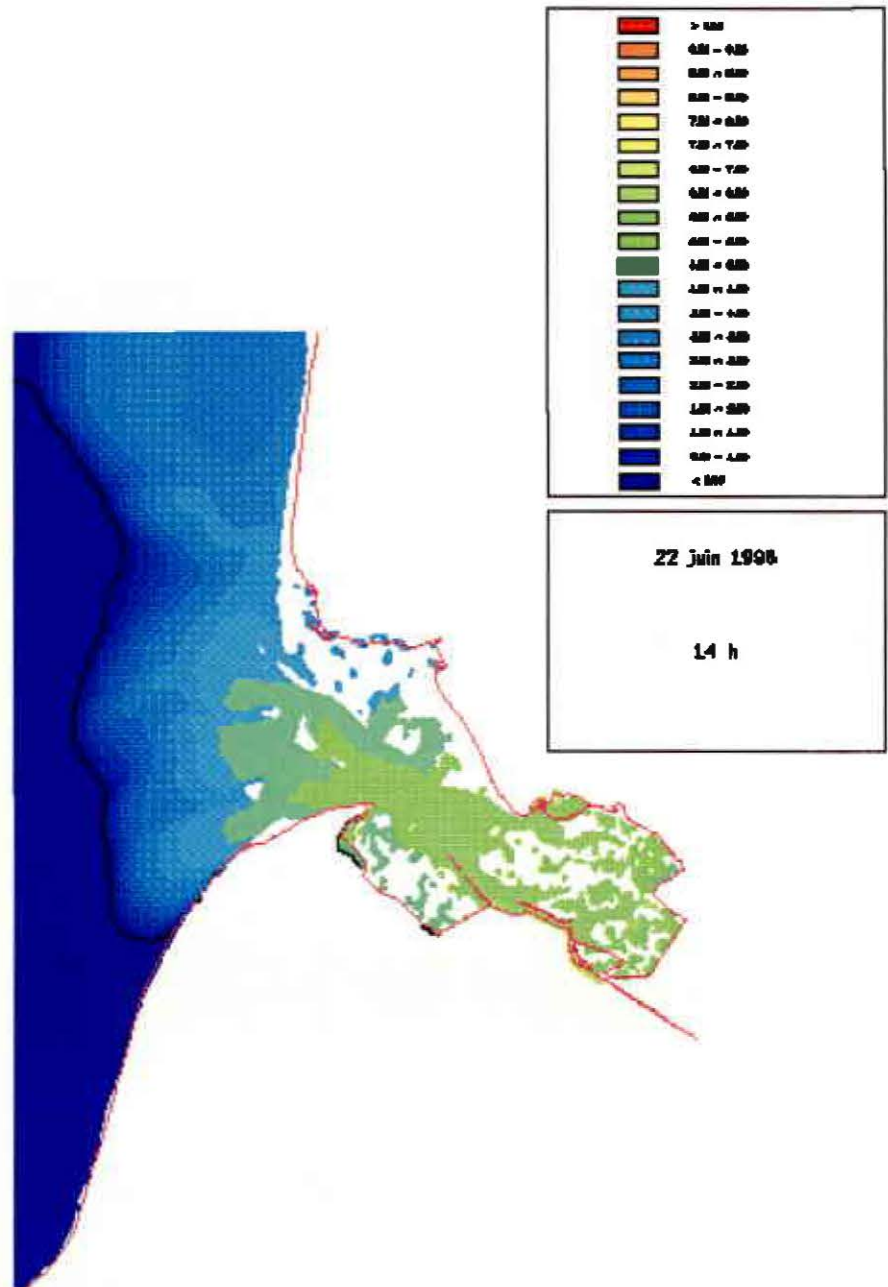


Figure 15 : validation du 22 juin 1998 à 14 heures

Le bateau a fait trois stations en se rendant au large de la baie. La contamination de la rivière Somme étant faible, il est normal de trouver une valeur faible à la sortie de la baie (station S7-S8).

La station "le Hourdel" est sous l'influence du rejet du "Courant à Poissons" assez fortement contaminé. Ceci explique la contamination de l'échantillon analysé.

Le Crotoy est sous l'influence du "canal de la Maye" ce qui explique la contamination de l'échantillon d'eau.

Pour ces deux stations, le modèle minimise les résultats (0,7 log pour le Hourdel et 1,4 log pour le Crotoy).

Les quatre derniers prélèvements ont été effectués au cours du trajet de retour à Saint Valéry. Trois des résultats d'analyses peuvent être considérés comme identiques compte tenu de l'intervalle de confiance de ceux-ci. En revanche le modèle fait apparaître un gradient de concentration lié à la distance séparant la station de prélèvement au rejet.

Les deux prélèvements effectués à la *station d'étude*⁶ montre une contamination élevée sans que puisse être donnée une explication évidente. Bien sûr, le modèle ne fait pas apparaître de pic de concentration étant donné que nous n'avons pas introduit de données à cet endroit dans le fichier décrivant les rejets.

Les figures 14 et 15 montrent l'évolution des panaches des rejets à 11 heures et à 14 heures le 22 juin 1998.

⁶ voir l'emplacement figure 13

2.3.3. Campagne du 8 octobre 1998

Les conditions et les résultats de la campagne sont présentés dans les tableaux 7 et 8.

Date	Matin			Après-midi		
	Coef.	PM	BM	Coef.	PM	BM
08/10/98	116	2h10	9h30	114	14h29	21h50

Tableau 7 : les marées à Fort Mahon le 8 octobre 1998

		coliformes fécaux		
		microplaques		modèle
		brut	log	log
Le Hourdel 16h10	Eaux	234	6,4	6,3
Bif 16h20	Eaux	1 034	7,0	6,6
Ouest digue cap Hornu 16h30	Eaux	453	6,7	6,8
Ouest quai J. d'Arc 16h45	Eaux	2 851	7,5	7,2
Station d'étude 16h50	Eaux	4 277	7,6	7,3
Digue est 16h55	Eaux	5 712	7,8	7,6
Grenier à sel 17h00	Eaux	> 34 659	>8,5	8,2
Ecluses 17h05	Eaux	> 34 659	>8,5	8,6

Tableau 8 : Résultats de la validation du 8 octobre 1998

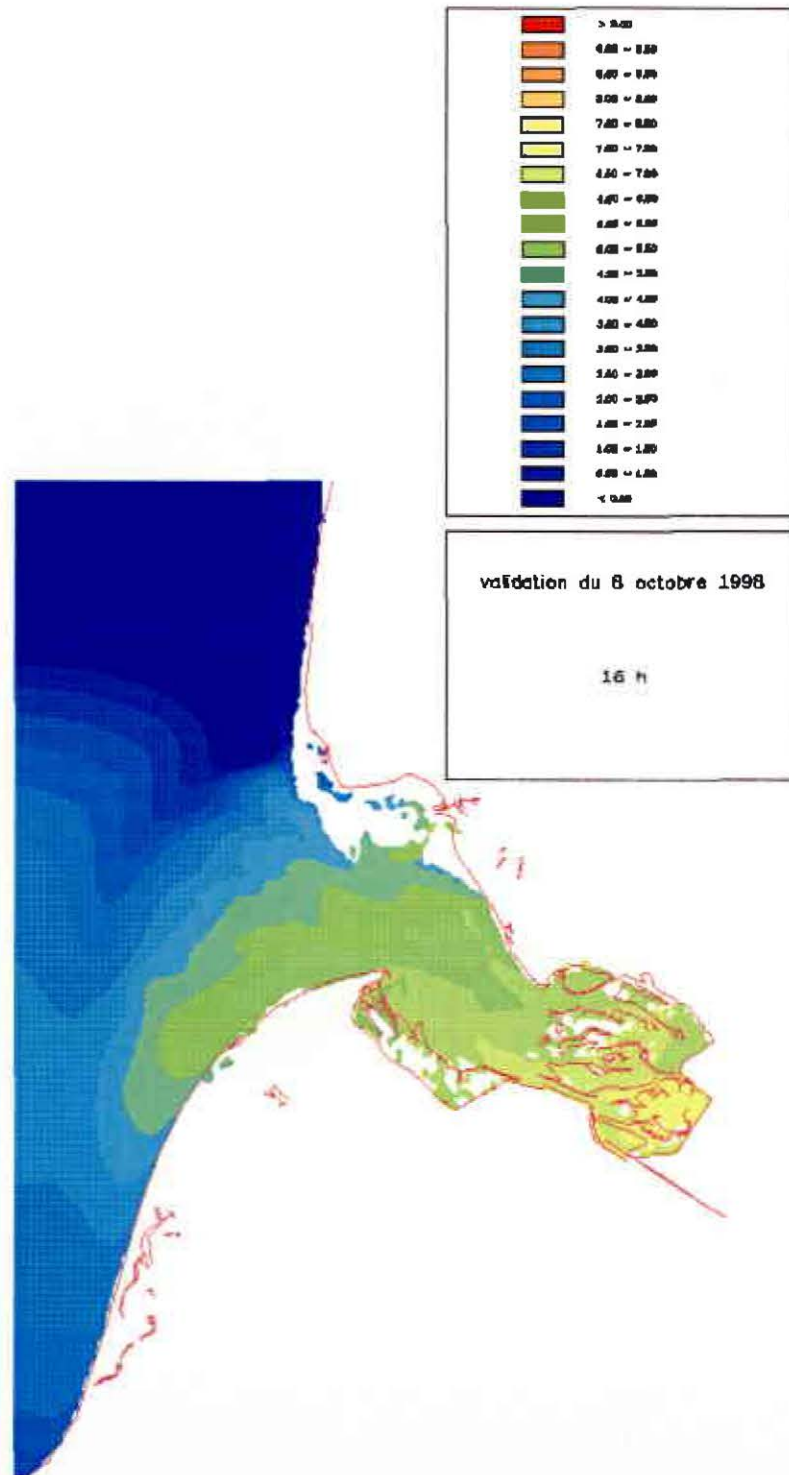


Figure 16 : validation du 8 octobre 1998 à 16 heures

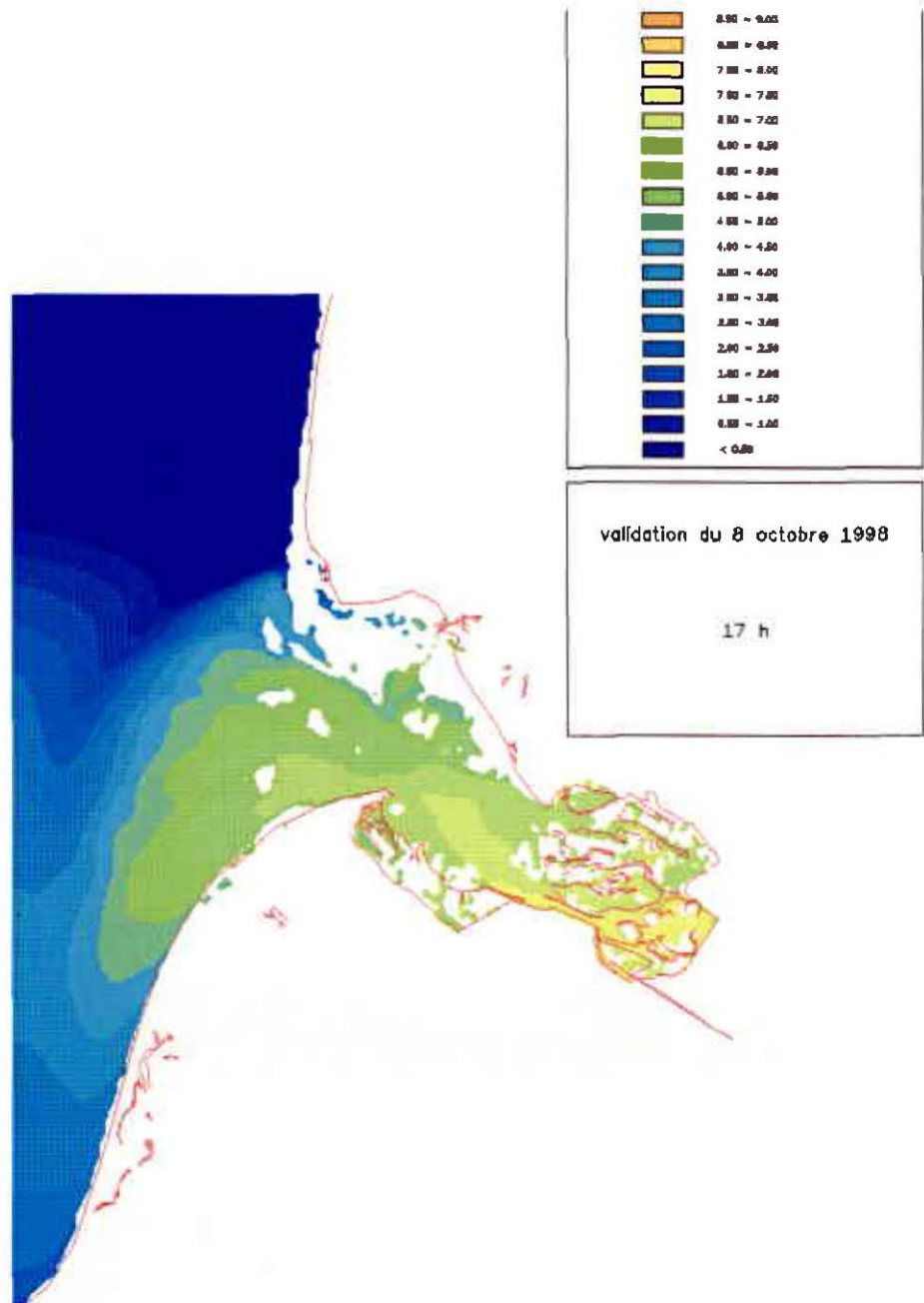


Figure 17 validation du 8 octobre 1998 à 17 heures

La seconde sortie de validation était initialement prévue le lundi 7 octobre. Mais de mauvaises conditions météorologiques n'ont pas permis de mettre le bateau à l'eau. L'équipe chargée de mesurer le débit et de prélever les échantillons d'eau des rivières est sortie quand même ce jour-là. La seconde équipe a pu faire la sortie en bateau le lendemain, mardi 8 octobre, et a prélevé à des stations échelonnées entre le Hourdel et les écluses de Saint Valéry sur Somme. Les prélèvements ont été effectués trois heures après la pleine mer c'est à dire au milieu de la période de jusant.

Le "Courant à Poissons" dont le panache passe au Hourdel est moyennement contaminé. Le résultat des analyses est inférieur à la valeur introduite dans la simulation, mais compte tenu de l'intervalle de confiance des analyses, les résultats sont comparables.

La station BIF, point de convergence des eaux en provenance du Crotoy et de Saint Valéry sur Somme, est assez contaminée au regard des analyses. Le modèle ne le montre pas particulièrement ; le flux bactérien en provenance du canal de la Maye, 13 fois moins contaminé que la rivière Somme, est pratiquement nul en arrivant au point BIF.

Le flux de contaminant rejeté par la rivière Somme est élevé ; il dépasse la valeur maximale détectée en laboratoire.

Toutefois l'écart entre les analyses et les valeurs calculées par le modèle ne dépasse jamais 0,8 log ; ce qui est tout à fait satisfaisant compte tenu des conditions dans lesquelles se sont déroulées la sortie et de l'intervalle de confiance des analyses.

Les figures 16 et 17 montrent l'évolution des panaches des rejets à 16 heures et 17 heures le 8 octobre 1998.

2.4. Conclusion sur les campagnes de validation

Les quatre exercices de validation qui ont été réalisés sur les deux sites du Boulonnais et de la Baie de Somme montrent un accord généralement bon entre les valeurs calculées par le modèle et le résultat des analyses.

Les écarts que nous constatons parfois sont tout à fait admissibles compte tenu que :

1. Les bactéries ne sont pas réparties uniformément dans la masse d'eau ;

2. Les dénombrements bactériens sont effectués selon la méthode du Nombre le Plus Probable (NPP) ; les résultats sont donnés avec un intervalle de confiance pouvant atteindre 1,7 log pour de faibles concentrations.

Le modèle fait bien apparaître la décroissance de la contamination bactérienne en relation avec la distance qui sépare le point de mesure et le rejet. Les figures 9 à 17 l'illustrent bien.

Les résultats du modèle sont plus cohérents que les résultats d'analyses

Deux campagnes ont été faites avec des rejets peu contaminés. Le panache a disparu rapidement. Le modèle a bien fonctionné confirmant les résultats d'analyses bactériologiques, mais il est préférable de travailler avec des contaminations élevées afin que le panache soit plus étendu pour la mesure seulement.

Le modèle ne tient compte que des sources de contaminants qui lui ont été indiqués dans le fichier d'inventaire des rejets. Il permet de mettre en évidence qu'une différence de concentration importante entre le calcul et l'analyse peut provenir d'une source de pollution non répertoriée ou être causée par le déplacement des masses d'eau du à la marée ou au vent. Le modèle est en deux dimensions et considère que la tranche d'eau verticale est homogène ; ce qui n'est pas tout à fait le cas en Baie de Somme où les masses d'eau de la rivière Somme flotte au dessus de l'eau marine pendant un certain temps avant que le mélange se fasse. Ceci ne peut cependant pas expliquer la différence de concentration constatée le 22 juin 1998 au niveau de la "*Station d'étude*" puisque le front halin se déplace au cours du cycle de marée.

3. Les flux de contaminants microbiens

Une fois les modèles validés, il était nécessaire de mieux connaître les flux bactériens apportés à la mer. Nous avons procédé par une étude en trois étapes :

- Les flux bactériens potentiels ;
- Les données bibliographiques ;
- Les flux observés.

3.1. Les flux bactériens potentiels

3.1.1. Les flux potentiels

Nous avons réalisé une première estimation des flux bactériens potentiels.

Pour cela, nous nous sommes basés sur la méthode de l'équivalent \bar{n} habitant qui nécessite un recensement des populations humaine et animale. L'équivalent \bar{n} habitant (E.H.) est une unité de pollution qui correspond à un rejet journalier de 10^{10} coliformes thermotolérants (CF) par personne et pour 100 litres d'eau, soit un flux de $1,157 \cdot 10^5$ CF/s par personne. Chaque espèce animale a également un rejet fécal journalier exprimé en E.H.

Les flux bactériens fécaux d'origine humaine et animale en E.H. sont présentés ci-dessous (données D.D.A.S.S.).

1 homme	↔	1 EH
1 bovin	↔	15 EH
1 équidé	↔	15 EH
1 veau	↔	3 EH
1 porcin	↔	3 EH
1 ovin	↔	1 EH
1 caprin	↔	1 EH
1 volaille	↔	0,18 EH
1 lapin	↔	0,18 EH

Il a été dressé, en premier lieu, une liste des communes appartenant au littoral.

Le calcul des flux est ensuite effectué par commune puis globalisé par «bassins versants littoraux».

Les calculs ont été réalisés d'après le recensement général de la population de 1990 (dernières données I.N.S.E.E. en notre possession) et d'après le recensement agricole de 1988 (données D.R.A.F. : tableaux PROSPER).

Le tableau ci-dessous présente, par bassin versant, l'évolution démographique de 1982 à 1990.

BASSIN VERSANT	Population 1982	Population 1990	
Le delta de l'Aa	166 333	172 986	+3,85%
Le Boulonnais	158 364	158 944	+0,36%
Le territoire Canche-Authie	93 438	96 089	+2,76%
L'estuaire de la Somme	85 887	85 028	-1,01%

Tableau 9 : Evolution démographique (1982-1990).

Si le delta de l'Aa et le territoire Canche-Authie ont subi une forte croissance démographique de 1982 à 1990, le Boulonnais est demeuré à population constante et l'estuaire de la Somme s'est quelque peu désertifié. Ces phénomènes sont probablement dus à une activité industrielle fort diminuée dans le Boulonnais et quasi - inexistante dans l'estuaire de la Somme, ce qui entraîne l'émigration des actifs potentiels.

Dans ces bassins, hormis l'estuaire de la Somme, la population n'est pas très dispersée mais plutôt concentrée sur la côte, l'intérieur des terres étant à dominante rurale. A titre indicatif, les communes littorales regroupent 64,9 % de la population totale dans le delta de l'Aa, 46,7 % dans le Boulonnais, 46,5 % dans le territoire Canche-Authie et 15,5 % dans l'estuaire de la Somme.

La zone littorale est assez bien équipée en stations d'épuration (projet d'une deuxième station d'épuration à Boulogne) alors que l'assainissement individuel est la principale formule d'épuration dans l'arrière littoral.

Sur le tableau suivant est reporté l'activité agricole par bassin versant.

BASSIN VERSANT	Superficie (ha)	SAU (ha)	STH (ha)	Cheptel					
				Bovins	Equidés	Ovins	Caprins	Porcins	Volailles
Le delta de l'Aa	65 478	64 310	9 691	36 406	542	5 287	168	62 713	444 967
Le Boulonnais	42 734	41 672	17 873	57 500	814	3 980	177	35 596	212 263
Le territoire Canche-Authie	73 183	59 931	18 630	69 506	929	8 374	272	46 200	225 693
L'estuaire de la Somme	83 354	81 143	19 791	79 090	919	11 665	133	16 467	85 747
			% SAU	/100 ha SAU	/100 ha SAU	/100 ha SAU	/100 ha SAU	/100 ha SAU	/100 ha SAU
Le delta de l'Aa			15%	57	1	8	0	98	692
Le Boulonnais			43%	138	2	10	0	85	509
Le territoire Canche-Authie			31%	116	2	14	0	77	377
L'estuaire de la Somme			24%	97	1	14	0	20	106

SAU : Surface Agricole Utilisée
STH : Surface Toujours en Herbe

Tableau 10 : activité agricole (1988)

La pollution au niveau des industries agroalimentaires se détermine en DBO₅ (Demande Biologique en Oxygène au bout de 5 jours) : elle désigne la quantité d'oxygène nécessaire, à 20°C, pour oxyder les matières organiques fermentescibles sous l'action des bactéries aérobies et se mesure au bout de 5 jours. Une DBO de 50 grammes d'oxygène par jour correspond à 1 EH.

Des informations datant de 1994 nous ont été fournies par la D.R.I.R.E. Nord-Pas de Calais et l'Agence de l'Eau Artois Picardie.

On peut noter la présence sur le littoral des industries de transformation des produits de la mer à Boulogne.

3.1.2. Les données bibliographique des flux bactériens mesurés.

Afin de placer notre travail dans un contexte plus général, un bilan bibliographique des flux bactériens mesurés au cours des années précédentes a été effectué. Celui-ci ne permet pas une évaluation exhaustive des flux mais fournit des indications sur la nature du terrain d'étude.

Les données proviennent, pour le Nord-Pas de Calais, du S.M.B.C et de l'IFREMER et, pour la Somme, de la D.D.A.S.S. et de la D.D.E.

Les mesures ont été effectuées au niveau des communes du littoral c'est-à-dire à l'aval des bassins versants.

Les analyses microbiologiques ont porté sur le dénombrement des coliformes fécaux *Escherichia coli* par la technique des microplaques et pour 100 ml d'eau usée ou issue d'écoulements naturels. Ces bactéries communes du système digestif humain sont recherchées comme germes-tests indicateurs de la contamination fécale du milieu. Si celle-ci est importante, il y a un risque de présence d'autres germes fécaux comme les salmonelles, la plupart pathogènes pour l'homme, et de virus dont celui de l'hépatite A. C'est pourquoi, en cas d'abondance des *Esch. coli*, les salmonelles sont recherchées.

Les débits des eaux ont été moyennés et calculés en m³/h; les flux en *Esch coli* ont ensuite été calculés pour 24 heures.

Au niveau du littoral Nord-Pas de Calais, on peut retenir que le flux moyen le plus important est issu du canal d'Asfeld à Calais avec $2,54 \cdot 10^{14}$ *Esch coli* /24h puis du canal exutoire des Wateringues à Dunkerque avec $1,48 \cdot 10^{14}$ *Esch coli* /24h.

D'une manière générale, les secteurs de Dunkerque, de Calais et du Boulonnais nord sont les plus contaminés alors que les secteurs de la baie

de Wissant et du Boulonnais sud sont faiblement contaminés; les secteurs de Gravelines et de Canche-Authie sont moyennement contaminés.

Au niveau de la Baie de Somme, la pollution bactérienne émane essentiellement du cours d'eau principal, la Somme, avec $3,95.10^{13}$ *Esc coli* /24h.

Cependant, la baie ne souffre pas d'une forte contamination avec un flux moyen autour de 10^{11} *Esch coli* /24h pour les autres canaux.

3.1.3. Comparaison des flux potentiels calculés et mesurés.

Le tableau suivant permet de comparer les flux obtenus par le calcul (recensement des populations humaine et animale) avec les flux obtenus par les mesures de divers organismes (synthèse du bilan bibliographique).

BASSIN VERSANT	Flux potentiels calculés		Flux mesurés CF/24h
	EH	CF/24h	
Le delta de l'Aa	1 001 994	1,00E+17	3,08E+14
Le Boulonnais	1 192 118	1,19E+17	1,49E+14
Le territoire Canche - Authie	1 340 805	1,34E+17	4,45E+13
L'estuaire de la Somme	1 369 476	1,37E+17	4,20E+13

Tableau 11 : bilan des flux potentiels calculés et des flux mesurés.

Les flux mesurés sont très différents des flux potentiels calculés et ceci pour plusieurs raisons :

- les flux calculés ne prennent pas en compte le caractère non conservatif de la pollution bactérienne donc négligent les phénomènes biologiques et physiques comme la mortalité, la sédimentation, la dilution ainsi que le traitement en station d'épuration ;
- la date des recensements n'est pas toujours récente : 1990 pour la population humaine et 1988 pour la population animale agricole ;
- le calcul ne prend pas en compte le déplacement des populations, en particulier l'été (camping et tourisme côtier) ;

Les flux calculés sont donc 1 000 fois voire 10 000 fois supérieurs aux flux mesurés et peuvent être ainsi considérés comme des maxima rarement atteints sauf en cas de fortes précipitations ou de crues d'orage où les phénomènes d'auto-épuration n'ont pas le temps d'entrer en jeu.

D'une manière générale, les flux ne sont pas faciles à estimer aussi bien par le calcul que par la mesure.

On observe néanmoins que l'estuaire de la Somme, dont les rejets sont à dominante agricole, possède le flux calculé maximum avec $1,37.10^{17}$ CF/24h et le flux mesuré minimum avec $4,20.10^{13}$ CF/24h. A contrario, le delta de l'Aa, dont les rejets sont principalement urbains, possède le flux calculé minimum avec $1,00.10^{17}$ CF/24h et le flux mesuré maximum avec $3,08.10^{14}$ CF/24h. La population du delta est concentrée sur le littoral alors que la population de la Somme est répartie à l'intérieur des terres donc cette observation confirme l'importance des phénomènes biologiques et physiques intervenant de l'amont à l'aval des bassins versants.

Ces flux nous donnent une première approche de la contamination bactérienne du littoral Nord-Pas de Calais-Picardie et permettront une comparaison avec les mesures réalisées pendant une année dans le cadre de cette étude.

3.2. Estimation des flux bactériens observés

3.2.1. Généralités

Ce sont les charges microbiennes véhiculées par les cours d'eau vers le milieu marin côtier.

On les estime :

- soit en flux contaminants instantanés (nombre de germes / seconde)
- soit en flux contaminants journaliers (nombre de germes / 24 heures - exprimés en logarithmes décimaux.)

L'évaluation du flux contaminant microbien journalier est le produit de la mesure de débit par le résultat de la numération bactériologique réalisée à la même date.

3.2.1.1. Les débits

Dans le cadre de cette étude, les mesures de débits ont été fournies par les services compétents, notamment sur les rivières et les fleuves pourvus de limnigraphes. Pour les cours d'eau échappant à tout suivi en raison de leur faible capacité hydraulique, l'estimation des débits est le résultat d'une méthodologie « approximative » développée par l'IFREMER, qui consiste à déterminer en chaque lieu de prélèvement, de manière systématique, la

vitesse du courant d'eau et la section mouillée. Les débits sont donc calculés en multipliant ces deux paramètres entre eux⁷.

$$\begin{array}{ccccc} \text{Débits} & = & \text{Vitesse} & \times & \text{Section mouillée} \\ \text{en } m^3/s & & \text{en } m/s & & \text{en } m^2 \end{array}$$

L'ensemble des prestations - mesures de débits et prélèvements d'eau - a été effectué dans une fenêtre temporelle précédant de 1 à 2 heures la marée basse.

3.2.1.2. La charge contaminante

On l'évalue à partir des analyses bactériologiques effectuées selon la fréquence de prélèvement préétablie, et considérant que la répartition des germes dans l'eau est homogène.

Pour cette étude, l'ensemble de la prestation analytique a été réalisée par le système de numération des Escherichia Coli par microplaques SANOFI-PASTEUR aux laboratoires D.E.L de Boulogne sur Mer et St Valery sur Somme.

3.2.1.3. Le flux contaminant

C'est le produit du débit observé par le résultat de la numération analytique effectuée lors du prélèvement.

Dans le présent rapport, les flux contaminants sont exprimés en flux journaliers⁸ :

$$\text{Flux contaminants journaliers} = \text{Log} \left[\frac{\text{Débits} \times \text{Esc}/100 \text{ ml} \times 10^4 \times 3600 \times 24}{m^3/s} \right]$$

⁷ Parfois, pour certains « petits » exutoires débouchant sur le littoral, la méthodologie utilisée fut celle du seau jaugé et du chronomètre (Noirda, etc...).

⁸ ce qui induit une marge d'erreur supplémentaire, puisqu'à l'homogénéité supposée de la contamination fécale de la masse d'eau à l'instant t, se greffe « l'illusion » de sa cohérence durant 24 heures.

3.2.2. Les secteurs concernés

La modélisation des flux bactériens porte sur trois secteurs géographiques prédéterminés qui sont respectivement, du sud au nord :

- la Baie de Somme
- le Boulonnais
- le Calaisis.

Chaque secteur possède des caractéristiques géomorphologiques propres et se distingue, et par le nombre, et par l'importance des fleuves et des exutoires qui drainent la charge polluante vers les eaux littorales (cartographie des secteurs concernés par la modélisation. (carte secteurs Nord Pas de Calais - Picardie)

3.2.2.1. Le secteur de la Baie de Somme

D'une superficie de 85 km², la Baie de Somme est arrosée par quatre cours d'eau qui sont, par ordre décroissant d'importance :

- la Somme
- le Canal de la Maye
- la Maye
- le Canal à Poissons au Hourdel.

3.2.2.1..1 La Somme

3.2.2.1..1.1 *Présentation*

D'une longueur de 245 km, la Somme couvre un bassin versant d'environ 5560 km². C'est une rivière de nappe, à faible compétence, dont les variations d'amplitude entre crue et étiage sont relativement modérées et dont le débit moyen, pour les dix-huit dernières années, oscille autour de 32.7 m³/s. La charge microbienne de ses eaux, au niveau des écluses de sortie du Canal Maritime à St Valery sur Somme, résulte en partie des rejets d'Abbeville, agglomération de quelques 25000 habitants située à une quinzaine de km en amont.

La Somme est une voie navigable doublée en certaines parties de son cours par un canal. Les mesures de débits du fleuve sont effectuées à Epagne-Epagnette, localité proche d'Abbeville, et nous ont été aimablement communiquées par la DIREN SEMA Nord Pas de Calais.

3.2.2.1.1.2 Débit et concentration en germes contaminants

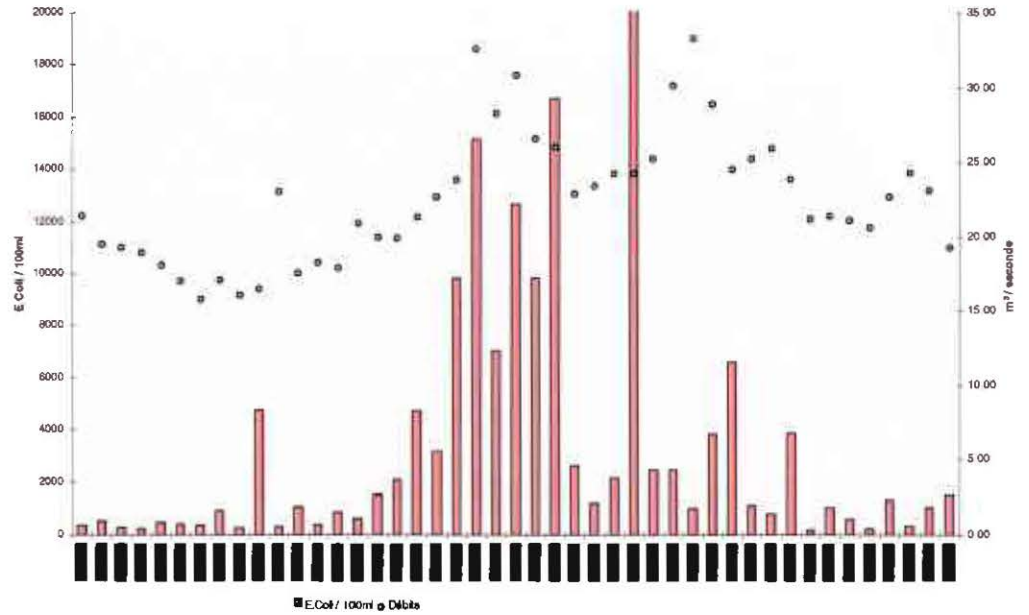


Figure 18 : Débits de la Somme à Epagne-Épagnette, et numérations analytiques réalisées du 19/6/96 au 22/06/98.

3.2.2.1.1.3 Flux contaminants

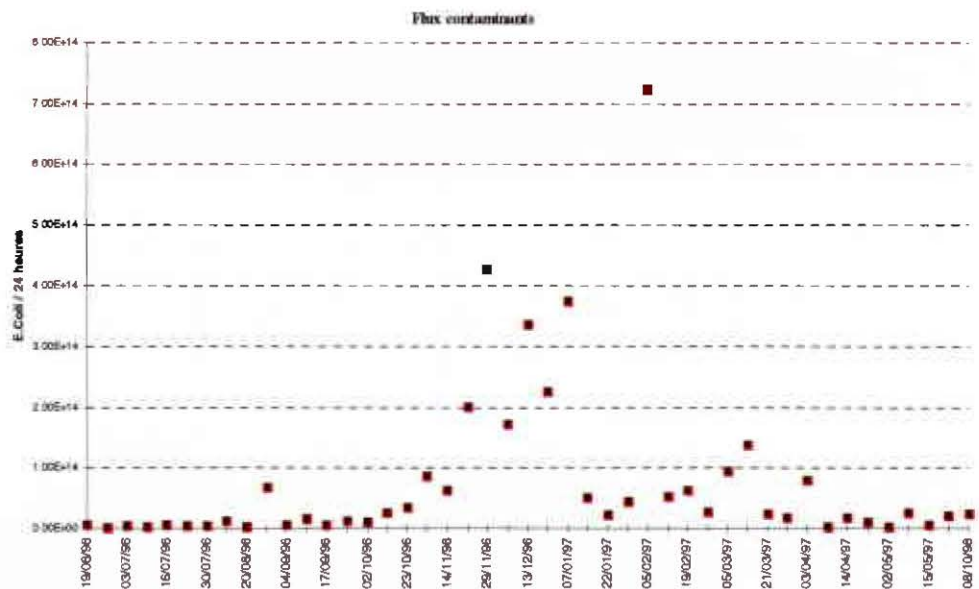


Figure 19 : Estimation des flux contaminants de la Somme par 24 heures.

3.2.2.1..2 Le Canal de la Maye

3.2.2.1..2.1 Présentation

Détournement artificiel de la Maye à l'amont de la ville de Rue, le Canal de la Maye, ou Canal d'Artois, grossi dans sa partie terminale des eaux de la Rivière des Iles, du Ruisseau du Hamelet et du Dien, recueille les effluents de la station d'épuration du Crotoy et débouche dans la Baie de Somme par le port de plaisance de cette dernière localité.

Il est pourvu d'une buse de sortie munie d'un clapet dont l'objectif est d'empêcher, au flot, la remontée du coin salé à l'intérieur des terres. Sa vidange, consécutive au jusant et à la marée basse, génère des courants d'eau dont les vitesses d'écoulement ne sont ni stables (pas de flux laminaire) ni constantes. Le calcul de la section mouillée est largement influencé par la hauteur d'eau qui peut varier : soit en fonction de l'heure d'intervention de l'opérateur, soit en fonction de la situation hydraulique du moment (crue ou étiage) - ces deux paramètres n'étant pas exclusifs l'un de l'autre -, il convient donc d'être prudent quant à la pertinence des mesures de débits obtenues.

3.2.2.1..2.2 Débits et concentrations en germes contaminants

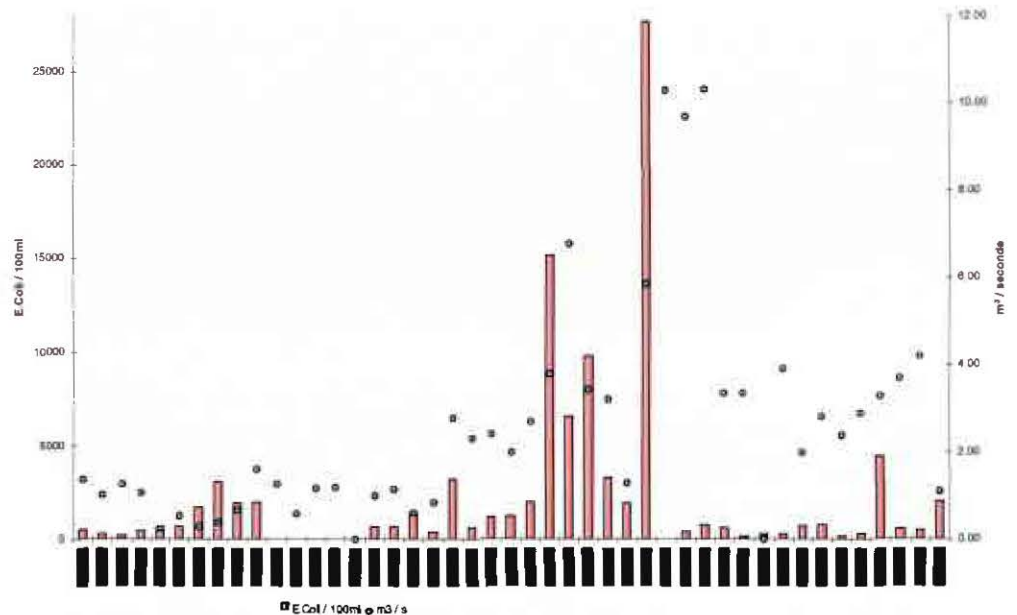


Figure 20 Débits du Canal de la Maye, et numérations analytiques réalisées du 19/6/96 au 8/10/98

3.2.2.1.2.3 Flux contaminants

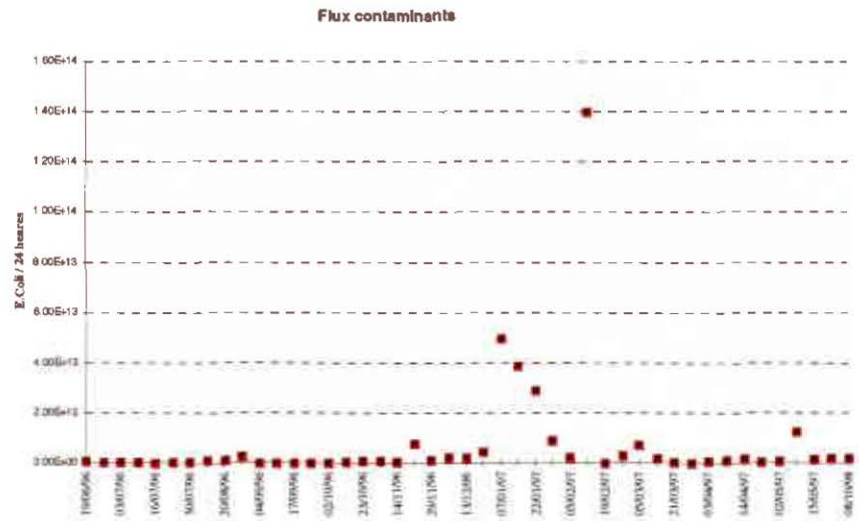


Figure 21 : Estimation des flux contaminants du Canal de la Maye par 24 heures

3.2.2.1.3 La Maye

3.2.2.1.3.1 Présentation

L'exutoire naturel de la Maye se situe au nord de la Baie de Somme, à proximité du Domaine du Marquenterre là, où jadis, s'ouvrait un estuaire aujourd'hui disparu derrière des « renclôtures » agricoles.

La station d'épuration de la ville de Rue rejette ses eaux résiduaires dans le lit historique de la Maye à quelques cinq kilomètres de son embouchure. Celle-ci est pourvue, comme pour le cours d'eau précédent, d'une buse de sortie équipée d'un clapet de fermeture. Les vitesses d'écoulement de l'eau sont faibles voire nulles en raison de la gestion des prairies humides qui bordent la rivière et sont affectées à l'élevage. Les données enregistrées doivent donc être utilisées avec la plus grande circonspection.

3.2.2.1..3.2 Débits et concentrations en germes contaminants

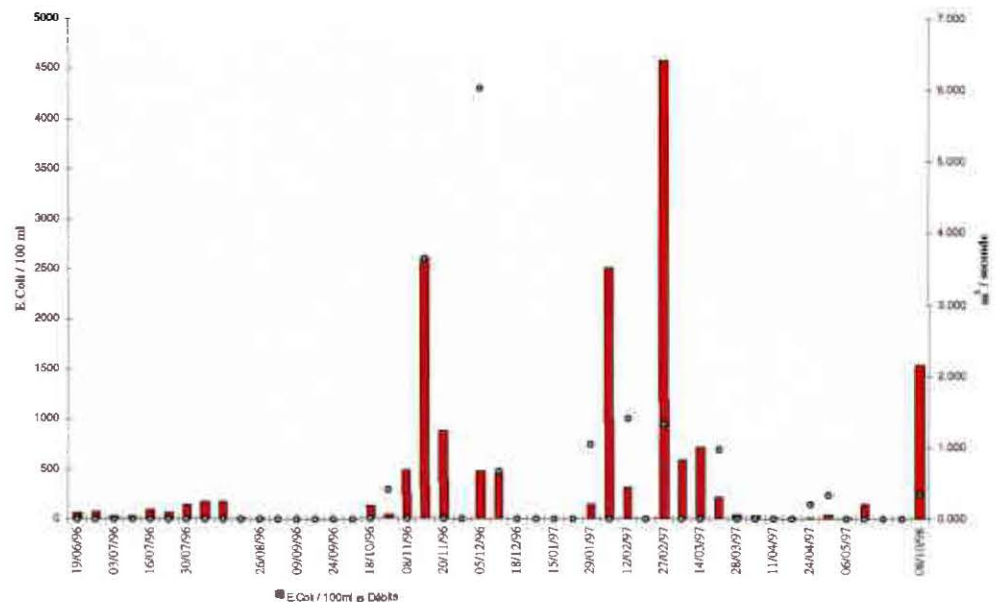


Figure 22 : Débits de la Maye, et numérations analytiques réalisées du 19/6/96 au 8/10/98.

* Pour l'ensemble de la période, on dénombre 25 mesures de débit nulles. 1 numération est non valide en raison d'un problème technique.

3.2.2.1..3.3 Flux contaminants

En raison du manque d'informations concernant les débits de la Maye - 25 débits nuls enregistrés sur 52 - la construction d'un graphe sur les flux contaminants ne peut se justifier.

3.2.2.1..4 Le Courant à Poissons

3.2.2.1..4.1 Présentation

Au sud de la Baie de Somme, près du Hourdel, le Canal à Poissons rassemble les eaux du Canal de Cayeux et du Canal de Lanchères qui drainent l'ensemble des eaux du Hable d'Ault. Cette zone de Bas Champs, gagnée sur la mer au XVIII^{ème} siècle, recueille une partie des eaux de ruissellement du plateau du Vimeu. La station d'épuration de Cayeux sur Mer déverse ses eaux résiduaires à l'amont du canal, lequel transite vers la Baie de Somme par l'intermédiaire du port de pêche du Hourdel. Le Canal à Poissons est également équipé à son extrémité d'une buse de sortie et

d'une clapet permettant de l'obturer, soit pour limiter la remontée d'eau salée à l'intérieur des terres pendant les marées de vives-eaux, soit pour gérer le niveau des étiers qui irriguent les terres agricoles du Hable d'Ault pendant les périodes de sécheresse.

3.2.2.1.4.2 Débits et concentrations en germes contaminants

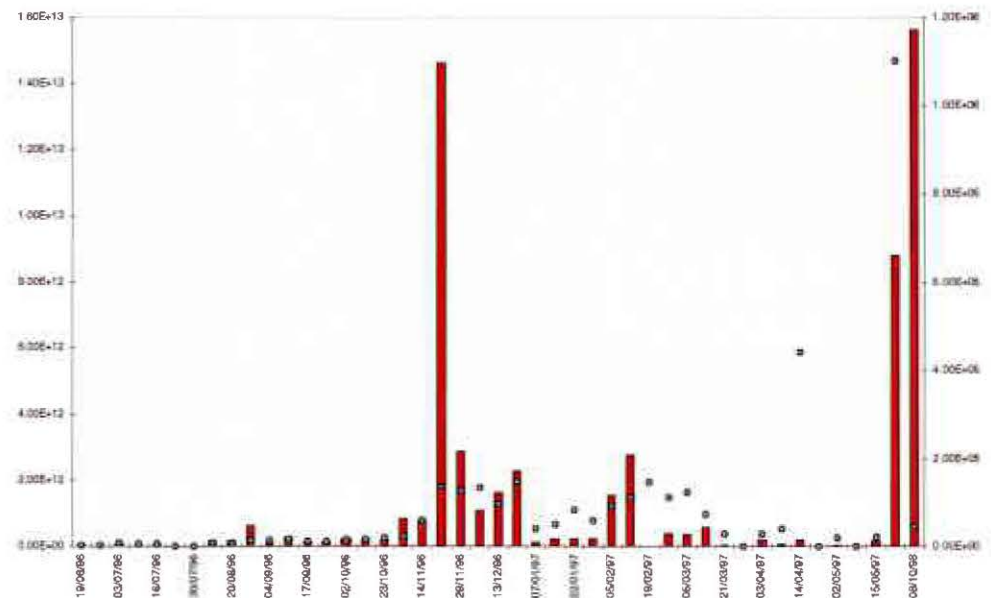


Figure 23 :Débits⁹ du Courant à Poissons, et numérations analytiques réalisées du 19/6/96 au 8/10/98.

⁹ On peut noter sur ce graphique deux mesures de débit aberrantes les 14/4/97 et 22/6/98, lesquelles semblent coïncider avec l'ouverture brutale du clapet de la buse de sortie du Courant à Poissons. On observe également une numération analytique dépassant la valeur maximale de détection pour les dilutions utilisées dans le cadre de cette étude.

3.2.2.1..4.3 Flux contaminants

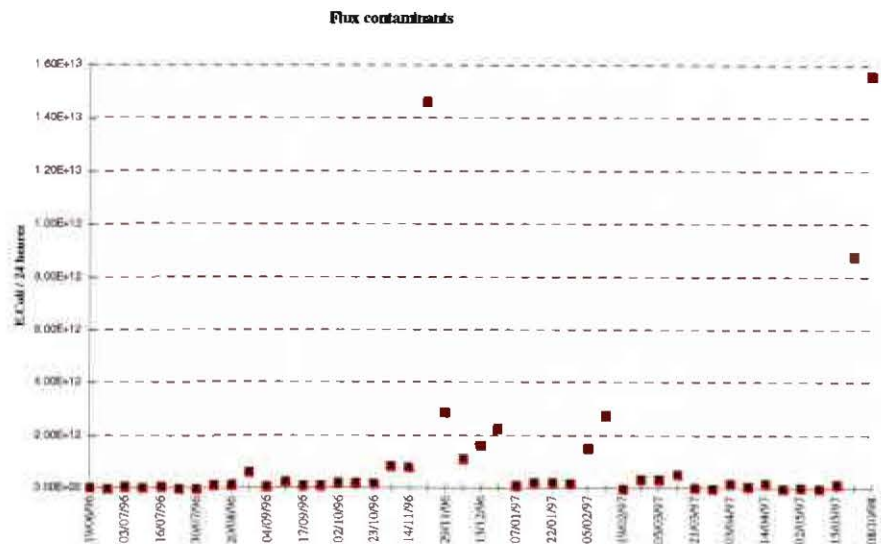


Figure 24 : Estimation des flux contaminants du Courant à Poissons par 24 heures

3.2.2.1..5 Bilan des mesures effectuées sur le terrain

A partir des éléments qui précèdent, il convient de relativiser la pertinence des mesures de débits obtenues par la méthodologie décrite précédemment et utilisée en Baie de Somme pour trois des quatre cours d'eau inclus dans ce secteur d'étude. Nous nous en contenterons cependant, n'ayant pas d'autre ressource que d'utiliser les données estimées.

Les mesures de débits de la Somme effectuées à Epagne-Epagnette, en amont d'Abbeville, ne semblent pas affectées par les variations dues à l'influence de la marée. Il reste que la Somme constitue, de par l'importance de son débit, le vecteur principal de contamination microbienne de la Baie de Somme et du littoral picard.

3.2.2.2. Le Secteur du Boulonnais

Le secteur du Boulonnais est une entité géographique incluant, au sud, l'embouchure de la Liane, et se prolongeant au nord jusqu'à l'estuaire du Noirda à Ambleteuse.

Le secteur côtier se caractérise par une falaise de craie bordée, en contrebas, d'un platier rocheux riche en gisements naturels de moules.

Ceux-ci sont exploités par des pêcheurs à pied professionnels et font l'objet durant la période estivale d'une intense pêche récréative.

Il existe également une activité mytilicole constituée de parcs à moules en culture à plat. L'estimation des productions, toutes activités confondues, est de l'ordre de 1 200 tonnes par an.

3.2.2.2.1 La Liane

3.2.2.2.1.1 Présentation

D'une longueur de 39 km, la Liane est un fleuve côtier qui draine un bassin versant de 244 km² et dont l'estuaire débouche dans le port de Boulogne sur Mer. La population de cette dernière localité est proche de soixante mille habitants. De nombreuses activités industrielles y sont implantées, dont notamment l'industrie de transformation des produits de la mer dans le quartier de Capécure.

Les mesures de débits du fleuve ont été effectuées sur la commune de Wirwignes à 5 km de l'estuaire, et dans le port même de Boulogne sur Mer.

3.2.2.2.1.2 Débits et concentrations en germes contaminants

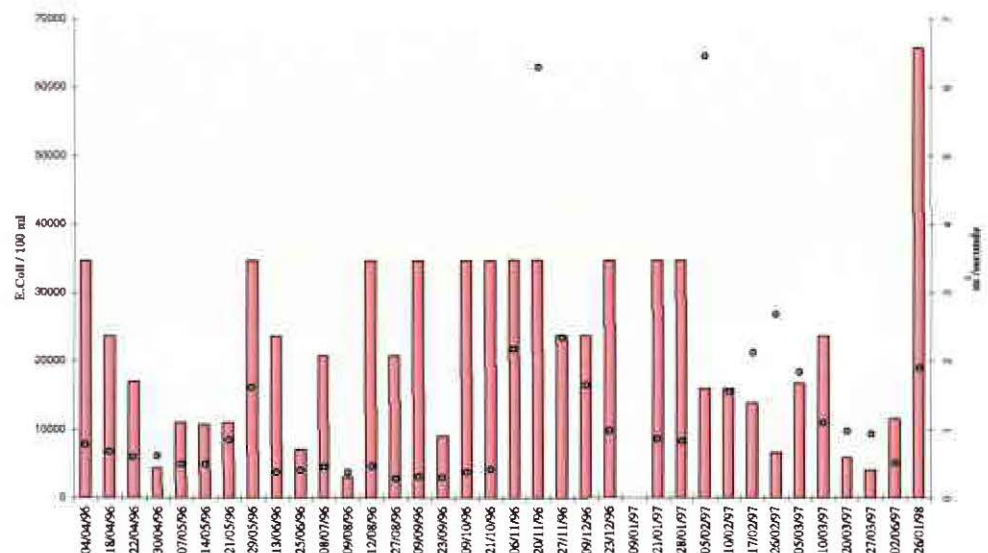


Figure 25 : Débits de la Liane, et numérations analytiques réalisées du 04/04/1996 au 26/01/1998

3.2.2.2.1.3 Flux contaminants

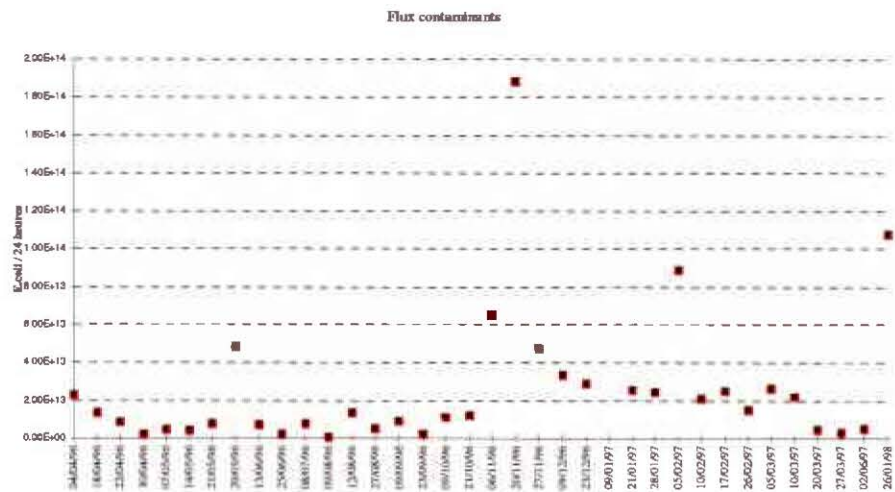


Figure 26 : Estimation des flux contaminants de la Liane par 24 heures.

3.2.2.2.2 Le Wimereux

3.2.2.2.2.1 Présentation

Le Wimereux prend sa source sur la commune de Colembert à quelques 21 km de la mer. Malgré son caractère rural, son bassin versant, d'une superficie de 77 km², a une densité de population proche de 207 habitants au km².

Du fait du peu d'importance de ce cours d'eau, les mesures de débits ont été réalisées par nos soins, durant tout le cycle de l'étude.

3.2.2.2.2 Débits et concentrations en germes contaminants

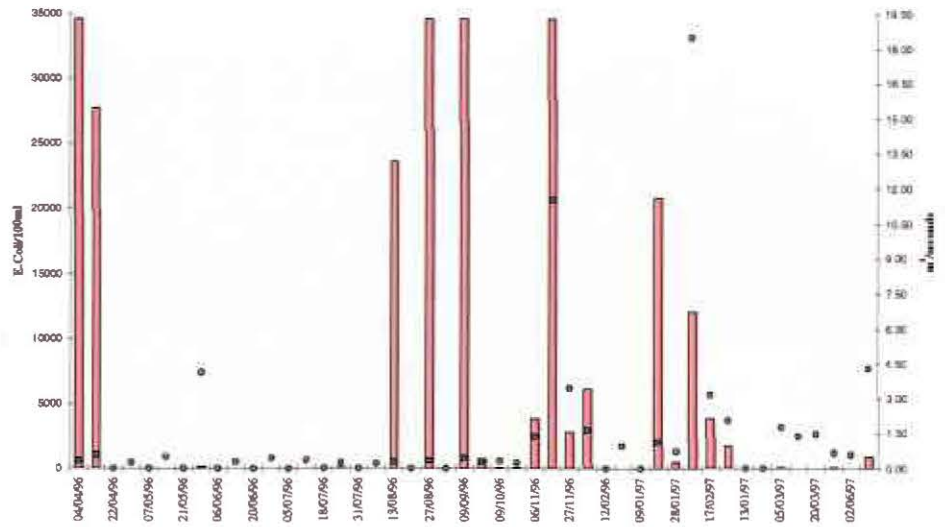


Figure 27 : Débits du Wimereux, et numérations analytiques réalisées du 04/04/1996 au 26/01/1998

3.2.2.2.3 Flux contaminants

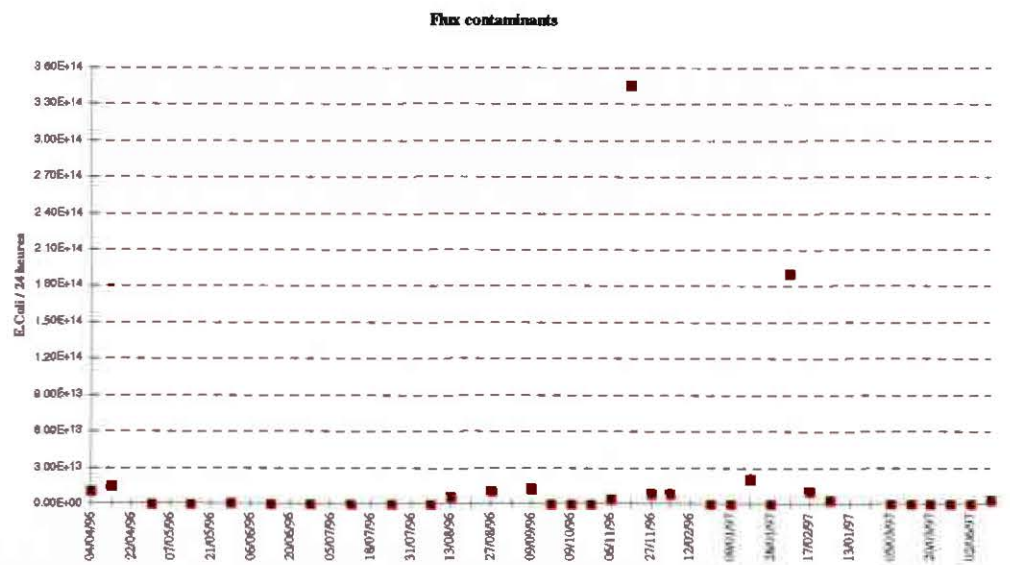


Figure 28 : Estimation des flux contaminants du Wimereux par 24 heures.

3.2.2.2.3 La Slack

3.2.2.2.3.1 Présentation

C'est un petit fleuve côtier dont l'importance en terme de débit est moindre encore que celle du Wimereux. Il prend sa source sur la commune d'Hardinghen à dix-neuf km environ de son embouchure. Son bassin versant couvre une superficie de 155 km². Comme précédemment les mesures de débits ont été réalisées selon la méthodologie décrite au § 3.2.

3.2.2.2.3.2 Débits et concentrations en germes contaminants

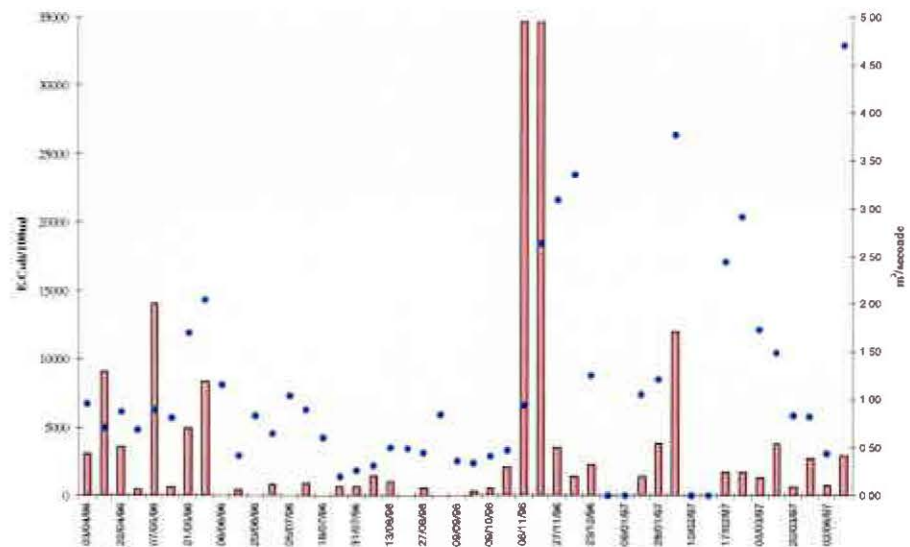


Figure 29 : Débits de la Slack et numérations analytiques réalisées du 04/04/1996 au 26/01/1998

3.2.2.2..3.3 Flux contaminants

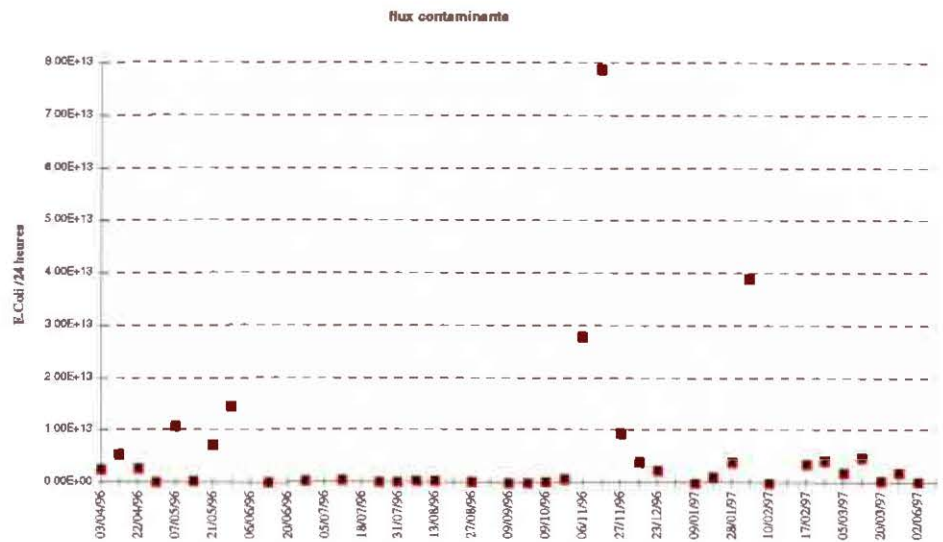


Figure 30 : Estimation des flux contaminants de la Slack par 24 heures

3.2.2.2..4 La Manchue

3.2.2.2..4.1 Présentation

La Manchue est un petit cours d'eau situé à proximité d'Audresselles. Les données concernant son bassin versant ne sont pas connues ; nous nous contenterons de l'évaluation des débits et des flux contaminants effectués par nos soins durant l'étude.

3.2.2.2.4.2 Débits et concentrations en germes contaminants

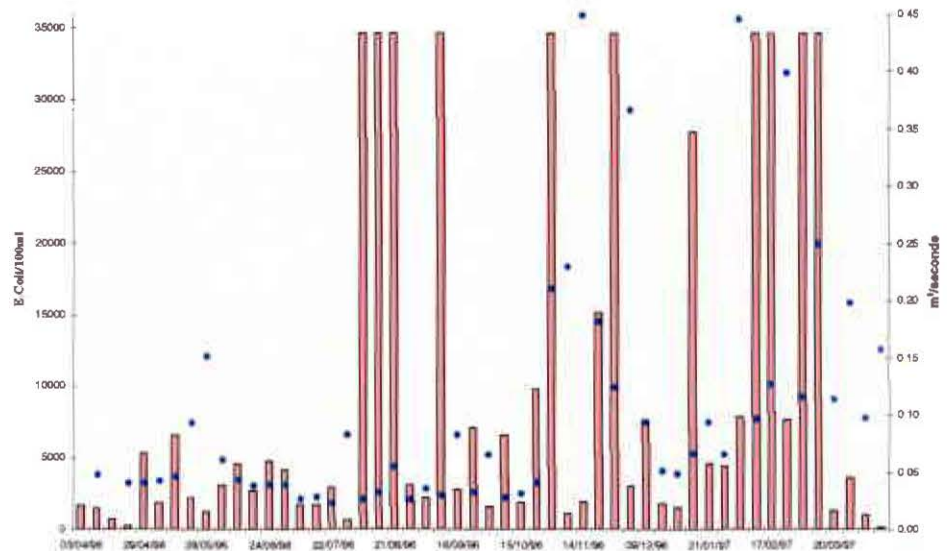


Figure 31 : Débits de La Manche, et numérations analytiques réalisées du 04/04/1996 au 26/01/1998

3.2.2.2.4.3 Flux contaminants

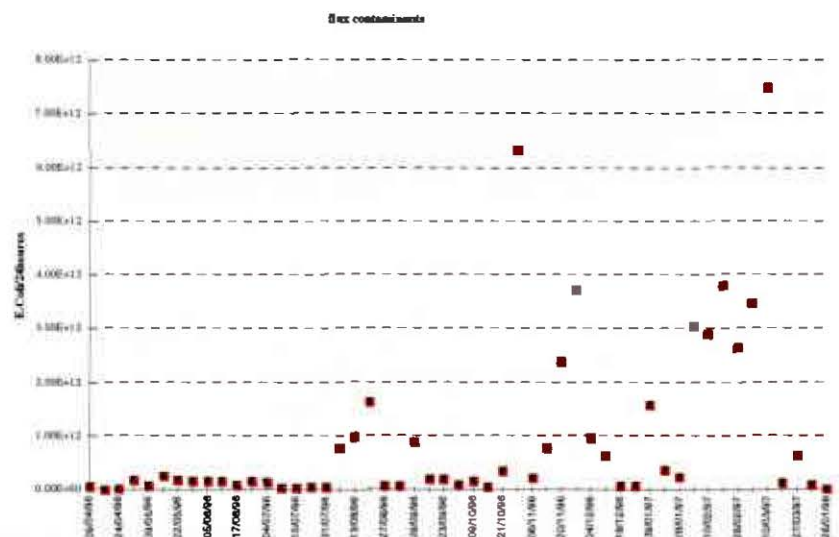


Figure 32 : Estimation des flux contaminants de La Manche par 24 heures.

3.2.2.2.5 Le Noirda

3.2.2.2.5.1 Présentation

C'est un cas particulier puisqu'il s'agit d'un exutoire d'origine indéterminée. Ainsi, en raison de ses très faibles rejets, avons-nous dû recourir à l'usage d'un seau jaugé et d'un chronomètre pour estimer ses débits.

3.2.2.2.5.2 Débits et concentrations en germes contaminants

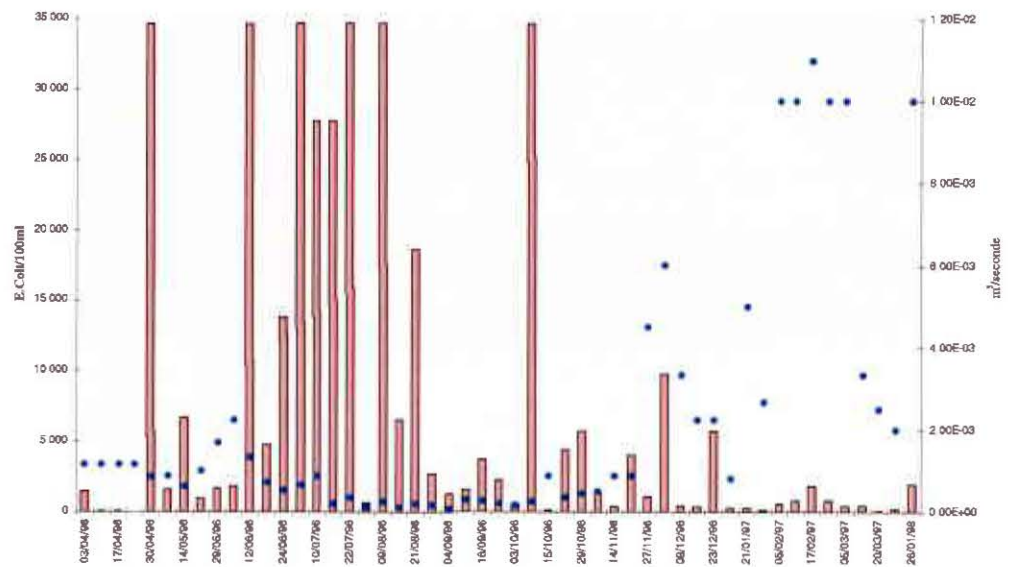


Figure 33 : Débits du Noirda, et numérations analytiques réalisées du 04/04/1996 au 26/01/1998

Deux localités importantes sont implantées sur le littoral et constituent des sources potentielles de contamination microbienne : Calais et Gravelines.

Hormis les zones industrielles et portuaires, l'ensemble du littoral du Calaisis semble affecté presque exclusivement au tourisme balnéaire.

Dans le cadre de cette étude, les prélèvements et les analyses ont été effectués selon une fréquence hebdomadaire. Les mesures de débits, fournies par le Service des Voies Navigables sont malheureusement peu représentatives des variations de la situation hydrologiques et de ses nombreux avatars : écoulement nul, éclusées brutales en période de sécheresse.

De l'ouest à l'est du secteur concerné, on dénombre 3 voies d'eau qui sont respectivement :

- Le Fréthun,
- Le Canal de Marck,
- L'Aa.

Les estimations des flux sont les suivantes :

3.2.2.3.1 Le Fréthun

Ne disposant que de dix mesures de débits – transmises par le Service Navigation du Nord et du Pas de Calais – l'estimation des flux contaminants du Canal de Fréthun s'appuie sur ces seules données lesquelles sont corrélées aux numérations analytiques réalisées du 23 juin 1997 au 25 juin 1998.

3.2.2.3.1.1 Débits et concentrations en germes contaminants

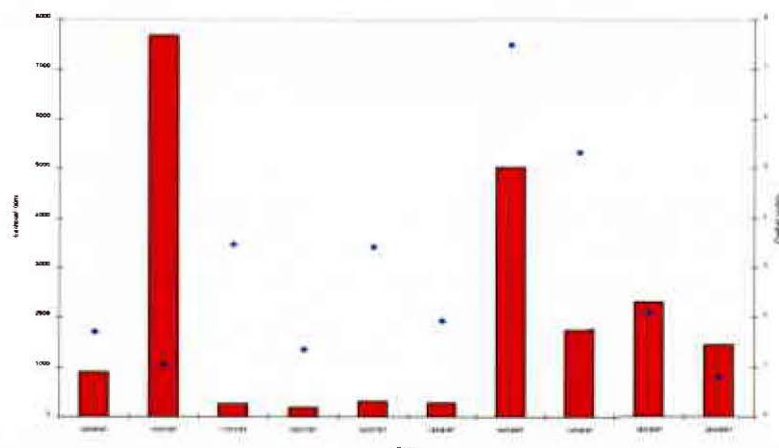


Figure 35 : Débits du Fréthun, et numérations analytiques réalisées du 23/06/97 au 25/06/98

3.2.2.3.1.2 Flux contaminants

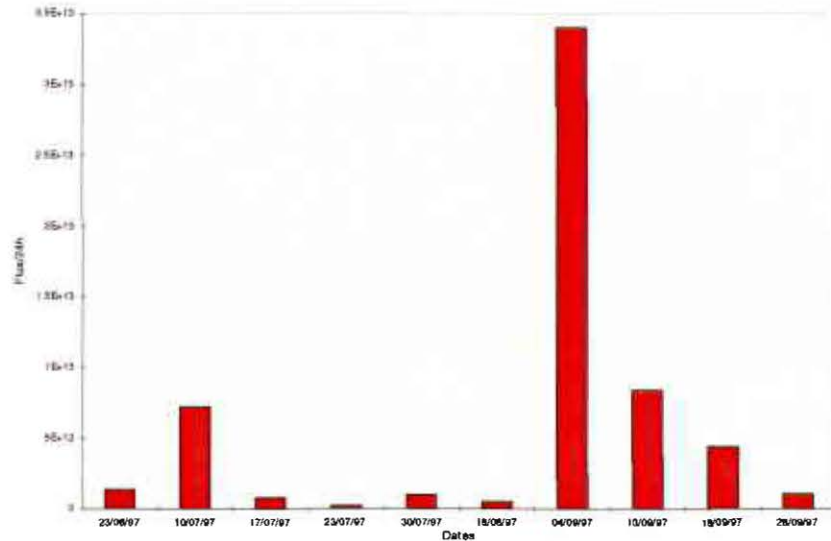


Figure 36 : Estimation des flux contaminants du Fréthun par 24/heures

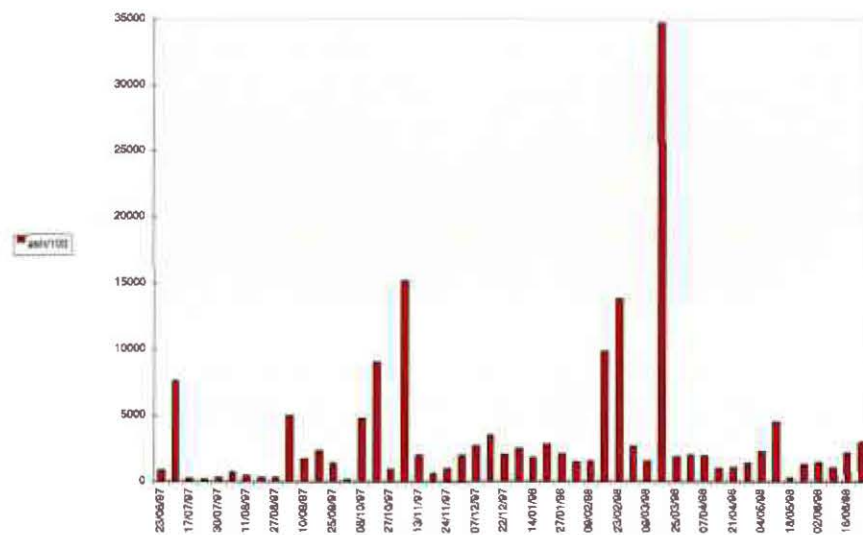


Figure 37 : Ensemble des dénombrements analytiques réalisés sur le Fréthun au cours de l'étude.

3.2.2.3.2 Le Canal de Marck

3.2.2.3.2.1 Débits et concentration en germes contaminants

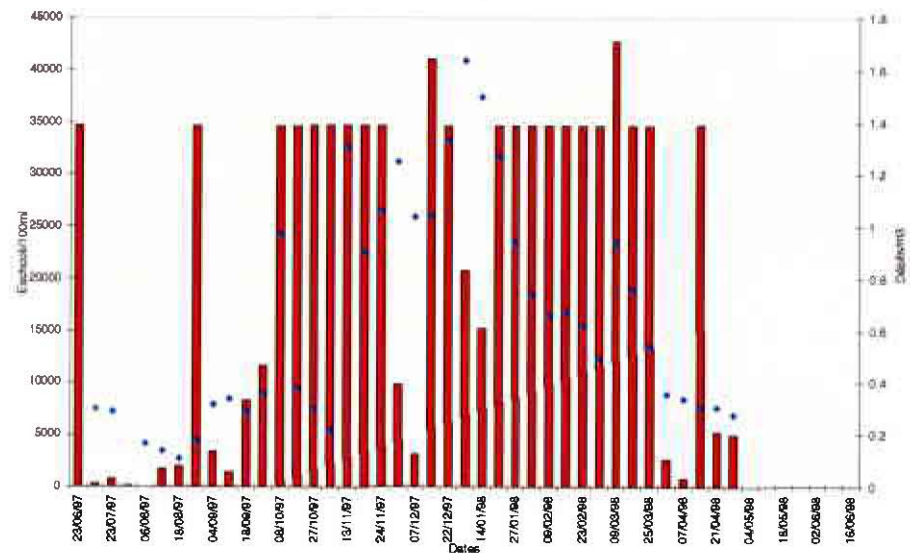


Figure 38 : Débit du Canal de Marck, et numérations analytiques réalisées du 23/06/97 au 25/06/98

3.2.2.3.2.2 Flux contaminants

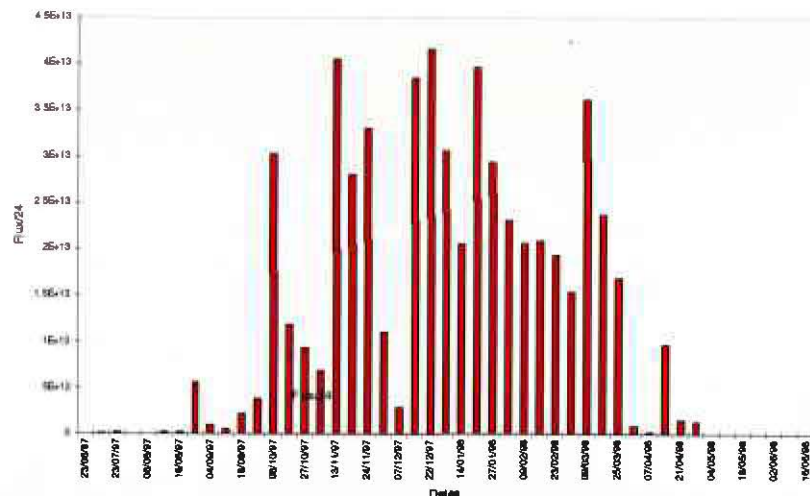


Figure 39 : Estimation des flux contaminants du Canal de Marck

3.2.2.3.3 l'Aa

3.2.2.3.3.1 Débits et concentrations en germes contaminants

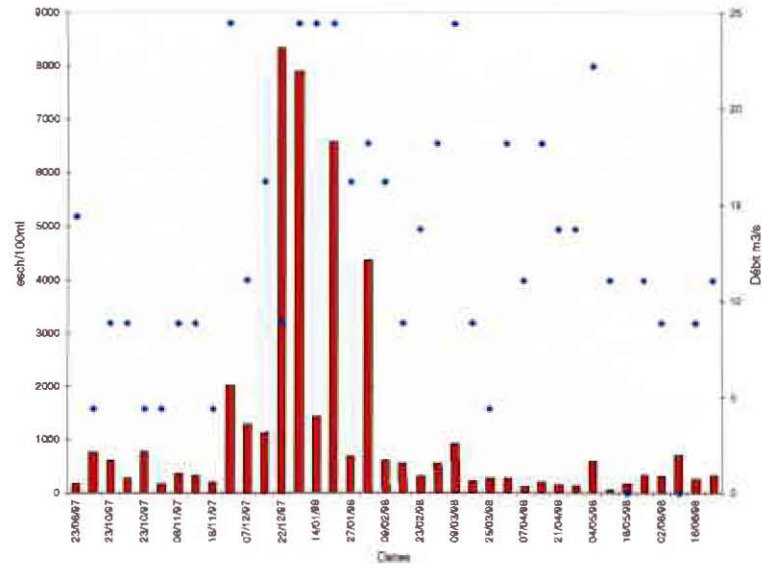


Figure 40 : Débits de l'Aa, et numérations analytiques réalisées du 23/06/97 au 25/06/98

3.2.2.3.3.2 Flux contaminants

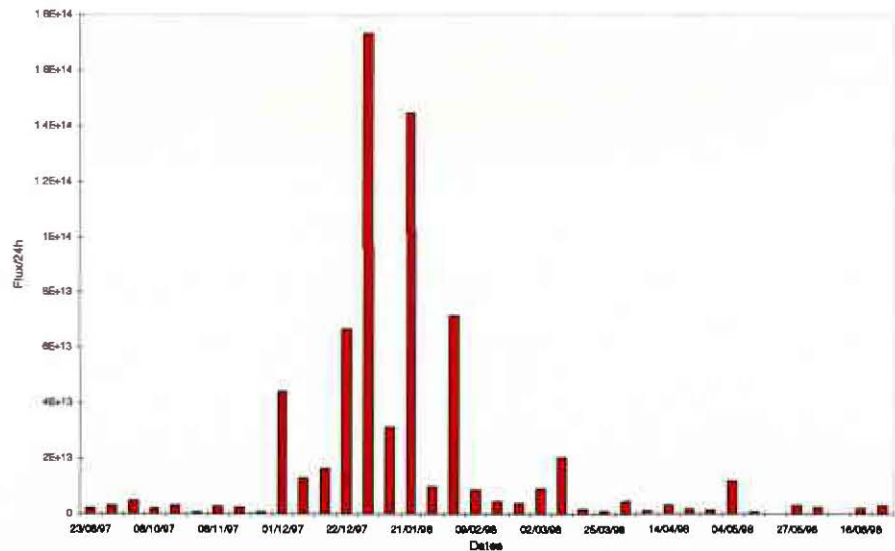


Figure 41 : Estimation des flux contaminants de l'Aa par 24 heures

3.2.3. Conclusion

Sur ce secteur et sur les 3 cours d'eau considérés, les mesures de débit dans la présente étude ont été fournies par le Service Navigation du Nord et du Pas de Calais ; Les débits du Canal de Fréthun ,de Marck et de l'Aa n'ont pu être mesurés en débit constant car ces canaux ont été éclusés. D'une manière générale les flux bactériens ne sont pas faciles à estimer aussi bien par le calcul que par la mesure car certains problèmes d'éclusement subsistent

4. La dispersion des principaux rejets

Le milieu naturel est très complexe. La modélisation est un outil qui permet d'en décrire le fonctionnement en le simplifiant de manière à essayer de le comprendre. Modéliser, c'est décrire au moyen d'équation le mouvement des masses d'eau (hauteurs, intensité et forces qui sont en jeu), mais aussi le transport et la dilution de matières dissoutes.

Quand un endroit est contaminé, il est souvent difficile de trouver l'origine de la pollution avec précision. Ceci est particulièrement vrai dans des zones sensibles où plusieurs sources de pollution sont répertoriés.

Le modèle permet d'étudier des situations qui ne sont pas conformes à la réalité. Par exemple, il est possible de travailler avec un coefficient de marée constant sur une longue période ou encore de paramétrer un vent de direction et d'intensité constante.

On nous pose souvent la question de connaître l'impact d'un rejet sur un gisement conchylicole ou encore d'expliquer pourquoi la plage d'une commune dont tous les rejets sur le littoral ont été supprimés n'est pas d'excellente qualité bactériologique.

4.1. Méthodologie

Le nombre de paramètres pris en compte dans une simulation est très important (marée, direction et intensité du vent, débit des rivières, flux de bactéries, T90...). Ceci nous oblige à ne faire varier qu'un paramètre à la fois.

- **Le coefficient de marée retenu est de 70 pendant toute la durée de la simulation.** Ce qui correspond à une marée moyenne.
- **Le débit des rivières doit lui aussi avoir une influence sur le mélange des deux masses d'eau de densité différentes. Nous avons choisi de faire couler toutes les rivières avec un débit constant pour toutes les simulations.**

- Le vent a en revanche une grande influence sur le panache de dilution du rejet. En effet il va le plaquer sur la côte ou encore le pousser dans la direction vers laquelle il souffle. Nous voulons voir l'influence des rejets sur le littoral. Un vent de mer va ramener le panache sur les plages et les gisements conchylicoles. Le vent varie de la façon suivante :

Heure	Vitesse (m s ⁻¹)	Direction
0:00	6,00	315
48:00	6,00	315
96:00	6,00	225

Nous avons choisi de faire venir de vent du Nord-ouest dans la première partie de la simulation ; puis de le faire passer progressivement au Sud-ouest dans un deuxième temps. Il restera dans cette direction jusqu'à la fin des simulations.

- Le T90 appliqué à l'ensemble des simulations est de 72 heures ; ce qui correspond au temps que mettent 90 % des bactéries à disparaître. C'est une situation hivernale.
- La durée des simulations qui est de 144 heures.

Il est intéressant de déterminer la zone impactée par chaque rejet. Le programme de modélisation permet de dire quelles sont les mailles du modèle qui ont été atteintes par le panache au moins une fois pendant la simulation et d'en donner l'intensité maximale. Le programme teste à chaque pas la concentration de chaque maille et enregistre celle-ci au cas où la valeur n'aurait pas encore été atteinte. A l'issue de la simulation, une matrice supplémentaire de concentration est créée. Il est possible ensuite de la représenter graphiquement.

Nous allons présenter les simulations de chaque rejet pour lesquelles les flux et les débits ont été étudiés par le laboratoire au cours de la période 1996 - 1998 et qui ont été présentés dans le chapitre 3 du rapport qui traite du flux des différentes rivières. Il est intéressant de voir le panache maximum des différents rejets. C'est pourquoi nous avons retenu les valeurs les plus élevées observées pendant la période de mesure.

LIEUX DE PRELEVEMENTS	Flux Max ¹⁰ Esch Coli/s	Débit Max (m3/s)
La Liane	2,18E+09	6,45
La Manchue	8,67E+07	0,45
La Pointe aux Oies	1,28E+05	0,00
La Slack	9,13E+08	4,70
Le Noirda	5,90E+05	0,01
Le Wimereux	4,00E+09	18,43
le Portel	3,87E+06	0,04
La Somme	8,39E+09	33,30
La Maye	9,51E+07	6,02
Le Canal de La Maye	1,62E+09	10,32
Le Courant à Poissons	1,81E+08	12,75

En ce qui concerne le site de Oye-Plage, nous avons fait tourner le modèle du secteur de Oye-Plage qui a une maille de 65 mètres de côté.

L'orientation de la côte étant différente de celle des deux autres sites, nous avons changé les conditions initiales :

- La durée des simulations est de 144 heures (soit 6 jours);
- Le coefficient de marée est celui du 16 décembre 1999 (passage d'un coefficient de 45 à un coefficient de 98 au cours des 6 jours simulés) ;
- Le vent est orienté nord-ouest (320) avec une vitesse de 6m/s pendant toute la durée de la simulation;

Les valeurs rejetées sont les suivantes¹¹ :

LIEUX DE PRELEVEMENTS	Flux Max Esch Coli/s	Débit Max (m3/s)
Les canaux de Calais	3,36E+09	3,50
L'Aa	2,06 ^E +08	10,00
Dunkerque ouest	1,20 ^E +07	0,00

¹⁰ Les flux sont indiqués en EC*s⁻¹. Habituellement on parle de flux journaliers

¹¹ Les valeurs sont extraites du rapport de Gabrielle Gennequin sur l'évaluation des flux de bactéries entériques sur les secteurs conchylicoles des Régions Nord – Pas de Calais – Picardie.

4.2. Les images de dispersion

4.2.1. La Liane

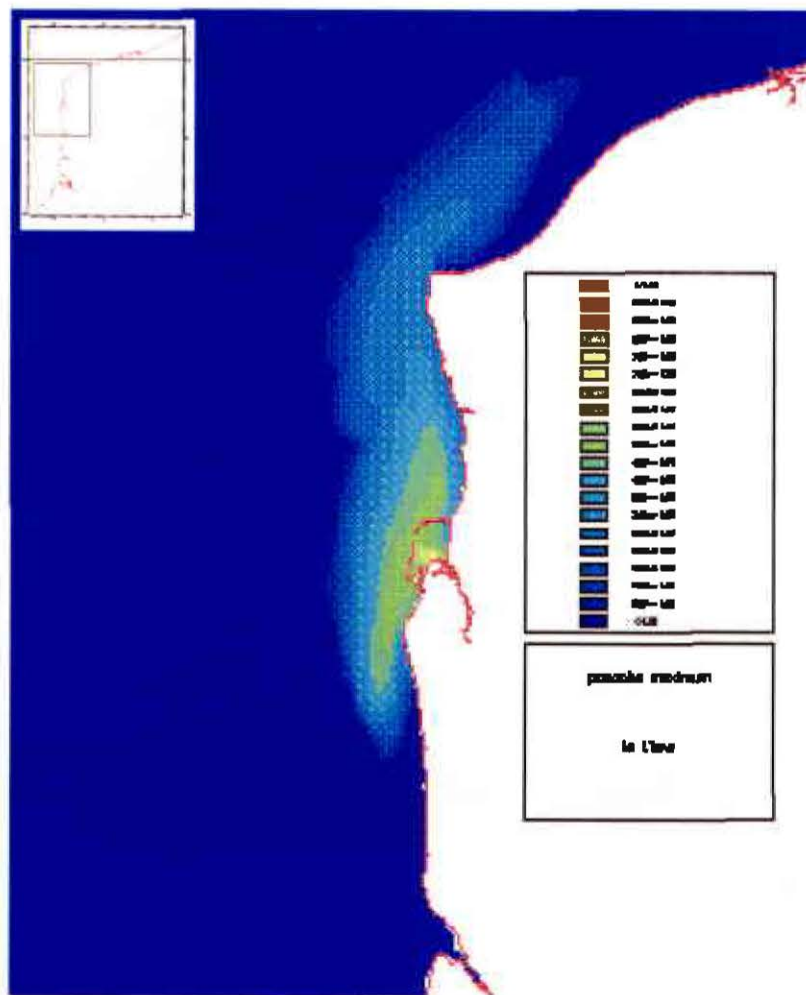


Figure 42 : panache maximum de la Liane

Les bactéries sont détectées par les analyses dans les tons verts et au delà, qui correspondent à une contamination supérieure à $31\ 600^{12}$ bact/100 ml). Ce sont ces zones colorées qui vont nous intéresser.

¹² soit $10e^{4.5}$ bact/m³

Pour la Liane une première zone reste confinée à l'intérieur du port de Boulogne qui sert de zone d'abattement des bactéries. Une zone moins polluée forme une langue qui s'étend d'Equihen à l'estuaire de la Slack.

4.2.2. La Manchue

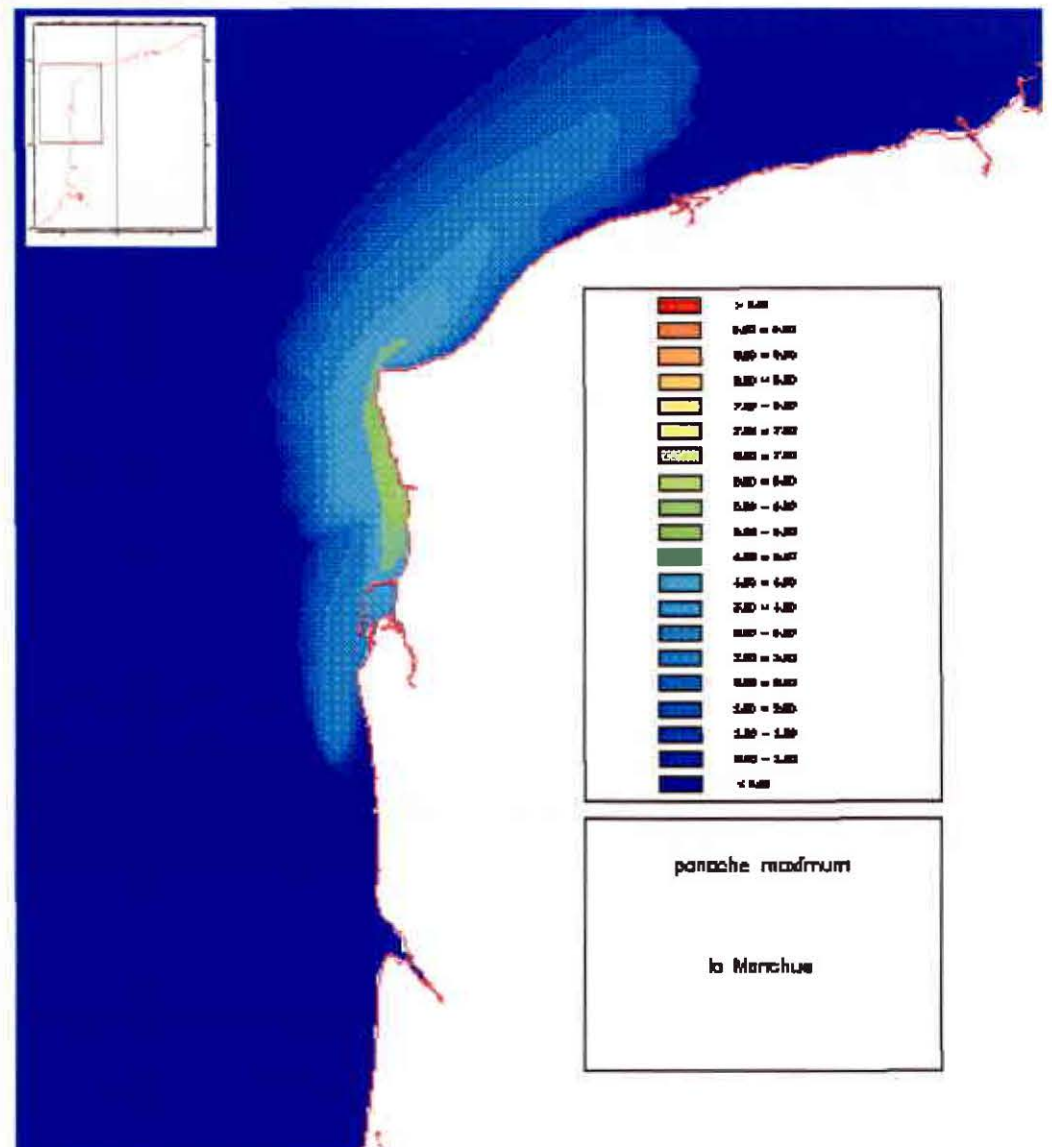


Figure 43: panache maximum de la Manchue

Il s'agit d'un petit panache qui déborde juste un peu du Cap Gris Nez. Il semble repoussé par la jetée nord de la rade de Boulogne dans laquelle il ne pénètre qu'en infime quantité (coloration bleu clair).

4.2.3. La Pointe aux Oies

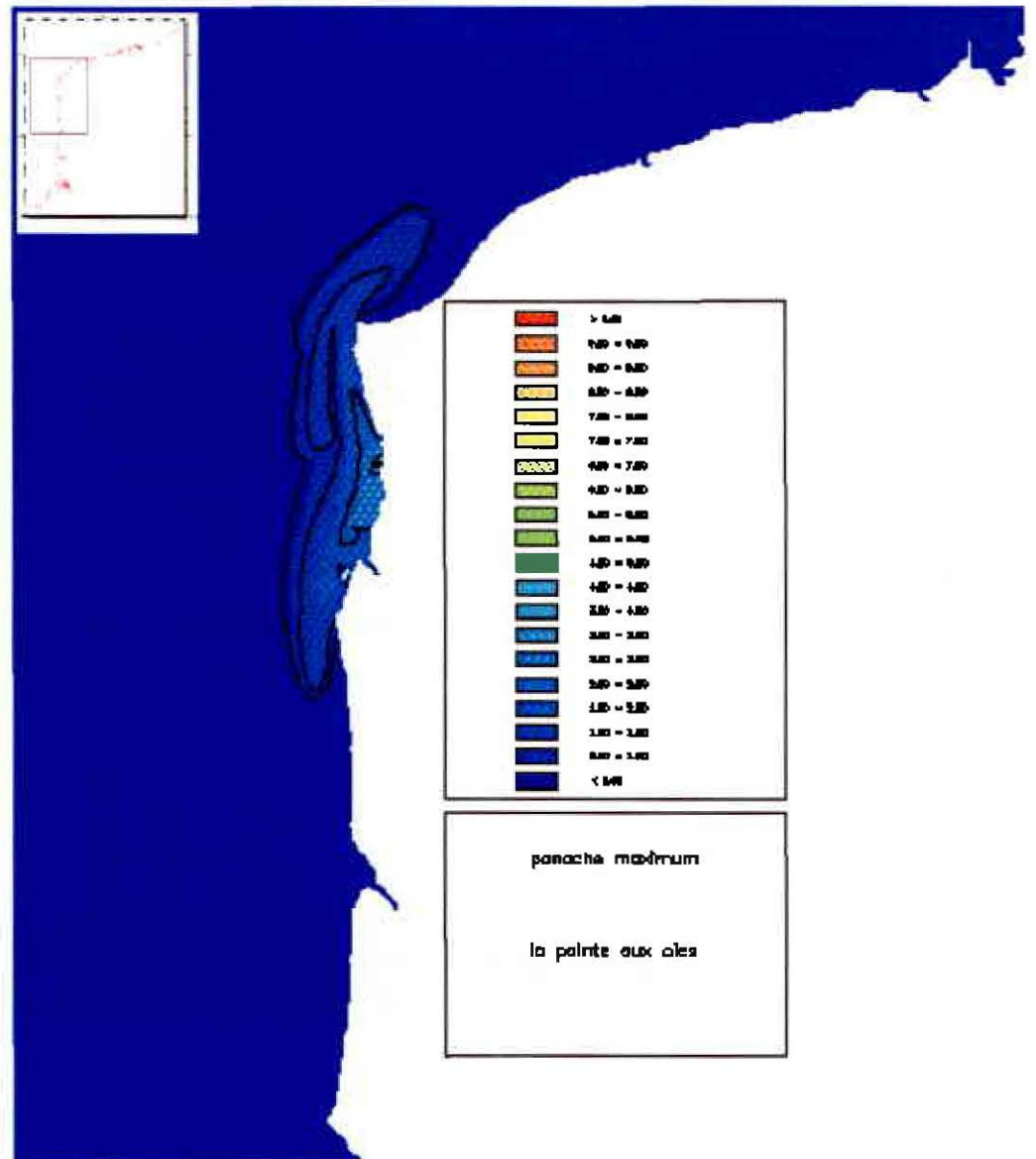


Figure 44 : le panache maximum du rejet de la Pointe aux oies

Il s'agit comme la Manchue d'un tout petit rejet. Sa zone d'influence est quasiment indétectable.

4.2.4. La Slack

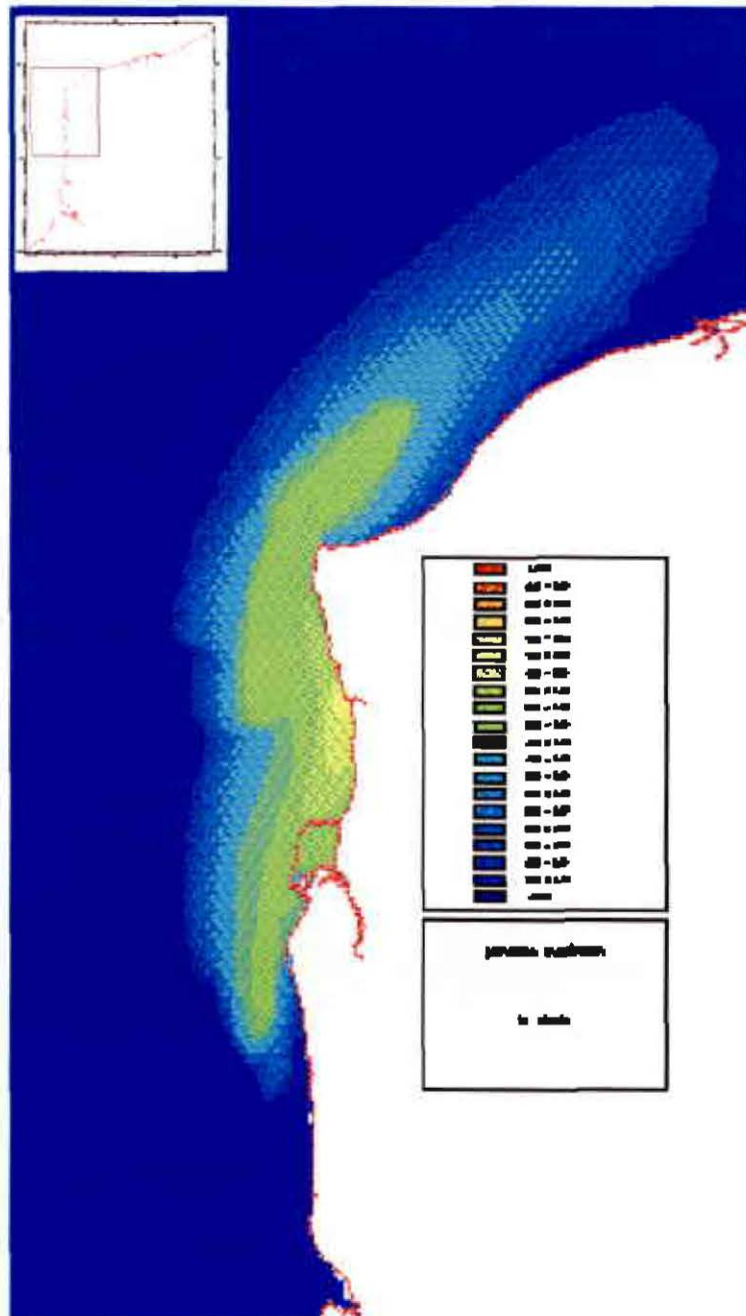


Figure 45 : le panache maximum de la Slack

Une première zone qui sort de la rivière reste confinée entre la Pointe aux Oies et le Cap Gris Nez. Le panache est repoussé par les jetées de Boulogne. Il s'écarte de la côte au sud de Wimereux et une crête dépasse le Cap Gris Nez.

4.2.5. Le Wimereux

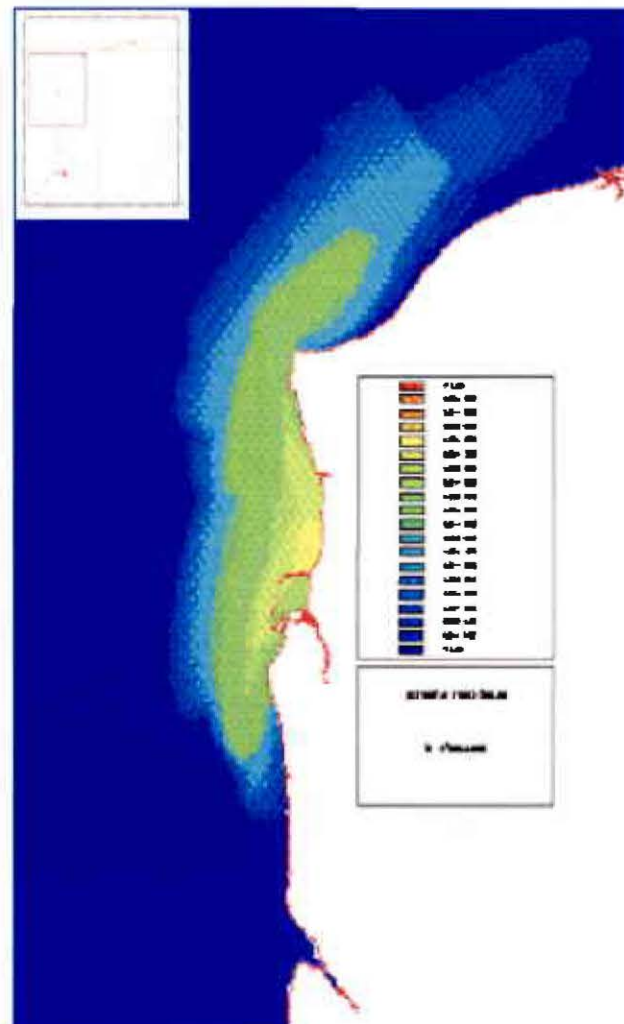


Figure 46 : le panache maximum du Wimereux

Le panache du Wimereux est très étendu. Une première tache reste bloquée entre la jetée nord du port de Boulogne et le sud du Cap Gris Nez. La zone de moindre contamination (en vert) descend jusqu'à Hardelot et s'étend jusqu'au Cap Blanc Nez. Elle n'est pas collée à la côte dans la Baie de Wissant.

4.2.6. Le Portel

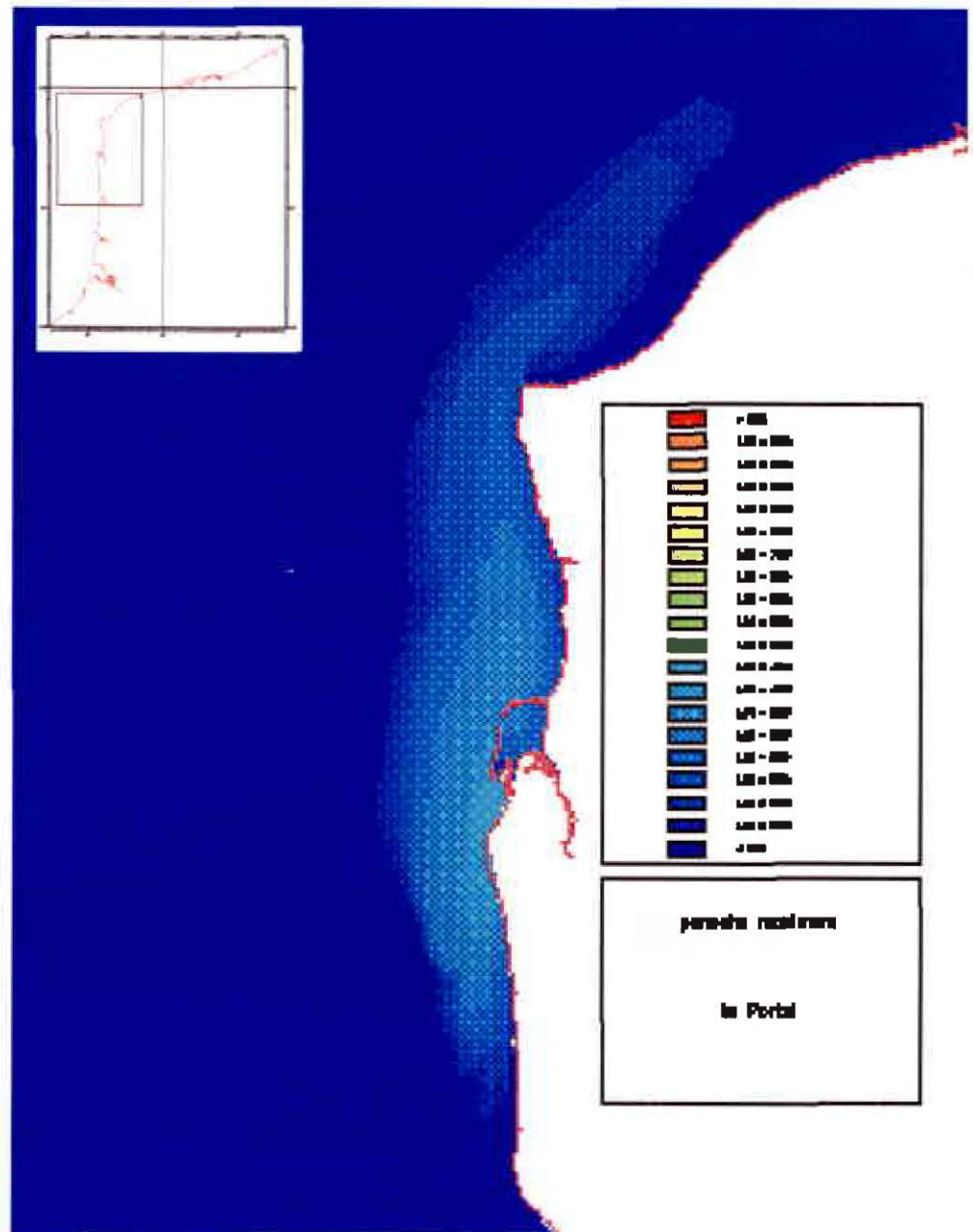


Figure 47 : panache maximum du Portel

Les valeurs d'entrée sont trop faibles pour avoir un panache de couleur jaune. Le panache reste confiné entre la cap d'Alprech et la rade de Boulogne.

4.2.7. Les rivières du Boulonnais

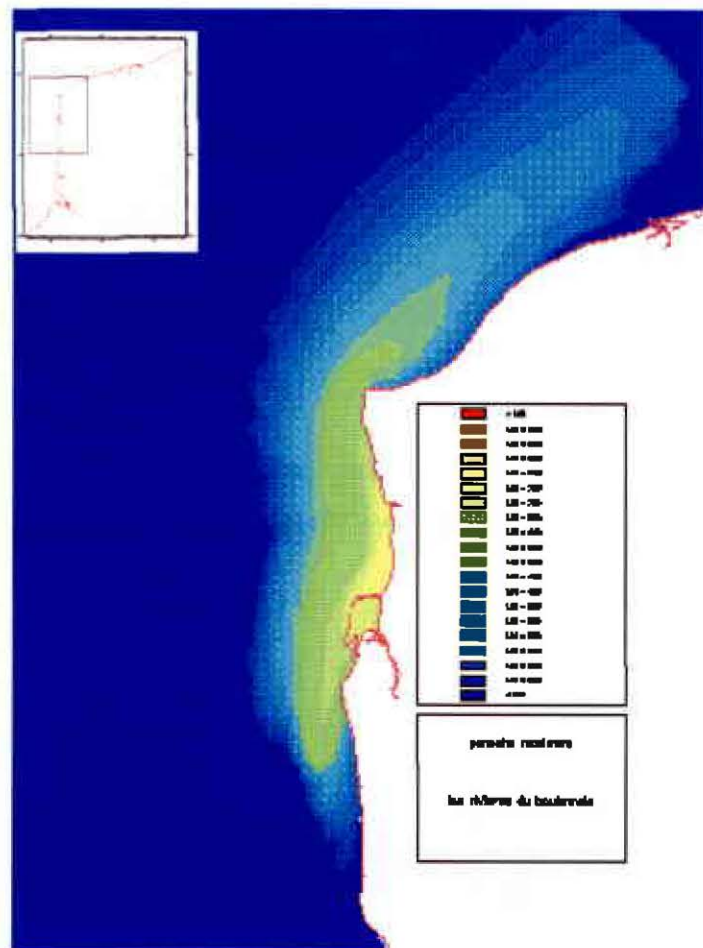


Figure 48 : panache maximum des rivières du Boulonnais

Tous les panaches restent à proximité de la côte, épousant sa forme. Ils sont soumis à l'action simultanée du vent et du courant de marée dont la résiduelle orientée au nord-est pousse la panache dans cette direction. Les panaches sont à rapprocher de l'excursion des particules d'eau comme nous l'avons vu plus haut. La rade de Boulogne a une grande influence sur le panache. Le rejet de la Liane reste bloqué dans la rade de Boulogne alors que les rivières du nord sont repoussées par la jetée nord et le rejet du Portel est confiné au sud du Port. L'exercice a été fait avec des flux différents en fonction des rivières. Il sera intéressant de voir l'impact avec des rejets théoriques ayant un flux rejeté de même valeur.

4.2.8. La Maye

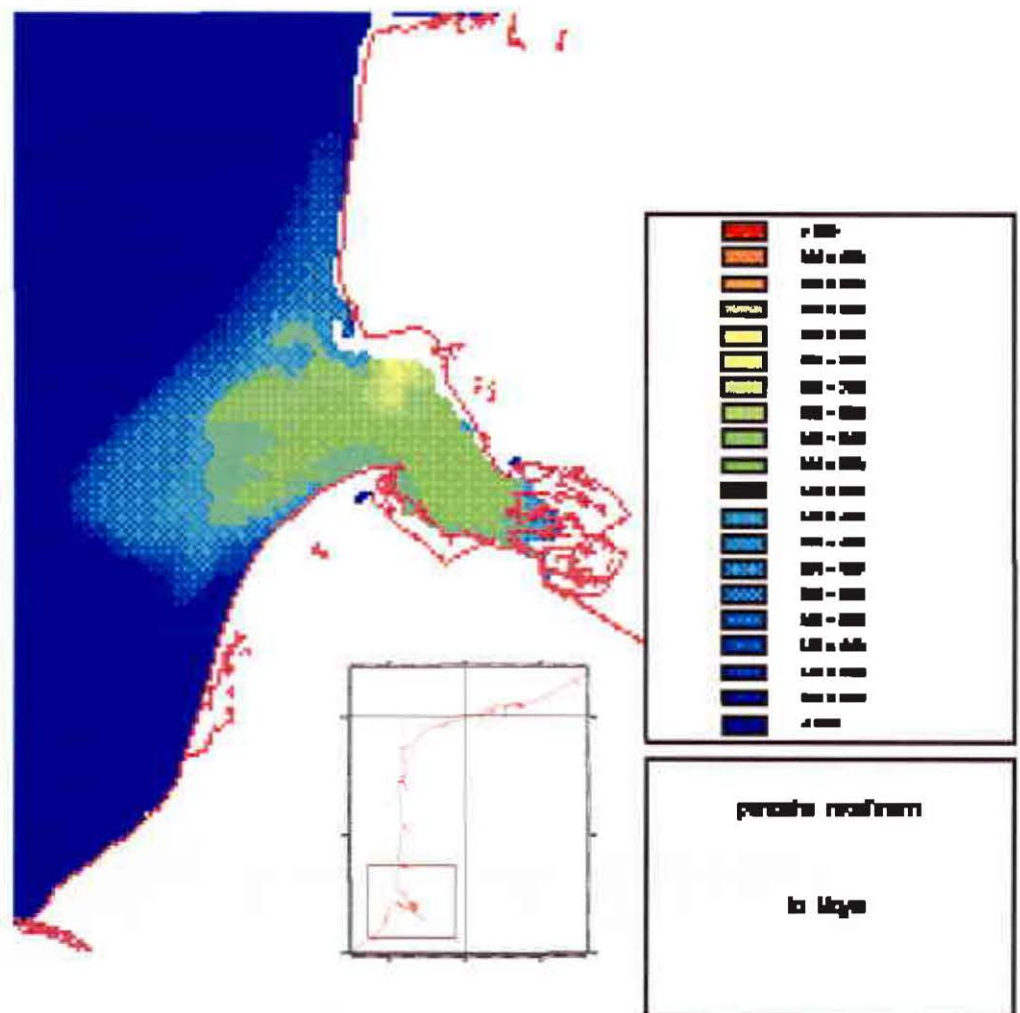


Figure 49 : panache maximum de la Maye

Les flux qui sortent de cette rivières sont faibles. La zone la plus contaminée de couleur orange reste confinée à proximité du rejet. Le panache en vert s'étend sur l'ensemble de la Baie de Somme ainsi sur une zone assez importante située à l'extérieur de la Baie.

4.2.10. Le Courant à Poissons

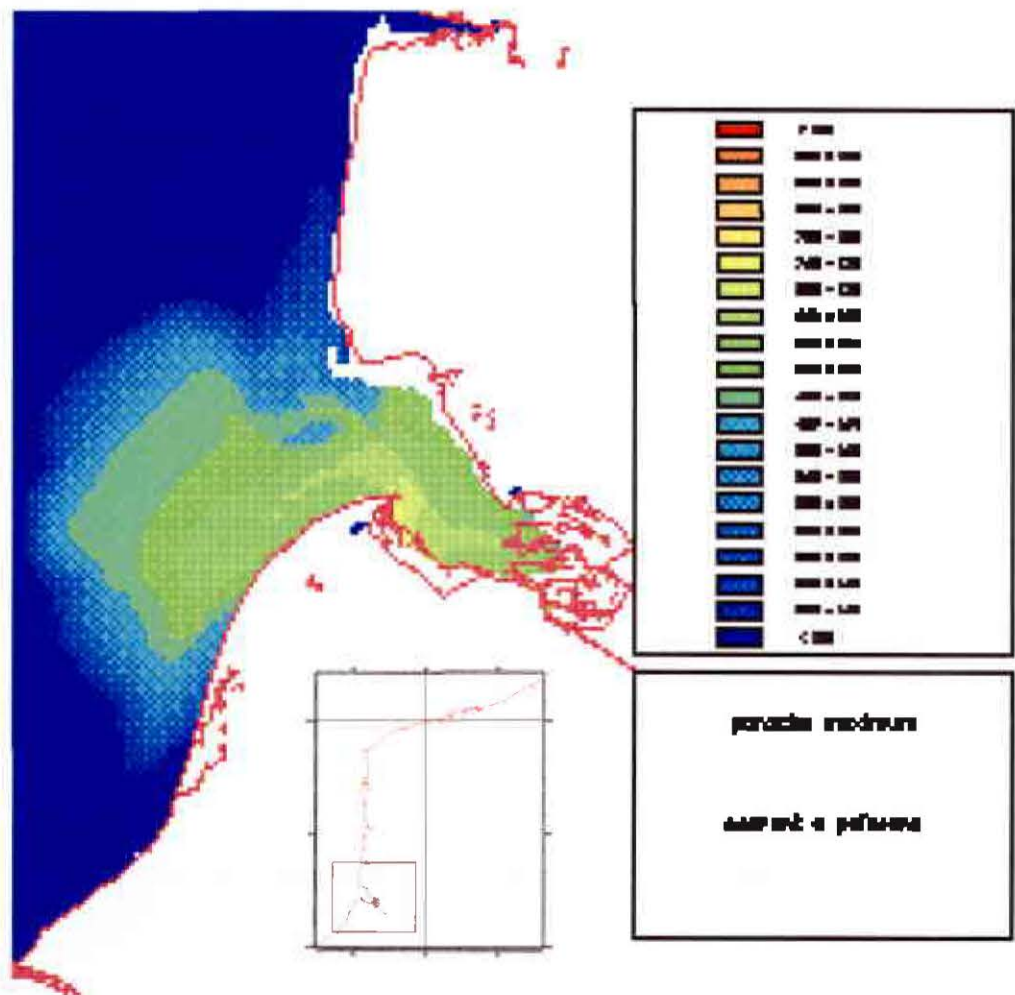


Figure 51 : panache maximum du Courant à Poissons

Comme pour la Maye, la décontamination se fait assez rapidement vu l'étendue de la zone de couleur orange. Le zone moyennement impactée de couleur verte couvre le fond de la baie ainsi que la zone maritime au large de Cayeux sur mer. Elle n'atteint pas la Pointe de Saint Quentin au nord.

4.2.12. Les rejets de la Baie de Somme

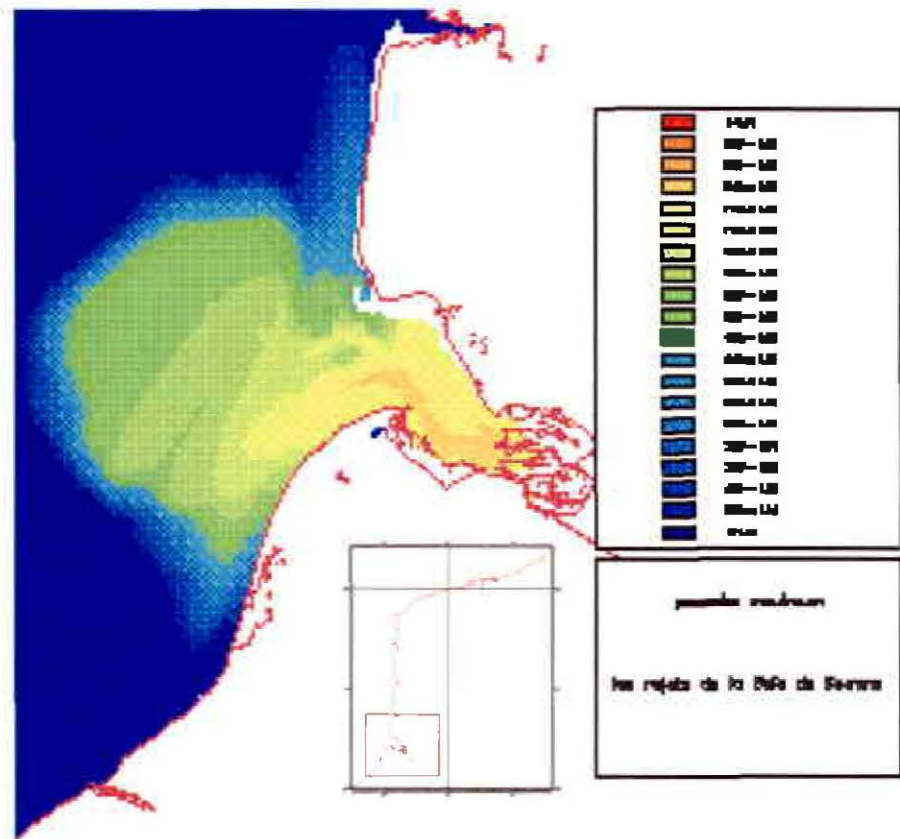


Figure 53 : panache maximum des rejets de la baie de Somme

Une zone orangée couvre l'ensemble de la baie et va même au large de Cayeux. La zone de contamination détectable par analyse est très étendue au large de la Baie de Somme. On voit distinctement une langue en bleu qui remonte le long de la côte vers Quend plage en passant sur la zone des bouchots. Ceci montre que les principaux rejets de la Baie de Somme ont une influence sur la qualité bactériologique des zones conchylicoles et de baignade situées autour de la Baie et plus particulièrement au niveau de Cayeux sur mer situé au Sud.

4.2.13. Les canaux de Calais

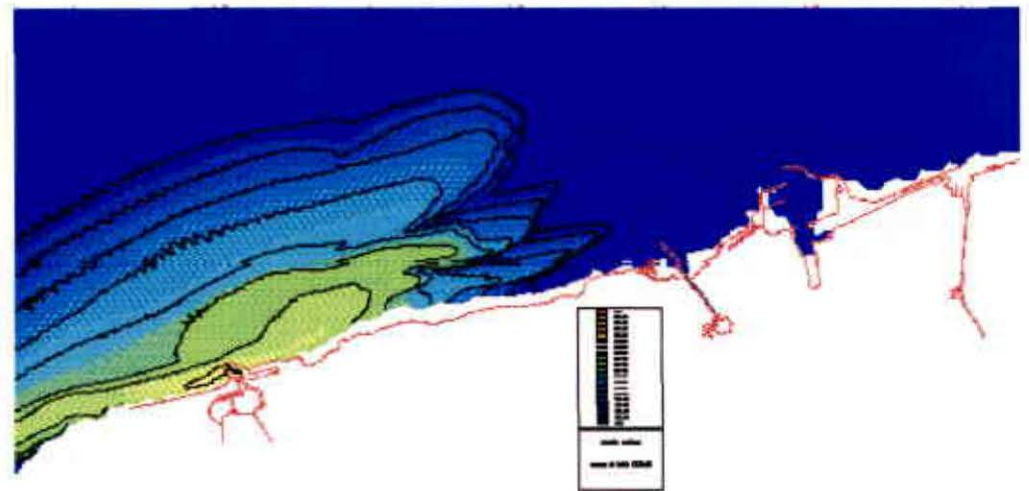


Figure 54 : panache maximum des canaux de Calais

Une première zone d'influence (en orange) se fait sentir à l'ouest immédiat des jetées du port de Calais. La disparition des bactéries qu'elle soit par mortalité ou par dispersion est donc rapide. La zone d'extension du panache est tronquée à l'ouest à cause de modèle que nous avons utilisé (Oye-Plage). A l'est, le panache de concentration moindre est encore visible à Grand Fort Philippe en se détachant de la côte après le Fort Vert.

4.2.14. L'Aa

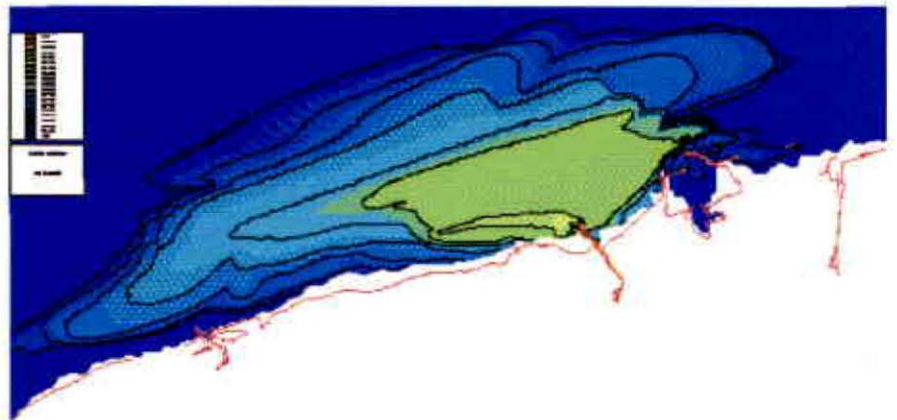


Figure 55 : panache maximum de l'Aa

Le rejet a une forme allongée parallèle à la côte sans toutefois être plaqué dessus en particulier vers l'ouest. La zone de plus forte concentration est une langue qui part vers l'ouest. La zone détectable par analyse s'étend de Marck à l'ouest, et dépasse guère les jetées de l'avant port ouest de dunkerque. La forme du panache est à mettre en relation avec la qualité des eaux de baignade de Loon-Plage et de Oye-Plage (bonne de puis plusieurs années). L'effet du rejet est ressenti jusqu'au niveau du Cap Blanc Nez.

4.2.15. Le port ouest de Dunkerque

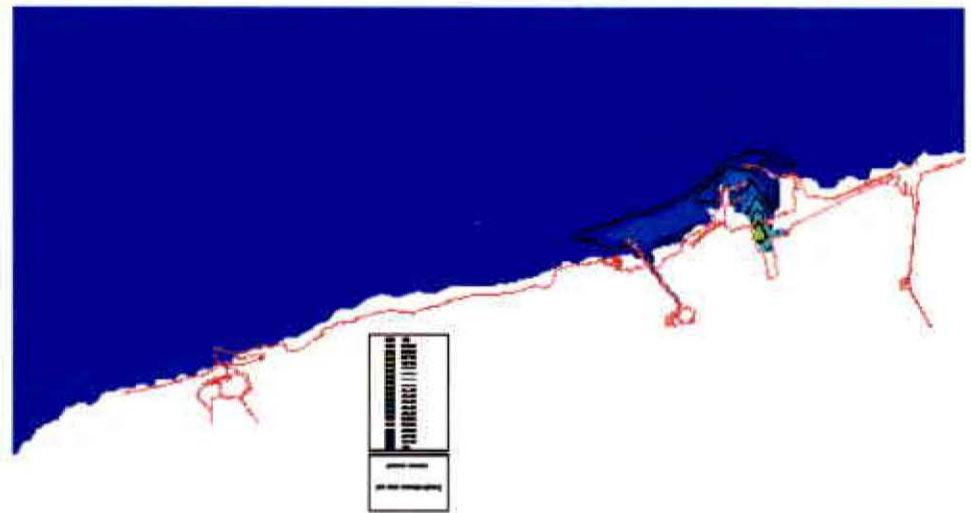
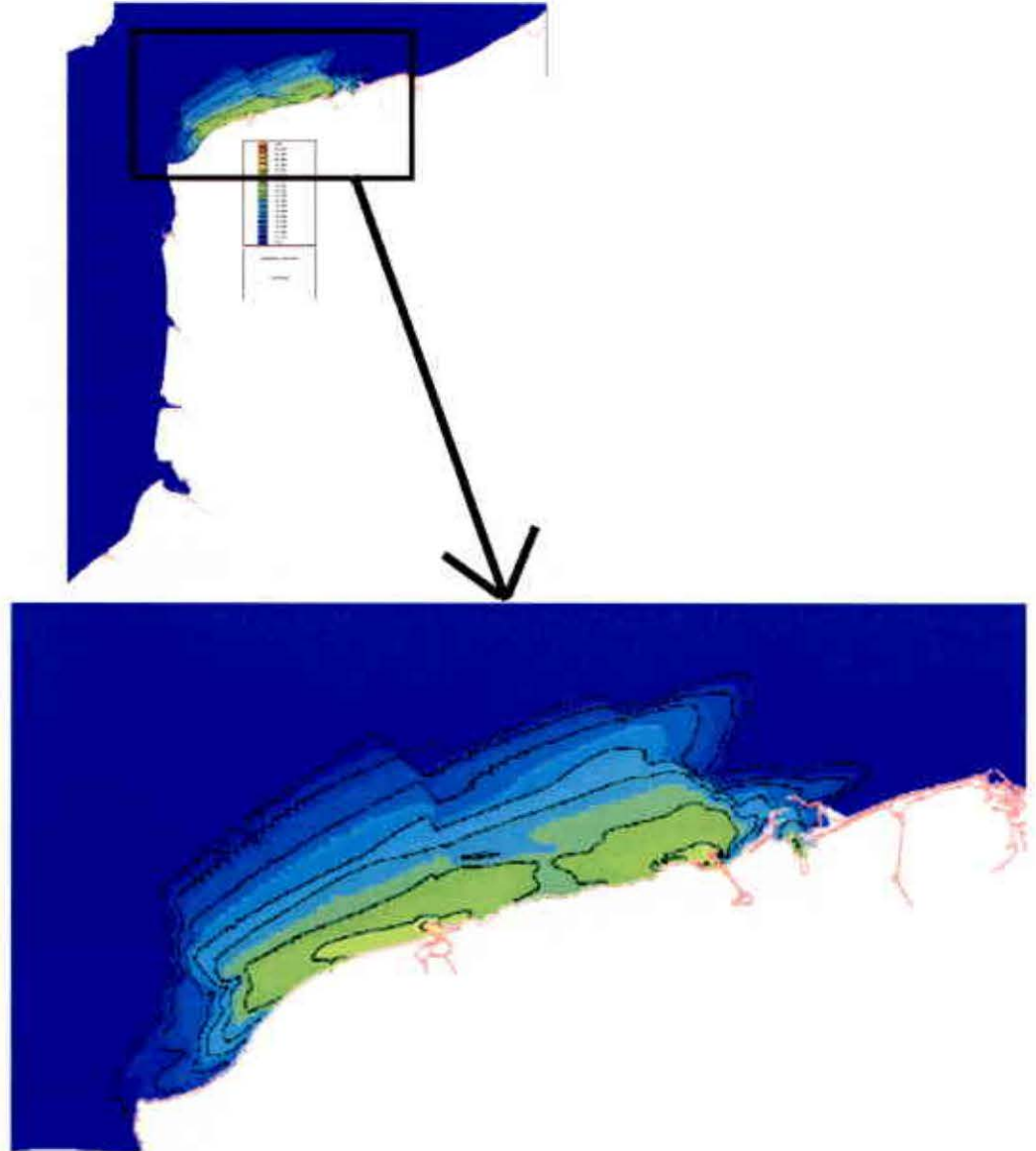


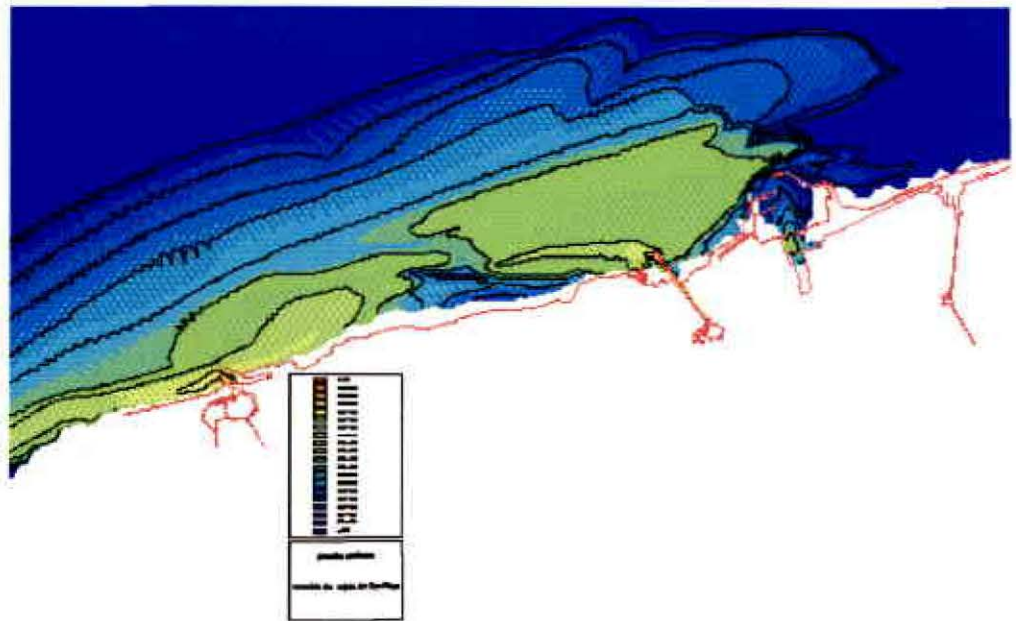
Figure 56 : panache maximum du port ouest de Dunkerque

Les bactéries ne sont plus décelables à l'extérieur de L'avant Port. Le panache ceinturé par une iso ligne est contenu dans une zone comprise entre l'ouest de la digue du Clipon et les Ecardines. Les digues de Grand Fort Philippe repoussent le panache vers le large à l'ouest des jetées.

4.2.16. L'ensemble des panaches de la région de Oye-Plage



**Figure 57 : panaches maximum des rejets de Oye-Plage
(modèle de grande emprise)**



**Figure 58 : panaches maximum des rejets de la région de Oye – Plage
(modèle de Oye - Plage)**

Les trois rejets ont été injectés dans le modèle. La zone d'influence du rejet du Port ouest de Dunkerque est localisée à l'intérieur du port. elle n'a pas d'influence sur une zone de baignade ou une éventuelle zone conchylicole située à proximité. Les deux autres rejets font apparaître une zone contaminée parallèle à la côte comprise entre la limite ouest du modèle et la digue est de l'avant port ouest de Dunkerque. L'image produite révèle une zone côtière quasiment « indemne » de contamination entre le Fort vert et le Platier d'Oye. des moules sont élevée à l'intérieur de cette zone. La figure 57 est issue d'une simulation identique à celle qui a permis de produire la figure 58 mais avec le modèle de grande emprise. Nous voyons un panache moins fin en raison de la taille de la maille. Le panache du rejet de Calais s'étend jusqu'au Cap Gris Nez. Il rejoint la zone d'influence des rejets du boulonnais (figure 48). Il semble donc que la Baie de Wissant subissent à la fois l'influence des rejets de Boulogne et ceux de Calais.

5. La fonction de transfert

5.1. Généralités

La notion de fonction de transfert exprime la relation qui existe (point par point) entre un rejet de matière effectué en un endroit quelconque et la concentration qui en résultera ultérieurement en un autre lieu. Cette relation peut s'exprimer sans perdre de généralité, sous la forme d'un quotient :

$$\phi_{x, y, t} = \frac{C_{x, y, t}}{Q_{x, y, t}}$$

C : concentration (u m^{-3})

Q : flux rejeté (u s^{-1})

ϕ : fonction de transfert (s m^{-3}).

L'équation d'advection - dispersion étant linéaire vis à vis de la concentration (voir plus haut) on peut considérer tout état observable comme résultant de la somme de rejets élémentaires instantanés dont chaque contribution s'ajoute pour créer dans le milieu la concentration réelle liée au rejet complet.

Grâce à la fonction ϕ , obtenue une fois pour toutes (par modèle numérique), il est donc théoriquement possible de prédire la répartition des concentrations dues à la superposition d'un nombre infini de rejets, chacun ayant une variation temporelle quelconque. On procède alors par simple combinaison linéaire de $\phi_{x, y}$, comme ci-dessous.

$$C_{x, y, t} = \sum_i C_{i(x, y, t)} = \sum_i \phi_{i(x, y, t)} \cdot q_i$$

C est la concentration totale due aux rejets élémentaires q_i , dont chacun provoque la concentration c_i .

5.2. Simplification et application

Définie comme ci-dessus dans sa généralité, la fonction ϕ est très difficile à utiliser puisque matérialisée par un tableau à 5 dimensions (le temps et les coordonnées spatiales des points de rejets et des points de calcul).

On simplifiera donc le problème en ne recherchant que la concentration maximale créée par chaque rejet. Pour cela, on supposera que toutes les concentrations maximales élémentaires se produisent simultanément, de sorte que la concentration maximale totale est la somme des concentrations maximales élémentaires. Cette hypothèse permet de s'affranchir de la variable temporelle en répondant au souci de maximiser le risque de pollution.

La fonction de transfert sera déterminée directement par le modèle, pour chaque point de rejet au cours d'une simulation durant laquelle on aura fait varier les paramètres extérieurs, notamment la météorologie. Pour éliminer totalement le facteur temps, y compris dans le terme de dégradation de l'élément transporté, on y inclura également le terme de décroissance matérialisé ici par un T_{90} (ici 72 heures).

La relation précédente se simplifie désormais comme suit :

$$C_{\max(x,y)} = \sum_i \phi_{i \max(x,y)} \cdot q_i$$

La fonction ϕ_{\max} , déterminée pour quelques points de rejets identifiés, se matérialise par autant de tableaux à deux dimensions (x et y).

Le panache maximum (chapitre 4) nous donne une idée de la zone concernée par un ou plusieurs rejets. A l'inverse, il est intéressant d'établir une relation entre un point situé à l'intérieur du modèle et les rejets pris individuellement. Pour cela, on attribue à chaque rejet un flux arbitraire (10^9 par exemple). On lance le modèle en demandant le calcul dérivé (panache maximum de matière dissoute). Le rapport entre la concentration au point qui nous intéresse et celle au rejet est appelé *fonction de transfert*. On obtient facilement une valeur de contamination au point concerné en multipliant la concentration au rejet par ce coefficient sans qu'il soit nécessaire de faire tourner le modèle pour différents flux ; sous réserve que les conditions initiales, marée et vent, soient les mêmes.

En établissant une fonction de transfert pour chaque rejet identifié pour un endroit « sensible » on est capable de connaître la contribution de chacun des rejets à la contamination en ce lieu. Cette démarche est intéressante pour savoir sur quel rejet il est intéressant de faire porter des efforts.

La contamination en un point est la somme arithmétique de la contribution de tous les rejets. Si on constate une différence importante entre la contamination calculée par ce moyen et celle obtenue par analyse, il peut être utile de rechercher d'autres sources de contaminants après s'être assuré que les rejets répertoriés étaient correctement estimés.

Les pages suivantes sont un exemple pour trois sources de pollution majeures de la Baie de Somme: La Somme, le Canal de la Maye et le Courant à Poissons.

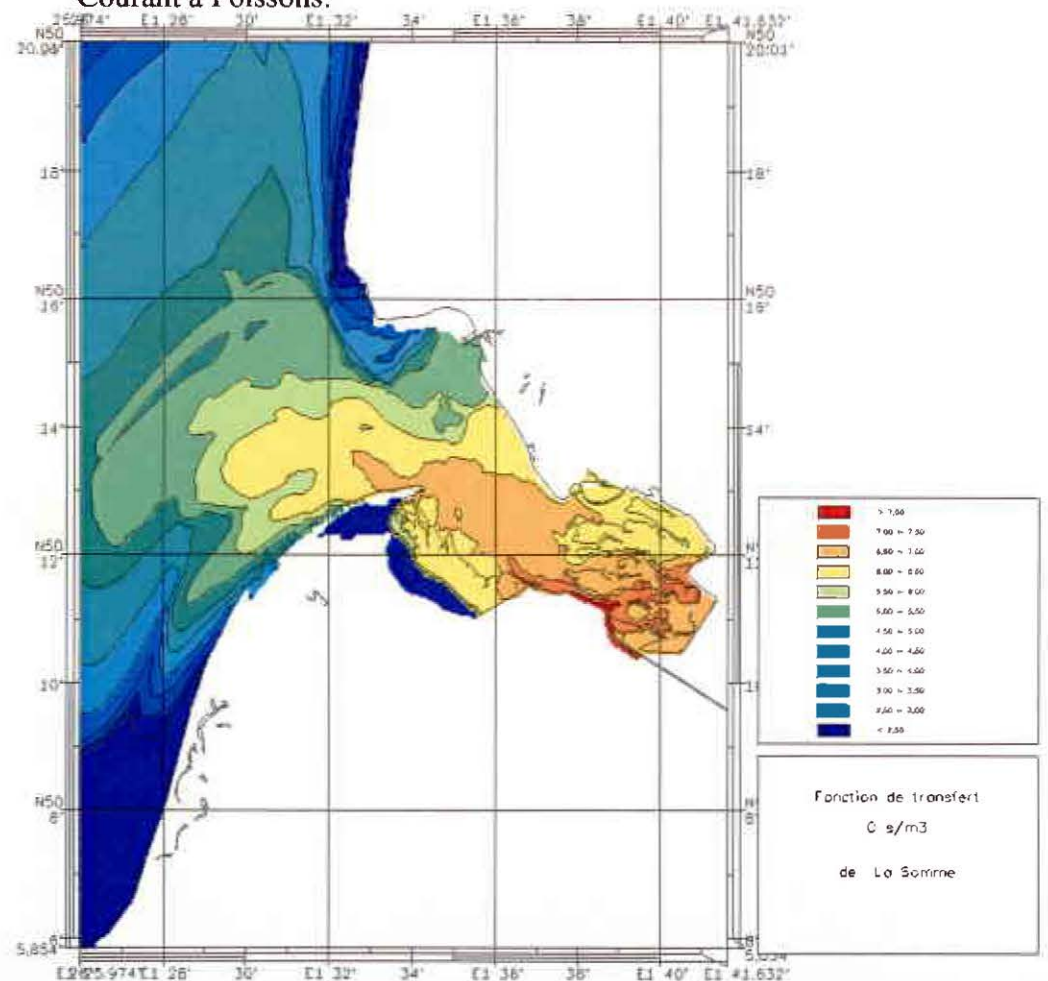


Figure 59 : fonction de transfert de la Somme

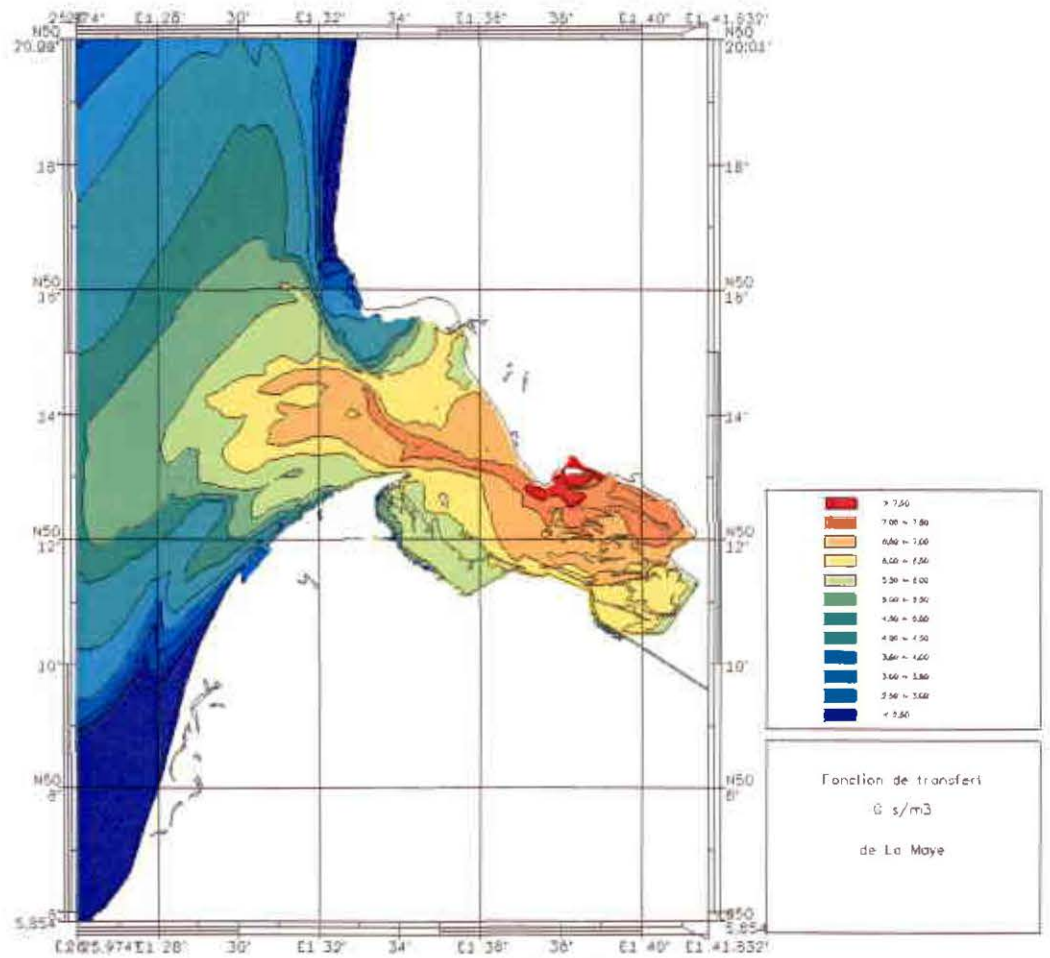


Figure 60 : fonction de transfert du Canal de la Maye

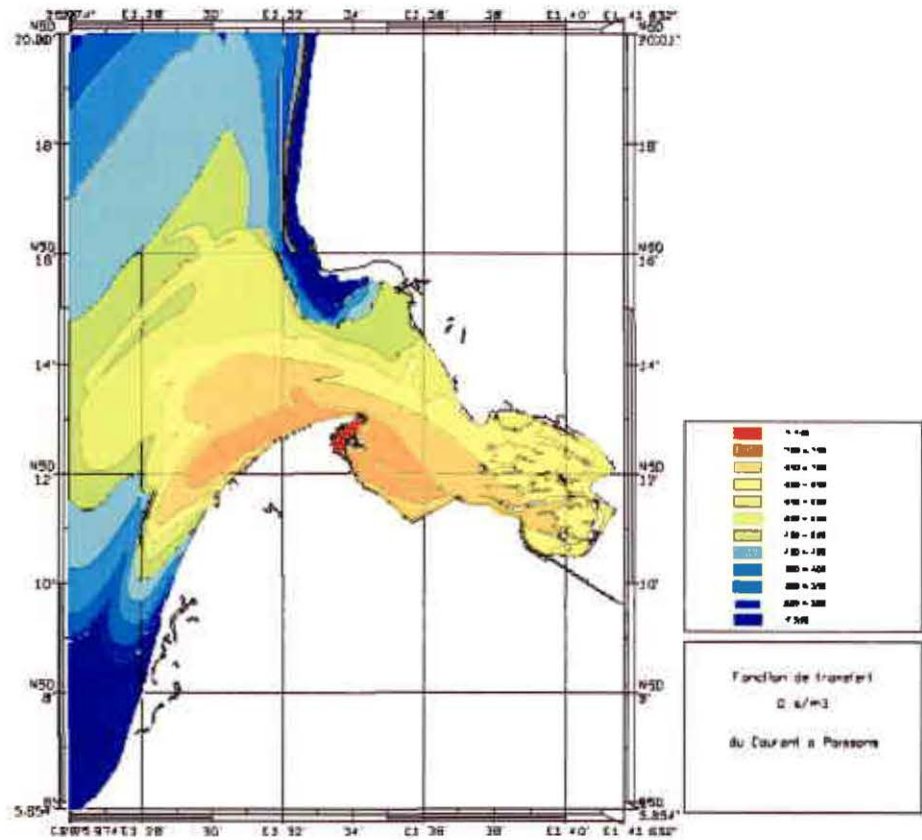


Figure 61 : Fonction de transfert du courant à Poissons

Nous allons estimer la contribution de chaque rejet (flux de $10e^9$ bact/s) à la maille de coordonnées $50^\circ 14' N$ et $01^\circ 32' E$.

Rejet en provenance de	Flux (EC/s)	Valeur approximative ¹³	Fonction de transfert
La Somme	$10e^9$	$10 e^6$ bact/m ³	$10 e^{-3}$ s/m ³
Du Courant à Poissons	$10e^9$	$10 e^{6,5}$ bact/m ³	$10 e^{-2,5}$ s/m ³
Du Canal de la Maye	$10e^9$	$10 e^{6,5}$ bact/m ³	$10 e^{-2,5}$ s/m ³

La concentration en ce point est égale à la somme des flux réels par la fonction de transfert soit :

Provenance du rejet	Flux	Fonction de transfert	concentration
La Somme	$8,39 10e^9$ bact/s	$10e^{-3}$ s/m ³	$8,39 10e^6$ bact/m ³
Le Courant à Poissons	$1,81 10e^8$ bact/s	$10e^{-2,5}$ s/m ³	$1,81 10e^{5,5}$ bact/m ³
Le Canal de la Maye	$1,62 10e^9$ bact/s	$10e^{-2,5}$ s/m ³	$1,62 10e^{6,5}$ bact/m ³
		Σ	$1,41 10e^7$ bact/m ³

La concentration $1,41 10e^7$ bact/m³ est proche de celle qui est sur la figure 53 de la page 78.

La fonction de transfert nous renseigne sur l'abattement d'un rejet. Un rejet ayant un petit flux mais une fonction de transfert faible suscitera l'intérêt de faire des travaux qui auront un impact important sur la qualité du milieu au point sensible. Il faudrait calculer la fonction de transfert de la Maye située à proximité de la maille qui nous intéresse. Il est petit ($9,51 10e^7$ bact/s) mais il ne doit pas être dispersé avant d'atteindre la maille qui nous intéresse. Apporter des améliorations sur ce rejet peut avoir un impact important sur l'endroit qui nous préoccupe.

¹³ Il existe un programme qui permet de connaître la valeur exacte de la concentration en tout point du modèle. Il n'a pas pu être utilisé pour ce rapport.

Conclusion

- Dans l'optique de reconquête de la qualité des eaux littorales, l'Agence de l'Eau Artois Picardie a demandé à l'Ifremer de proposer un moyen de diagnostic et d'aide à la décision.

Les quatre modèles mis au point pour répondre à cette demande offrent :

Une vision globale régionale

Une connaissance détaillée de trois sites (la baie de Somme, le Boulonnais et la région de Oye-Plage).

Les campagnes de validation pour la Baie de Somme et le Boulonnais ont montré que les modèles donnaient des résultats en accord avec les analyses bactériologiques effectués par le laboratoire. Les résultats du modèle donnent même une vision plus cohérente que les analyses bactériologiques. -

Les simulations des panaches maximum montrent que :

- Pour Boulogne :
Les panaches se dirigent vers le nord, franchissent le Cap Gris Nez et se dispersent finalement dans la Baie de Wissant. La décontamination est rapide. Elle est due à l'hydrodynamisme important de la zone qui brasse la masse d'eau ; la dilution agit plus que la mortalité sur la disparition des bactéries dans ce cas. La zone portuaire de Boulogne est très importante : c'est l'endroit où les rejets de la Liane décanent d'une part, la rade est une barrière qui gêne l'extension des panaches vers le sud d'autre part.
- Pour la Baie de Somme :
Les rejets contaminent une surface importante comprenant toute la Baie et s'étendant assez loin au large. Les panaches se dirigent le long de la côte vers le sud. Ils sont en revanche faiblement contaminés au niveau des Bouchots de Quend. il pourrait être intéressant d'étudier le comportement des rejets situés au nord des bouchots.
- Pour Oye-Plage :
Nous constatons une dilution rapide des rejets causée par le brassage important des masses d'eau. l'hydrodynamisme pousse les rejets vers l'ouest. les panaches couvrent la baie de Wissant franchissent le Cap Gris Nez puis s'orientent vers le sud le long de la côte. L'avant port ouest de Dunkerque est une zone de décantation. On constate une zone très peu contaminée entre le Fort Vert et le Platier d'Oye à l'endroit où sont installés les Bouchots.

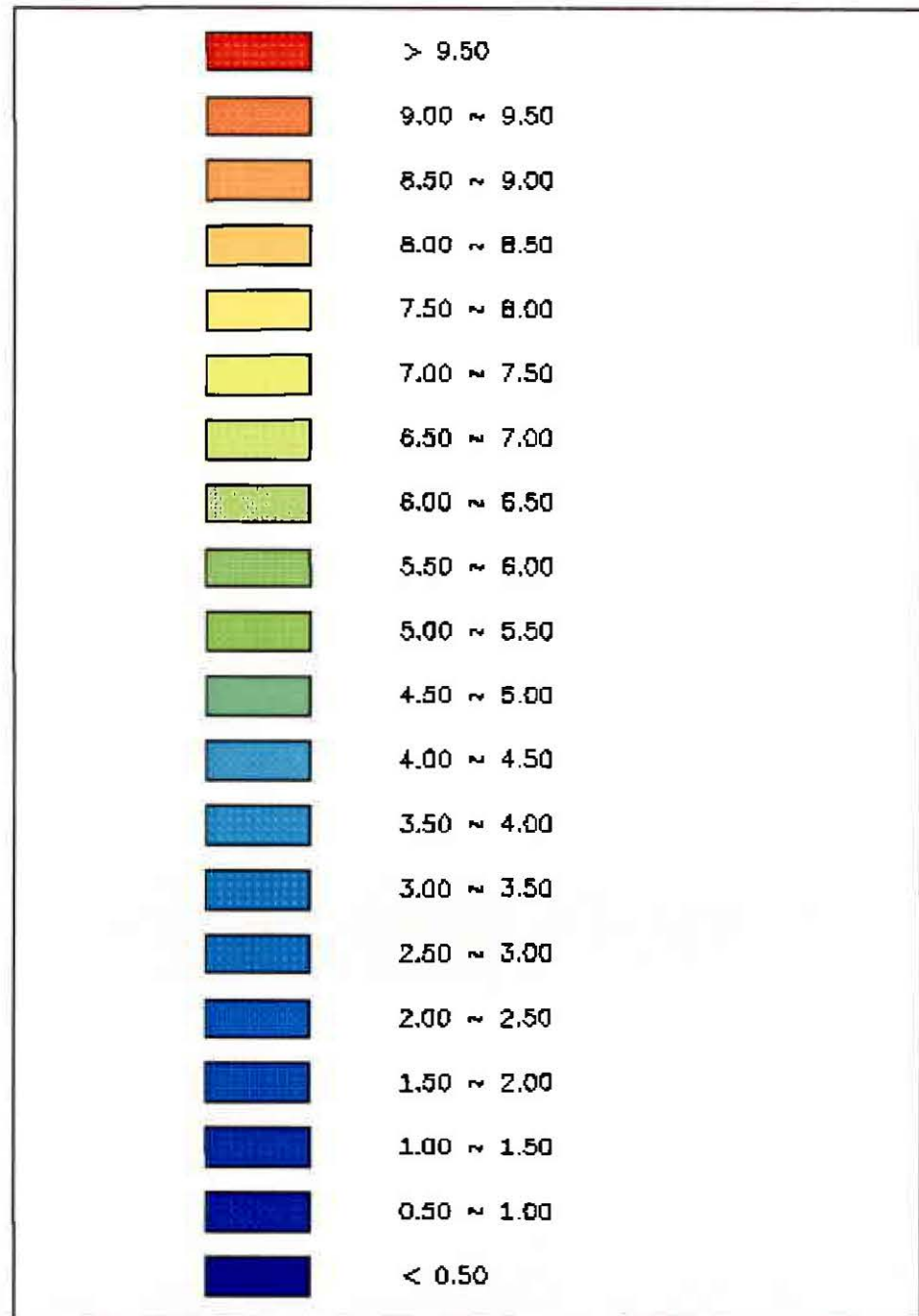
Le modèle permet enfin d'extraire une matrice synthétique qui relie chaque point de rejet à un point impacté voir à l'ensemble du domaine. En chaque point du domaine il est possible de connaître la part de chaque rejet sur la qualité bactériologique du milieu.

Si on souhaite améliorer la qualité des eaux conchylicoles pour

- Le secteur de Wimereux : Il faut s'intéresser aux rejets les plus proches et situés au sud de la zone sensible puisque les panaches se dirigent vers le nord. Il peut être intéressant ne pas rejeter en permanence dans le milieu et de profiter de courants favorables à la dispersion et orientés dans la direction qui éloigne le panache des zones de récolte de coquillages.
- Le secteur des bouchots de Quend : Il faut regarder l'impact des rejets situés au nord de la zone d'élevage de coquillages, en particulier l'Authie et poursuivre les efforts faits pour améliorer la qualité des rejets de la Baie de Somme en regardant s'il est possible de profiter de conditions de courant favorables à la dispersion
- Le secteur des bouchots de Oye-Plage : Il faut agir sur les rejets situés à l'est de la zone d'implantation et sur la qualité de la rivière Aa tout particulièrement. Une amélioration de la connaissance des flux bactériens arrivant sur le littoral de Oye-Plage sera nécessaire pour améliorer la pertinence des simulations sur ce secteur.

D'autres simulations pourront être envisagés à la demande des partenaires locaux

Annexes



Légende des images de dispersion de bactéries
 $\log(\text{bactéries}) \times m^{-3}$

Bibliographie

- "Gérer notre environnement marin par la modélisation mathématique" – Jc SALOMON - Equinoxe n° 50.
- Le littoral de la Région Nord/Pas-de-Calais, "Qualité du milieu marin" juillet 96 - Rapport IFREMER n°3-1986, 149 pp.
- Le littoral de la Région Nord/Pas-de-Calais, "Apports à la mer" - Rapport IFREMER n° 15-1989, 149 pp.
- Evaluation des flux de bactéries entériques sur le secteurs conchylicoles du littoral des Régions Nord-Pas de Calais et Picardie – G. GENNEQUIN septembre 1996 1996
- Notice d'utilisation des logiciels de modélisation - DELAO - novembre 1997 18 p annexes
- Interface graphique MARS 2D : dossier d'architecture du logiciel - SEMA GROUP - Philippe RIOUALEN et DEL/AO - Marguerite BRETON - octobre 1998 - 76 pp
- Interface graphique MARS 2D : Manuel d'utilisation - SEMA GROUP - Philippe RIOUALEN et DEL/AO - Marguerite BRETON - septembre 1998 - 76 pp
- VISUMARS, Manuel d'utilisation - Marguerite BRETON - janvier 1999.