

Direction du suivi de l'état de l'environnement

**MODÉLISATION  
DE LA QUALITÉ BACTÉRIOLOGIQUE  
D'UN SITE POTENTIEL DE BAINADE  
À L'ANSE AU FOULON, SILLERY**

par

Serge Hébert

et

Annie Simard

Ministère de l'Environnement  
Gouvernement du Québec  
Novembre 2000

Cette étude, réalisée dans le cadre du volet Santé de la phase III du Plan d'action Saint-Laurent, a été rendue possible grâce à une participation financière de Santé Canada.

Dépôt légal – Bibliothèque nationale du Québec, 2000  
ISBN 2-550-37570-X  
Envirodoq : ENV/2001/0154  
QE-124

## ÉQUIPE DE TRAVAIL

---

Chargé de projet :	Serge Hébert <sup>1</sup>
Rédaction :	Serge Hébert <sup>1</sup> Annie Simard <sup>1</sup>
Collaboration :	Benoit Lévesque <sup>2</sup> Claude Laberge <sup>3</sup>
Analyses en laboratoire :	Personnel du laboratoire du ministère de l'Environnement <sup>4</sup>
Soutien technique :	Annie Simard <sup>1</sup> Janek Szychowski <sup>1</sup> René Therreault <sup>1</sup>
Graphisme :	Francine Matte-Savard <sup>1</sup>
Traitement de texte :	Nathalie Milhomme <sup>1</sup>
Production :	Direction des communications Ministère de l'Environnement

---

<sup>1</sup> Direction du suivi de l'état de l'environnement, ministère de l'Environnement, édifice Marie-Guyart, 675, boulevard René-Lévesque Est, 7<sup>e</sup> étage, Québec (Québec) G1R 5V7

<sup>2</sup> Direction de la santé publique de Québec, Équipe Santé et Environnement, Centre de santé publique de Québec, 2400, rue d'Estimauville, Beauport (Québec) G1E 7G9

<sup>3</sup> Firme STATEX, experts-conseils en statistique, 3332, rue de la Paix, Sainte-Foy (Québec) G1X 3W6

<sup>4</sup> Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec, ministère de l'Environnement, Complexe scientifique, 2700, rue Einstein, Sainte-Foy (Québec) G1P 3W8



---

## MODÉLISATION DE LA QUALITÉ BACTÉRIOLOGIQUE D'UN SITE POTENTIEL DE BAIGNADE À L'ANSE AU FOULON, SILLERY

Référence : HÉBERT, S. et A. SIMARD, 2000. *Modélisation de la qualité bactériologique d'un site potentiel de baignade à l'anse au Foulon, Sillery*, Québec, Direction du suivi de l'état de l'environnement, ministère de l'Environnement, Envirodoq n° ENV/2001/0154, rapport n° QE-124, 14 p. et 2 annexes.

### RÉSUMÉ

**A**fin d'évaluer la possibilité de développer un modèle prédictif de la qualité bactériologique de l'eau pour la gestion en temps réel d'un site potentiel de baignade, nous avons mesuré au cours de l'été 1999, à une fréquence élevée (deux fois par jour), les teneurs en coliformes fécaux à la plage historique de l'anse au Foulon, à Sillery. Grâce à une modélisation utilisant la régression multiple, nous avons pu déterminer trois modèles prédictifs expliquant plus de 40 % de la variabilité des teneurs en coliformes fécaux dans les eaux de ce site. Le modèle général ( $r^2 = 0,53$ ), élaboré à partir de l'ensemble des données récoltées tant au montant qu'au baissant, est basé sur l'intensité des précipitations au cours des 24 heures précédant l'échantillonnage, sur la phase et l'amplitude de la marée ainsi que sur le nombre d'animaux domestiques présents sur le site. Les deux autres modèles ont été obtenus à partir des données récoltées respectivement à marée montante et à marée baissante. À marée montante, le modèle ( $r^2 = 0,80$ ) est basé sur l'intensité des précipitations au cours des 24 heures précédant l'échantillonnage, sur le nombre total d'oiseaux de rivage fréquentant le site et sur la somme des précipitations au cours des trois journées précédant l'échantillonnage. À marée baissante, le modèle ( $r^2 = 0,44$ ) est basé sur l'intensité des précipitations au cours des 24 heures précédant l'échantillonnage, les autres variables explicatives étant l'amplitude de la marée et le nombre d'animaux domestiques présents sur le site. Les précipitations ont ainsi un impact très significatif sur la qualité bactériologique de l'eau de ce site et sur le dépassement du critère de qualité relatif à la baignade. Le faible pouvoir prédictif du modèle élaboré pour le baissant est probablement associé à une contamination de la masse d'eau qui n'est pas reliée aux précipitations et qui varie dans le temps. Étant donné la qualité bactériologique observée au cours de l'été 1999, le site de l'anse au Foulon présente actuellement un faible potentiel pour la baignade.



---

**TABLE DES MATIÈRES**

<b>Équipe de travail</b> .....	iii
<b>Résumé</b> .....	v
<b>Table des matières</b> .....	vi
<b>Liste des tableaux</b> .....	vii
<b>Liste des figures</b> .....	vii
<b>Liste des annexes</b> .....	vii
<b>1 INTRODUCTION</b> .....	1
<b>2 CARACTÉRISATION DU SITE DE L'ANSE AU FOULON OUEST</b> .....	1
2.1 Choix du site .....	1
2.2 Historique.....	1
2.3 Aspects esthétiques .....	2
2.4 Composantes récréotouristiques.....	2
2.5 Description du site.....	2
2.5.1 Occupation.....	2
2.5.2 Nature et état des sols de l'estran.....	2
2.5.3 Topographie.....	3
2.5.4 Végétation.....	3
2.5.5 Avifaune .....	3
2.5.6 Sources potentielles de contamination.....	3
<b>3 MÉTHODOLOGIE</b> .....	4
3.1 Prélèvements et analyses .....	4
3.2 Modélisation.....	4
<b>4 QUALITÉ BACTÉRIOLOGIQUE DE L'EAU</b> .....	6
<b>5 RÉSULTATS DE LA MODÉLISATION</b> .....	6
5.1 Modèle général.....	7
5.2 Modèle à marée montante .....	8
5.3 Modèle à marée baissante .....	9
<b>6 DISCUSSION</b> .....	10
<b>7 CONCLUSION</b> .....	13
<b>8 RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES</b> .....	13

---





## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1	Liste exhaustive des variables considérées pour la modélisation .....	5
Tableau 2	Coefficients de corrélation de Spearman ( $P < 0,05$ ) entre les concentrations de coliformes fécaux et les différentes variables explicatives .....	11

## LISTE DES FIGURES

Figure 1	Moyennes géométriques des concentrations en coliformes fécaux mesurées lors de chaque visite réalisée à l'anse au Foulon Ouest .....	6
Figure 2	Droite de régression multiple du modèle prédictif général des concentrations en coliformes fécaux à l'anse au Foulon Ouest .....	7
Figure 3	Droite de régression multiple du modèle prédictif à marée montante des concentrations en coliformes fécaux à l'anse au Foulon Ouest.....	9
Figure 4	Droite de régression multiple du modèle prédictif à marée baissante des concentrations en coliformes fécaux à l'anse au Foulon Ouest.....	10

## LISTE DES ANNEXES

Annexe 1	Localisation des ouvrages de surverse et des émissaires pluviaux à proximité du site de l'anse au Foulon	
Annexe 2	Évolution journalière des principales variables explicatives, été 1999	



## 1 INTRODUCTION

Plusieurs sites potentiels de baignade ont été recensés le long du fleuve Saint-Laurent et leur qualité bactériologique a été évaluée (LaRue *et al.*, 1996; Gauvin *et al.*, 1998; GIRAM, 1998; Robillard et Bonin, 1999; 2000; Hébert, 2000). Plusieurs de ces sites présentent un potentiel intéressant pour la baignade (Hébert, 2000), mais les délais entre le moment de la caractérisation et la disponibilité des résultats analytiques exposent les usagers de ces sites à une eau potentiellement contaminée. Les modèles prédictifs sont aujourd'hui considérés comme des outils essentiels permettant de réduire l'exposition de la population à des eaux présentant une contamination microbiologique (USEPA, 1999). Plusieurs de ces modèles utilisent les données météorologiques et climatiques, de même que l'intensité et la persistance de la contamination bactériologique, pour déterminer les conditions critiques devant entraîner la fermeture d'une plage.

Dans le cadre de la phase III du Plan d'action Saint-Laurent, la Direction du suivi de l'état de l'environnement (anciennement la Direction des écosystèmes aquatiques) du ministère de l'Environnement du Québec (MENV) a réalisé au cours de l'été 1999 un échantillonnage à fréquence élevée d'un site potentiel de baignade, soit celui de l'anse au Foulon à Sillery. Le but de cette étude était de documenter la qualité bactériologique de ce site, d'en évaluer le potentiel et de développer un modèle prédictif pouvant conduire à une gestion en temps réel du risque relatif à la baignade.

## 2 CARACTÉRISATION DU SITE DE L'ANSE AU FOULON OUEST

### 2.1 Choix du site

Le choix du site de l'anse au Foulon à l'ouest de la marina du Yacht Club de Québec, à Sillery, fait suite à une étude du Comité ZIP de Québec et Chaudière-Appalaches (Pelletier, 1998) sur le processus d'ensablement en vue de la création d'une plage publique à l'anse au Foulon. Le terrain situé immédiatement à l'ouest de la marina, ancienne propriété du CN et de Shell Canada, a fait l'objet d'une décontamination et n'a présentement aucun occupant. Cette étude fait également état de diverses modalités suivant lesquelles il serait techniquement possible d'y créer une nouvelle plage de baignade et de détente.

### 2.2 Historique

La plage de l'anse au Foulon a été créée entre 1927 et 1929. Dès son ouverture, la plage attire de nombreux baigneurs. En 1952, la Ville de Sillery en prend l'entière responsabilité et l'aménage totalement. L'achalandage de la plage ne cesse de croître jusqu'au milieu des années soixante, période qui marque le début de son déclin. À cette époque, le Yacht Club de Québec obtient une subvention pour s'installer à l'anse au Foulon. Par la suite, un ensemble de facteurs vont entraîner la fermeture progressive de cette plage : notons par exemple le passage de la voie ferrée qui contribua à l'enrochement de l'estran, le remblaiement total de l'arrière-plage et d'une partie de la plage humide pour construire des réservoirs pétroliers et héberger l'atelier de construction de bateaux Boulet-Lemelin ainsi que le Club de tennis et de squash Montcalm. Mais c'est surtout la

prise de conscience de la piètre qualité des eaux du fleuve qui vient mettre un terme à l'utilisation de la plage. L'année 1969 a marqué la fin de l'accès public à ce qui fut de loin la plus belle plage de la région de Québec.

### **2.3 Aspects esthétiques**

En dépit des transformations opérées depuis le début du siècle, le paysage a conservé dans son ensemble d'incontestables qualités. Vus dans une perspective positive, les remblais libérés de leurs réservoirs pétroliers offrent de vastes espaces riverains à fort potentiel d'accueil et de contact avec l'eau. Cependant, quelques éléments d'aspect visuel très discutables sont toujours présents, dont les bers du Yacht Club de Québec et le bâtiment du Club de tennis et de squash Montcalm. Seule la falaise, jusqu'ici négligée par les promoteurs, offre un élément visuel d'intérêt.

### **2.4 Composantes récréotouristiques**

Élément central, la marina du Yacht Club de Québec est incontestablement l'élément récréotouristique majeur du territoire tant par sa visibilité que par sa dimension. Ainsi, la marina et la rampe de mise à l'eau, auxquelles pourrait s'ajouter une plage de baignade, sont de nature à constituer la base d'un éventuel parc riverain régional d'une qualité et d'une diversité exceptionnelles (Pelletier, 1998).

### **2.5 Description du site**

#### *2.5.1 Occupation*

L'estran à l'ouest de la marina a été graduellement remblayé, formant ainsi un monticule de 180 m de large et d'environ 80 m de profondeur. Ce remblai supporte maintenant l'atelier du constructeur maritime Boulet-Lemelin, de même qu'un étang de décantation des déblais retirés de la marina.

#### *2.5.2 Nature et état des sols de l'estran*

Les sols des berges de l'anse au Foulon Ouest sont en majorité constitués de sable. Le remblai du CN est, quant à lui, constitué de gravier compacté protégé par un enrochement du côté de l'estran. L'estran schisteux résiduel est principalement recouvert de sable grossier, de sable fin et de sable argileux à son extrémité ouest. On retrouve quelques effleurements de cette formation schisteuse à l'anse au Foulon Ouest (Pelletier, 1998). Les sédiments de surface de la plage à l'ouest de la marina sont constitués de sable (90 %), de silt argileux (5 %) et de gravier (1 %). Les sédiments bordant la marina sont classés modérément contaminés : il n'y aurait que quelques dépassements des critères de qualité, principalement en ce qui concerne les métaux lourds (Pelletier, 1998).

### 2.5.3 *Topographie*

Les sables de la moitié supérieure de l'estran sont stables et forment une flèche parallèle à la rive qui est découverte par les marées moyennes et basses. La forme et l'étendue de cette flèche, qui est repoussée vers le large par un émissaire de la CUQ, sont constamment remaniées par les courants. C'est ainsi que l'on retrouve à la sortie de l'émissaire une large zone vaseuse constituée de silt argileux et de sable fin (près de la station d'échantillonnage n° 6; voir annexe 1). Par-delà la ligne des basses marées, des sables tassés et ridés recouvrent l'estran. La pente de l'estran est uniforme (environ 2,8 %) jusqu'à la limite des basses mers. À marée basse, l'estran est dégagé sur une distance d'environ 160 m. Par-delà la limite des basses mers, le profil semble légèrement concave (Pelletier, 1998).

### 2.5.4 *Végétation*

Le couvert végétal de la moitié est de l'estran est quasi inexistant en raison de la nature sableuse de celui-ci. La zone à la sortie des émissaires ainsi que la partie supérieure de l'estran sont fortement perturbées. La section ouest de l'estran est constituée d'un marais à scirpe d'Amérique et de Smith où croissent de la zizanie, de la menthe, de l'héliénie automnale, de la salicaire et de la potentille ansérine (Pelletier, 1998).

### 2.5.5 *Avifaune*

Des goélands à bec cerclé et des goélands à manteau noir (groupe pouvant atteindre 35 individus) ont fréquenté le site au cours de l'été 1999. De plus, on y a régulièrement observé trois couples de chevaliers grivelés, deux couples de pluviers kildir et quelques sternes. L'extrémité ouest de l'aire d'échantillonnage ainsi que le marais ont, quant à eux, été fréquentés par des canards colverts (jusqu'à 25 individus) et par un grand héron.

### 2.5.6 *Sources potentielles de contamination*

Les sources potentielles de contamination bactériologique susceptibles d'affecter le site (présence d'ouvrages de surverse et d'émissaires pluviaux) ont été retracées grâce aux informations transmises par M. Richard Bonin, surintendant à la gestion du réseau de la CUQ (communication personnelle) et grâce à une étude du Comité ZIP de Québec et Chaudière-Appalaches (Pelletier, 1998). On trouve quatre émissaires pluviaux en amont de la marina, le premier étant situé vis-à-vis de la station d'échantillonnage la plus en amont du site. Deux régulateurs du réseau d'égouts de la CUQ, de même que leurs structures de surverse, se trouvent dans l'anse au Foulon Ouest : le régulateur Beaulieu et son émissaire se situent à 300 mètres à l'ouest de la marina, soit à environ 30 mètres de notre dernière station d'échantillonnage, tandis que le régulateur Lemoine et son émissaire sont enfouis sous le brise-lames à l'ouest de la marina, à environ 30 mètres en aval de notre première station d'échantillonnage (annexe 1).

### 3 MÉTHODOLOGIE

#### 3.1 Prélèvements et analyses

Un suivi a été réalisé entre le 5 juillet et le 27 août 1999 au site de l'anse au Foulon Ouest. Du lundi au jeudi, les visites ont été faites deux fois par jour, soit à 8 h et 14 h, et le vendredi, une seule fois par jour, à 8 h. À chaque visite, six échantillons ont été prélevés selon le protocole d'Environnement-Plage, à l'aide de bouteilles stériles de polypropylène d'une capacité de 250 ml. L'échantillonnage du site a été effectué sur une longueur de 180 m, les points d'échantillonnage étant distants d'environ 30 m; trois échantillons étaient ainsi obtenus à 0,3 m de profondeur et trois autres à 1,2 m de profondeur selon la méthode du « W », c'est-à-dire en alternance selon la profondeur (MEF, 1998). La prise du premier échantillon se faisait toujours dans la section en aval du site, à une profondeur de 0,3 m. Deux échantillons supplémentaires de 500 ml ont été prélevés au centre du site, à des profondeurs de 0,3 m et 1,2 m afin d'y mesurer la turbidité. Les échantillons étaient immédiatement transportés au laboratoire du Ministère pour analyse. Les coliformes fécaux ont été dénombrés par filtration sur membrane et la turbidité mesurée par néphélométrie, selon les méthodes recommandées par l'American Public Health Association (APHA, 1995). La limite de quantification pour les coliformes fécaux était de 6 000 unités formatrices de colonies (UFC)/100 ml. L'adéquation entre les concentrations de coliformes fécaux et d'*Escherichia coli* (*E. coli*) a été vérifiée sur près de 10 % des échantillons. La confirmation a été obtenue à l'aide de trois tests biochimiques supplémentaires, soit celui du cytochrome-oxydase, de l'ortho-nitrophényl- $\beta$ -D-galacto-pyranoside (ONPG) et du 4-méthyl-umbelliféryl- $\beta$ -D-glucuronide (MUG).

La température de l'air et de l'eau, la vitesse et la direction du vent, la couverture nuageuse ainsi que la phase de marée, la force du courant et la hauteur des vagues étaient notées. Les données concernant les précipitations (quantité et durée) proviennent de la station pluviométrique automatisée d'Environnement Canada située sur le campus de l'Université Laval, à Québec. Des données relatives à l'achalandage et à l'utilisation du site étaient aussi recueillies : nombre de promeneurs, de baigneurs, d'embarcations, d'animaux domestiques et d'oiseaux présents.

#### 3.2 Modélisation

Les variables qui ont été considérées pour la modélisation sont de différents types (continues, catégoriques, ordinales dichotomiques). Les variables catégoriques ont été recodées à l'aide de variables dichotomiques (présence/absence); ainsi, une variable catégorique à k modalités a été recodée à l'aide de (k-1) variables dichotomiques (Neter et Wasserman, 1974). Comme on utilise (k-1) variables dichotomiques pour k modalités, la modalité présentant le moins d'effets directs (univariés) sur la variable réponse sera celle qui ne sera pas associée à une variable dichotomique. L'effet de la modalité non recodée à l'aide d'une variable dichotomique se retrouvera dans le paramètre  $\beta_0$  (ordonnée à l'origine). L'inventaire de toutes les variables, classées par type (dichotomiques ou quantitatives) et par sous-groupe, est rapporté au tableau 1.

La modélisation et toutes les autres analyses statistiques ont été réalisées en utilisant le logiciel de statistique SAS, version 6.12 (SAS, 1990). Le test d'autocorrélation de Durbin-Watson (Neter et Wasserman, 1974) a été préalablement effectué sur la variable réponse (coliformes fécaux), de même que sur les résidus des régressions, mais aucune autocorrélation n'a été décelée ( $\alpha = 0,05$ ). La normalité de toutes les variables considérées pour le modèle a été testée. Les variables dont le coefficient d'asymétrie était supérieur à 1, c'est-à-dire la plupart des variables quantitatives, ont été normalisées en utilisant la transformation logarithmique  $\log_{10}(x+1)$ . Par la suite, des analyses de variance et de corrélation de Spearman ont été faites pour la variable réponse et toutes les variables mesurées. La modélisation a été effectuée à l'aide de la régression multiple selon la méthode pas à pas (Sherrer, 1984). Les valeurs d'entrée et de demeure retenues pour le modèle étaient de 5 %. L'impact important de la phase de la marée sur les concentrations de coliformes fécaux nous a amenés à développer un modèle général et un modèle pour chaque phase de la marée.

Tableau 1 Liste exhaustive des variables considérées pour la modélisation

<u>Variables dichotomiques</u>			
CM	courant moyen	CN	couvert nuageux
CF	courant fort	CV	ciel variable
VNE	vent nord-est	MB	marée basse
VNO	vent nord-ouest	MEB	étales de marée basse
VO	vent ouest	MM	marée montante
VSO	vent sud-ouest		
VS	vent sud	PÊCHE	présence d'activités de pêche
VSE	vent sud-est		
VE	vent est		
<u>Variables quantitatives</u>			
CF	coliformes fécaux (UFC/100 ml)	TEMPE	température de l'eau (°C)
FV	force des vents (Beaufort)	TEMPA	température de l'air (°C)
HV	hauteur des vagues (cm)	TURB	turbidité (UNT)
AM	amplitude de la marée (m)		
PLAIS	nombre d'embarcations de plaisance	GOGO	nombre de goélands
CARGO	nombre de cargos	AO	nombre d'autres espèces d'oiseaux
BAIGN	nombre de baigneurs	TO	nombre total d'oiseaux
ANIM	nombre d'animaux		
IP1	intensité des précipitations de la veille (mm/h)	IP2	intensité des précipitations du jour - 2 (mm/h)
PR1	précipitations des 24 dernières heures (mm)	SP2	somme des précipitations des 2 derniers jours (mm)
IP3	intensité des précipitations du jour - 3 (mm/h)	IP4	intensité des précipitations du jour - 4 (mm/h)
SP3	somme des précipitations des 3 derniers jours (mm)	SP4	somme des précipitations des 4 derniers jours (mm)
IP5	intensité des précipitations du jour - 5 (mm/h)	IP6	intensité des précipitations du jour - 6 (mm/h)
SP5	somme des précipitations des 5 derniers jours (mm)	SP6	somme des précipitations des 6 derniers jours (mm)

## 4 QUALITÉ BACTÉRIOLOGIQUE DE L'EAU

Les coliformes fécaux constituent un bon indicateur de la contamination d'origine fécale affectant le site de l'anse au Foulon, puisque 86 % des coliformes fécaux dénombrés sont en fait du *E. coli*. Les concentrations en coliformes fécaux mesurées à l'anse au Foulon Ouest varient grandement d'une journée à l'autre et même à l'intérieur d'une même journée (figure 1). La moyenne géométrique saisonnière, calculée sur l'ensemble des données (N = 432), est de 208 UFC/100 ml, ce qui correspond à une cote D (plage polluée et fermée) selon le système de classification du programme Environnement-Plage. Le critère pour la baignade (200 UFC/100 ml) n'a été respecté que 12 jours sur 40 au cours de l'été 1999; la fréquence à laquelle la plage aurait dû être fermée atteignait ainsi 70 %. La qualité bactériologique est cependant meilleure au montant (162 UFC/100 ml, N = 120) qu'au baissant (326 UFC/100 ml, N = 312).

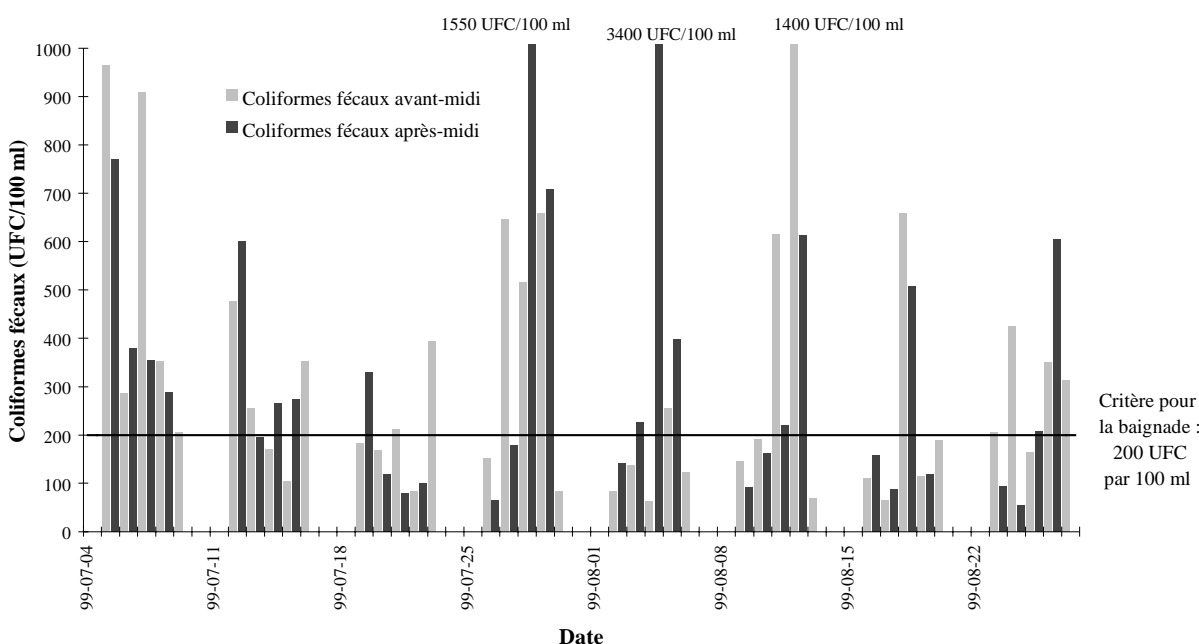


Figure 1 Moyennes géométriques des concentrations en coliformes fécaux mesurées lors de chaque visite réalisée à l'anse au Foulon Ouest

## 5 RÉSULTATS DE LA MODÉLISATION

Trois modèles ont été élaborés afin d'expliquer les concentrations en coliformes fécaux observées : un premier modèle général qui peut être utilisé tant à marée montante qu'à marée baissante, un second qui se réfère à la marée montante ou à l'étale de marée haute et un troisième qui estime les concentrations de coliformes fécaux pendant le baissant ou l'étale de marée basse.



## 5.1 Modèle général

Le modèle général explique un peu plus de 53 % de la variance des concentrations en coliformes fécaux (transformation logarithmique). L'intensité des précipitations au cours des 24 heures précédant l'échantillonnage (transformation logarithmique) explique 27 % de la variance, alors que l'ajout de la phase de la marée (montant : MM = 1; baissant : MM = 0) en explique un 18 % supplémentaire; ces deux variables combinées rendent ainsi compte de près de 45 % de la variance observée. Le nombre d'animaux domestiques présents sur le site (transformation logarithmique) ainsi que l'amplitude de la marée le jour de l'échantillonnage permettent d'expliquer un 9 % supplémentaire de la variance.

$$\text{Log}_{10}(\text{CF}+1) = 1,794 + 0,580\text{log}_{10}(\text{IP}+1) - 0,274(\text{MM}) + 0,561\text{log}_{10}(\text{ANIM}+1) + 0,111(\text{AM})$$

$$R^2 = 0,533$$

$$R^2 \text{ partiels : } \begin{array}{l} \log (\text{Intensité précipitations de la veille} + 1) = 0,27 \\ \text{Phase de la marée} = 0,177 \\ \log (\text{Nbre d'animaux} + 1) = 0,051 \\ \text{Amplitude de la marée} = 0,035 \end{array}$$

La figure 2 exprime graphiquement le modèle général. Le nuage de points des concentrations mesurées en fonction des concentrations prédites se situe à l'intérieur de l'intervalle de confiance à 95 % de la droite de régression.

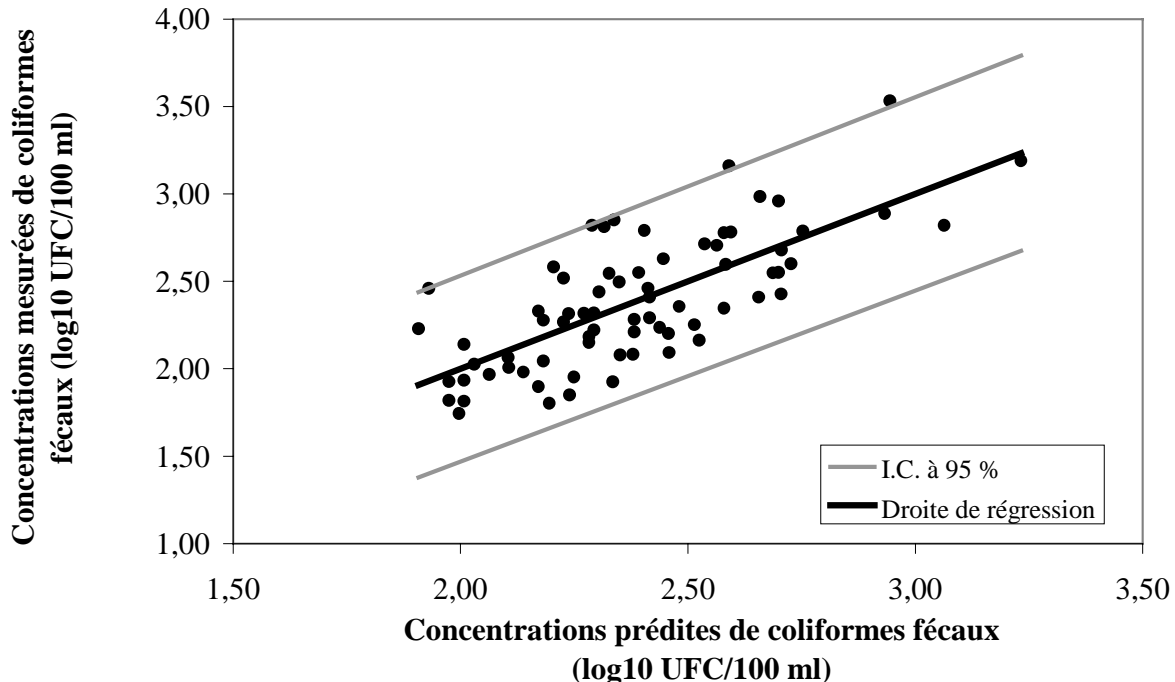


Figure 2 Droite de régression multiple du modèle prédictif général des concentrations en coliformes fécaux à l'anse au Foulon Ouest

Nous avons déterminé l'intensité minimale de pluie, tombée au cours des 24 dernières heures, nécessaire pour générer un dépassement du critère de qualité relatif à la baignade (200 coliformes fécaux/100 ml). Ainsi, à amplitude de marée moyenne (4,36 m) et en l'absence d'animaux domestiques sur le site, l'intensité des précipitations qui entraînerait un dépassement du critère, à la marée montante, est d'environ 2,28 mm/h. Une intensité de pluie de 0,11 mm/h suffirait pour qu'il y ait dépassement du critère lors de la marée baissante.

Nous avons également pu déterminer le bruit de fond des teneurs en coliformes fécaux pour chaque phase de la marée. Ainsi, par temps sec et en l'absence d'animaux domestiques sur la plage, il est de 100 coliformes fécaux/100 ml à marée montante et de 189 coliformes fécaux/100 ml à marée baissante. Cette situation est probablement causée par des débordements d'eaux usées non traitées qui surviennent à cause de raccordements illégaux au réseau pluvial ou à la suite d'un mauvais fonctionnement des ouvrages de surverse par temps sec. La source de contamination est probablement localisée en amont de la plage, car la contamination est plus importante à marée baissante qu'à marée montante.

## 5.2 Modèle à marée montante

Le modèle développé pour le montant explique près de 80 % de la variance des concentrations en coliformes fécaux (transformation logarithmique). L'intensité des précipitations au cours des 24 heures précédant l'échantillonnage (transformation logarithmique) explique près de 53 % de la variance, alors que l'ajout du nombre total d'oiseaux présents sur le site en explique un 17 % supplémentaire; ces deux variables combinées rendent ainsi compte de près de 70 % de la variance observée. La somme des précipitations des trois jours (transformation logarithmique) précédant la journée de l'échantillonnage permet d'expliquer un 10 % supplémentaire de la variance.

$$\text{Log}_{10}(\text{CF}+1) = 1,233 + 0,460\text{log}_{10}(\text{IP}1+1) + 0,536\text{log}_{10}(\text{TO}+1) + 0,234\text{log}_{10}(\text{SP}3+1)$$

$$R^2 = 0,7917$$

$$R^2 \text{ partiels : } \begin{array}{l} \log (\text{Intensité précipitations de la veille} + 1) = 0,528 \\ \log (\text{Nbre total d'oiseaux} + 1) = 0,165 \\ \log (\text{Somme précipitations des 3 derniers jours} + 1) = 0,104 \end{array}$$

Nous avons déterminé le bruit de fond des teneurs en coliformes fécaux, pendant le montant, en utilisant ce modèle. Ainsi, en l'absence de pluie dans les trois jours précédant l'échantillonnage, et considérant la présence de 14 oiseaux sur le site (ce qui correspond au nombre moyen d'oiseaux présents sur le site lors des journées d'échantillonnage), la concentration en coliformes fécaux serait de 73 UFC/100 ml. Nous avons également pu déterminer l'intensité de pluie tombée au cours des 24 dernières heures nécessaire pour générer un dépassement du critère relatif à la baignade. En considérant la présence de 14 oiseaux sur le site, il suffit d'une intensité de 1 mm/h si SP3 est égale ou supérieure à 20 mm, de 2 mm/h si SP3 est comprise entre 7,5 mm et 20 mm et de 2,5 mm/h si SP3 varie entre 5 mm et 7,5 mm.

La figure 3 exprime graphiquement le modèle élaboré à marée montante. Le nuage de points des concentrations mesurées en fonction des concentrations prédites se situe à l'intérieur de l'intervalle de confiance à 95 % de la droite de régression.

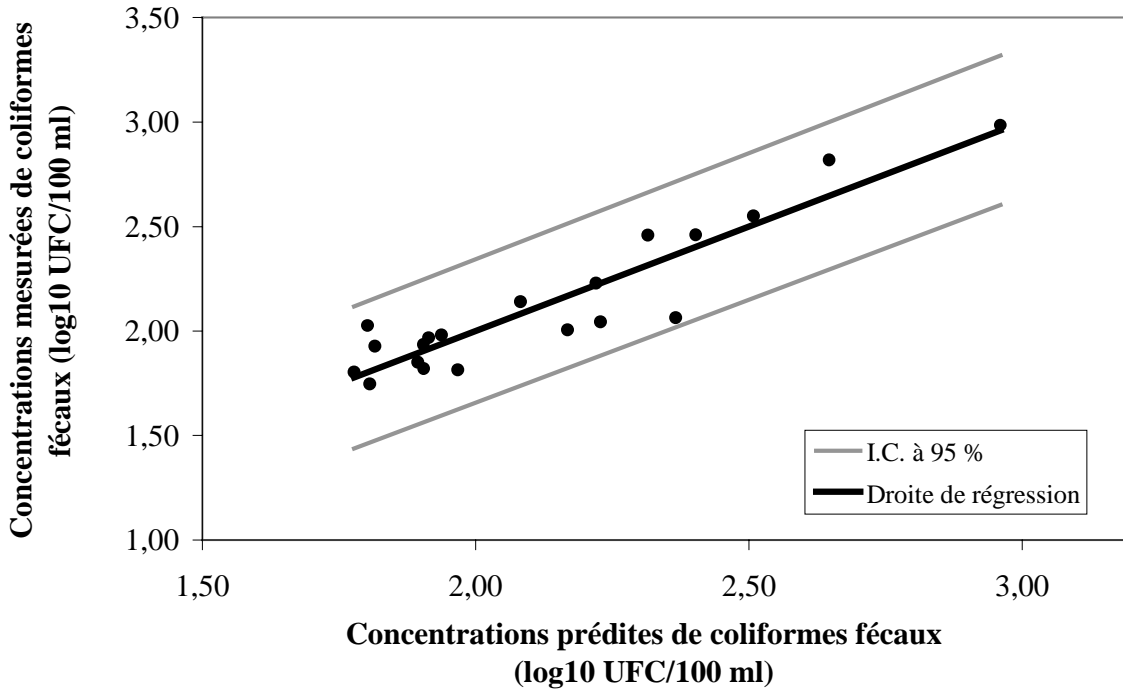


Figure 3 Droite de régression multiple du modèle prédictif à marée montante des concentrations en coliformes fécaux à l'anse au Foulon Ouest

### 5.3 Modèle à marée baissante

Le modèle développé pour le baissant permet d'expliquer un peu plus de 44 % de la variance du logarithme des concentrations en coliformes fécaux. L'intensité des précipitations au cours des 24 heures précédant l'échantillonnage (transformation logarithmique) explique près de 27 % de la variance, alors que l'ajout de l'amplitude de la marée en explique un 12 % supplémentaire; ces deux variables combinées rendent ainsi compte de près de 39 % de la variance observée. Le nombre d'animaux domestiques présents sur le site (transformation logarithmique) explique quant à lui un 6 % supplémentaire de la variance.

$$\text{Log}_{10}(\text{CF}+1) = 1,665 + 0,525\text{log}_{10}(\text{IP}+1) + 0,143(\text{AM}) + 0,535\text{log}_{10}(\text{ANIM}+1)$$

$$R^2 = 0,442$$

$$R^2 \text{ partiels : } \begin{array}{l} \text{log (Intensité précipitations de la veille + 1)} = 0,267 \\ \text{Amplitude de la marée} = 0,120 \\ \text{log (Nbre d'animaux + 1)} = 0,055 \end{array}$$

Nous avons déterminé, à l'aide de ce modèle, l'intensité minimale de pluie, tombée au cours des 24 heures précédant l'échantillonnage, nécessaire pour générer un dépassement du critère de qualité relatif à la baignade (200 coliformes fécaux/100 ml). Ainsi, à amplitude de marée moyenne (4,36 m) et en l'absence d'animaux domestiques sur le site, l'intensité de précipitations qui entraînerait un dépassement du critère, lors de la marée baissante, est d'environ 0,07 mm/h.

Nous avons également déterminé le bruit de fond des teneurs en coliformes fécaux, pendant le baissant, en utilisant ce modèle. En l'absence de pluie au cours des trois journées précédant l'échantillonnage et en l'absence d'animaux domestiques sur le site, nous avons calculé un bruit de fond de 192 coliformes fécaux/100 ml. Ce bruit de fond important confirme celui établi pour le modèle général lorsque la marée est baissante.

La figure 4 exprime graphiquement le modèle élaboré à marée baissante. Le nuage de points des concentrations mesurées en fonction des concentrations prédites se situe en très grande partie à l'intérieur de l'intervalle de confiance, à 95 % de la droite de régression.

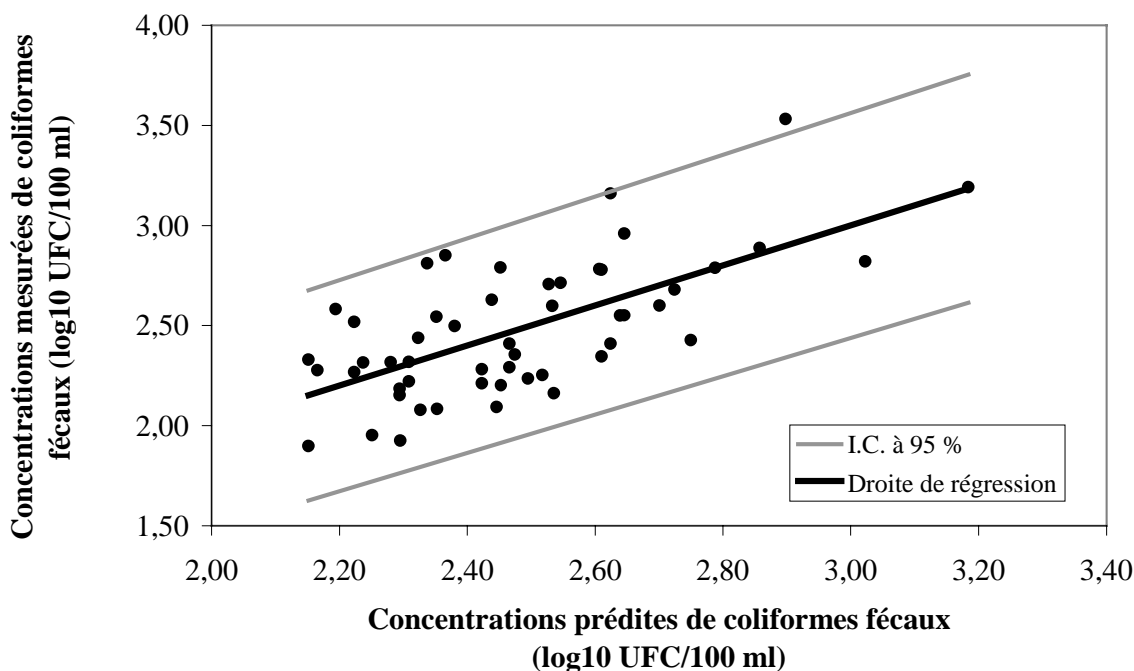


Figure 4 Droite de régression multiple du modèle prédictif à marée baissante des concentrations en coliformes fécaux à l'anse au Foulon Ouest

## 6 DISCUSSION

Le tableau 2 présente les coefficients de corrélation de Spearman entre les concentrations de coliformes fécaux mesurées et les différentes variables explicatives. L'évolution journalière des principales variables explicatives est présentée à l'annexe 2. Certaines variables explicatives non corrélées significativement ( $P \geq 0,05$ ) avec les coliformes fécaux peuvent être retenues dans un des modèles considérés et, inversement, certaines variables fortement corrélées avec les décomptes de coliformes fécaux peuvent ne pas l'être. Une variable explicative non corrélée de façon significative avec la variable réponse peut en effet contribuer fortement à expliquer quelques valeurs seulement et ainsi être conservée dans le modèle. Cependant, la contribution de

Tableau 2 Coefficients de corrélation de Spearman ( $P < 0,05$ ) entre les concentrations de coliformes fécaux et les différentes variables explicatives

Variabiles explicatives	Général (N = 72)	Montant (N = 20)	Baissant (N = 52)
MM (marée montante)	r = - 0,445 P = 0,0001	n.p. <sup>2</sup>	n.p.
MB (marée baissante)	r = 0,362 P = 0,0018	n.p.	n.p.
IP1 (intensité précipitations de la veille)	r = 0,389 P = 0,0007	r = 0,486 P = 0,0297	r = 0,397 P = 0,0035
SP2 ( $\Sigma$ précipitations 2 derniers jours)	r = 0,290 P = 0,0137	n.s.	r = 0,286 P = 0,0399
SP3 ( $\Sigma$ précipitations 3 derniers jours)	r = 0,243 P = 0,0397	r = 0,601 P = 0,0051	n.s.
SP4 ( $\Sigma$ précipitations 4 derniers jours)	n.s. <sup>1</sup>	n.s.	n.s.
SP5 ( $\Sigma$ précipitations 5 derniers jours)	n.s.	r = 0,481 P = 0,0316	n.s.
SP6 ( $\Sigma$ précipitations 6 derniers jours)	n.s.	r = 0,635 P = 0,0026	n.s.
VSE (vent du sud-est)	r = 0,356 P = 0,0021	n.s.	r = 0,402 P = 0,0031
VO ( vent de l'ouest)	n.s.	r = - 0,491 P = 0,0281	n.s.
ANIM (nombre d'animaux)	r = 0,275 P = 0,0195	n.s.	n.s.
TO (nombre total d'oiseaux)	n.s.	r = 0,619 P = 0,0036	n.s.
GOGO (nombre de goélands)	n.s.	r = 0,655 P = 0,0017	n.s.
AO (nombre d'oiseaux autres)	n.s.	r = 0,584 P = 0,0069	n.s.

<sup>1</sup> Non significatif ( $P \geq 0,05$ )

<sup>2</sup> Non pertinent

ces variables au pouvoir explicatif du modèle est habituellement faible; c'est le cas notamment de l'amplitude de la marée (AM) qui a été retenue dans le modèle général, mais qui ne contribue qu'à expliquer que 3,5 % de la variance observée des concentrations en coliformes fécaux (transformation logarithmique). Dans le modèle élaboré pour la marée baissante, le pouvoir explicatif de cette variable atteint cependant 12 %. Il faut noter que l'amplitude de la marée présenterait une corrélation significative avec les concentrations en coliformes fécaux à un niveau de signification de 10 % ( $P = 0,0827$  pour le modèle général;  $P = 0,0651$  pour le modèle à marée baissante). Une variable fortement corrélée avec la variable réponse peut, à l'inverse, ne pas être retenue dans un modèle parce qu'une autre variable, qui lui est corrélée, a déjà été retenue. C'est le cas du nombre de goélands (GOGO) dans le modèle élaboré pour la marée montante; cette variable n'a pas été retenue dans le modèle, mais elle est fortement corrélée au nombre total d'oiseaux (TO) qui, lui, a été retenu.

Les concentrations en coliformes fécaux sont corrélées avec la variable VSE (vent du sud-est) et inversement corrélées avec la variable VO (vent de l'ouest), au montant. Ces variables n'ont cependant pas été retenues dans les modèles développés. Dans le cadre de la présente étude, ces variables ne présentent pas de corrélation statistiquement significative avec l'intensité des précipitations de la veille ou avec la somme des précipitations des derniers jours. La fréquence de ces vents a été trop faible pour qu'on puisse mettre en évidence une telle relation. Les vents à dominance est sont généralement associés à des précipitations qui, elles, sont fortement corrélées avec les concentrations en coliformes fécaux; le phénomène inverse se produit avec les vents à dominance ouest.

Certaines variables peuvent présenter une corrélation fortuite, mais statistiquement significative avec les concentrations en coliformes fécaux, et n'avoir aucun lien de causalité avec la variable réponse. C'est fort probablement le cas pour le nombre d'animaux domestiques présents sur le site (ANIM), car leur présence est très ponctuelle (7 visites sur 72) et leur nombre très faible (entre 0 et 3 chiens). Dans le modèle général et dans le modèle élaboré à marée baissante, cette variable ne contribue qu'à expliquer que 5 % de la variance observée dans les concentrations en coliformes fécaux (transformation logarithmique).

Dans le cadre d'une étude réalisée sur plusieurs plages du lac Huron (Aldom *et al.*, 1998), aucune relation significative entre le nombre de chiens présents sur les sites et les concentrations en *E. coli* n'avait été mise en évidence. Contrairement à Aldom *et al.* (1998), nous n'avons pas trouvé de corrélation significative entre la turbidité, la force des vents, la hauteur des vagues et les concentrations en coliformes fécaux. La configuration des sites étudiés (pente de la plage, type de substrat, exposition aux vents, etc.) ainsi que les sources de contamination pouvant les affecter expliquent cette différence. Par contre, nous avons mis en évidence une relation significative entre le nombre de goélands présents et la qualité bactériologique de l'eau du site au montant.

Par temps sec, les bruits de fond des teneurs en coliformes fécaux, déterminés à l'aide du modèle général et des modèles propres à chaque phase de marée, sont très cohérents : au montant, les valeurs obtenues en utilisant le modèle général et le modèle spécifique sont respectivement de 100 UFC/100 ml et 73 UFC/100 ml, alors qu'au baissant ces valeurs sont respectivement de 189 UFC/100 ml et 192 UFC/100 ml. Pendant le baissant, l'intensité minimale de pluie, tombée

au cours des 24 heures précédant l'échantillonnage et nécessaire pour générer un dépassement du critère de qualité relatif à la baignade (200 coliformes fécaux/100 ml), est de 0,11 mm/h pour le modèle général et de 0,07 mm/h pour le modèle à marée baissante. L'utilisation du modèle général ou d'un modèle propre à une phase de marée conduit donc à des résultats équivalents. Le modèle à marée montante, qui a été développé à partir d'un nombre restreint de données, pourrait toutefois être amélioré.

## 7 CONCLUSION

La qualité bactériologique de l'eau à l'anse au Foulon Ouest varie grandement d'une journée à l'autre et n'est pas adéquate, dans l'état actuel des infrastructures d'assainissement, pour permettre une baignade ne présentant pas de risques pour la santé humaine. Par temps sec et pendant la phase de marée montante, les concentrations en coliformes fécaux sont souvent inférieures au critère de qualité, mais pendant le baissant le critère de qualité est presque atteint et une très faible pluie suffit pour qu'il soit dépassé.

Les modèles statistiques développés dans le cadre de cette étude présentent un bon pouvoir prédictif et reposent essentiellement sur la phase de la marée et sur l'intensité des précipitations au cours des 24 heures précédant l'échantillonnage. L'élaboration de ce type de modèles, basés sur les précipitations et propres au site étudié, exige un effort d'échantillonnage important. En raison de leur nature statistique, ces modèles ne peuvent faire de distinction entre les sources de contamination ponctuelles ou diffuses et ils n'incorporent pas explicitement les phénomènes d'advection, de transport et de décroissance bactérienne. L'utilisation de ce type de modèle constituerait cependant une aide précieuse pour l'établissement de règles pouvant assurer la gestion d'une plage; il serait ainsi possible, si le niveau de contamination prédit par le modèle se situe au-delà du critère de qualité, de fermer la plage de façon préventive. Dans le cas où le niveau de contamination prédit est important mais se situe en deçà du critère de qualité, une confirmation de la valeur prédite pourrait être obtenue au moyen d'un échantillonnage. Une gestion préventive des plages du Saint-Laurent contribuerait grandement à diminuer l'exposition de la population à des eaux qui présentent une mauvaise qualité bactériologique.

## 8 RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ALDOM, J., E. JAMIESON, T. PROUT, M. WALSH, D. VAN BAKEL, R. GRIFFITHS et G. PALMATEER, 1998. *Rapid Fecal Coliform and Escherichia coli Detection in the Recreational Waters of Lake Huron Beaches and an Inland Beach in 1997*, Ausable Bayfield Conservation Authority and the Tri-Municipal Council, Ontario Ministry of the Environment and GAP EnviroMicrobial Services, Inc., rapport préparé pour Santé Canada, 31 p., 1 annexe.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (APHA), 1995. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 19<sup>e</sup> éd., Washington (D.C.), American Public Health Association, American Water Works Association et Water Environment Federation, 10 sections.

GAUVIN, D., E. DEWAILLY, G. LEBEL et G. LE ROUZÈS, 1998. *Évaluation de la qualité bactériologique des eaux du fleuve Saint-Laurent à certains sites potentiels de baignade dans la région de Québec*, Direction de la santé publique de Québec et ministère de l'Environnement et de la Faune, Québec, 18 p., 3 annexes.

GIRAM, 1998. *La baignade dans le Saint-Laurent : prudence et patience*, Saint-Laurent Vision 2000, Québec, 48 p., 1 annexe.

HÉBERT, S., 2000. *Évaluation de la qualité bactériologique de sites potentiels de baignade dans le Saint-Laurent, été 1999*, Direction du suivi de l'état de l'environnement, ministère de l'Environnement, Québec, 11 p., 4 annexes.

LARUE, A., J. GRONDIN, B. LÉVESQUE, R. LARUE et D. BOUDREAUULT, 1996. *La baignade dans le secteur d'eau douce du Saint-Laurent : discours et pratiques à propos des risques à la santé*, Centre de santé publique de Québec et Direction régionale de santé publique – Montérégie, 109 p.

MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT ET DE LA FAUNE (MEF), 1998. *Guide d'application du programme Environnement-Plage 1998*, Direction de la coordination opérationnelle, ministère de l'Environnement et de la Faune, Québec, 8 sections, 8 annexes.

NETER, J. et W. WASSERMAN, 1974. *Applied linear statistical models*, Irwin, Homewood, 842 p.

PELLETIER, G., 1998. *Création d'une plage publique à l'anse au Foulon : étude de préféabilité de processus d'ensablement*, Comité ZIP de Québec et Chaudière-Appalaches et ministère de l'Environnement et de la Faune, 76 p., 2 annexes.

ROBILLARD, D. et R. BONIN, 1999. *Programme de surveillance de la qualité des eaux des plages, 1998*, Service de l'environnement, Communauté urbaine de Québec, 26 p., 4 annexes.

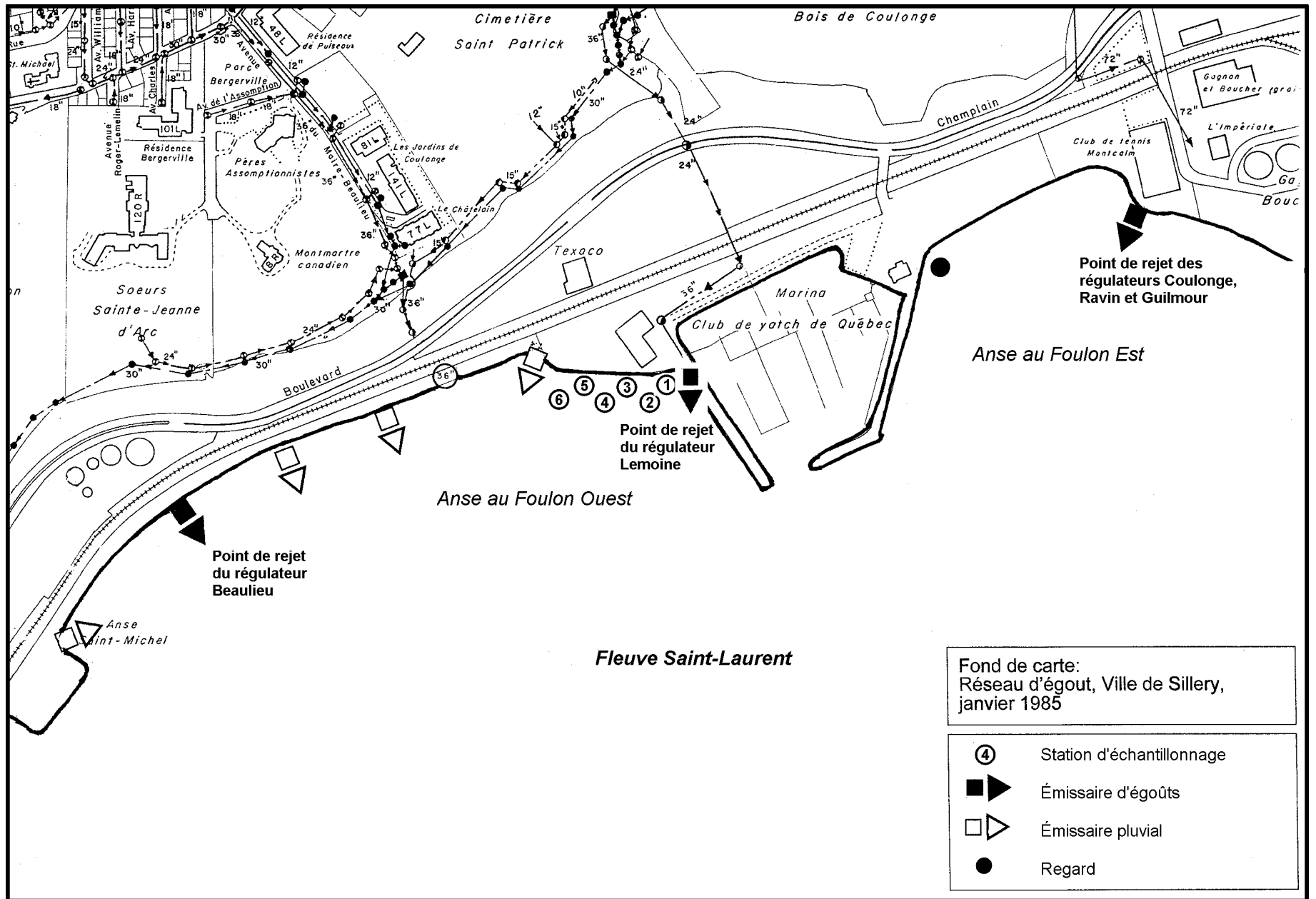
ROBILLARD, D. et R. BONIN, 2000. *Programme de surveillance de la qualité des eaux riveraines de la Communauté urbaine de Québec, Rapport annuel 1999*, Service de l'environnement, Communauté urbaine de Québec, 16 p., 2 annexes.

SAS, 1990. *SAS/STAT User's Guide*, version 6.12, Cary, NC, SAS Institute Inc., 957 p.

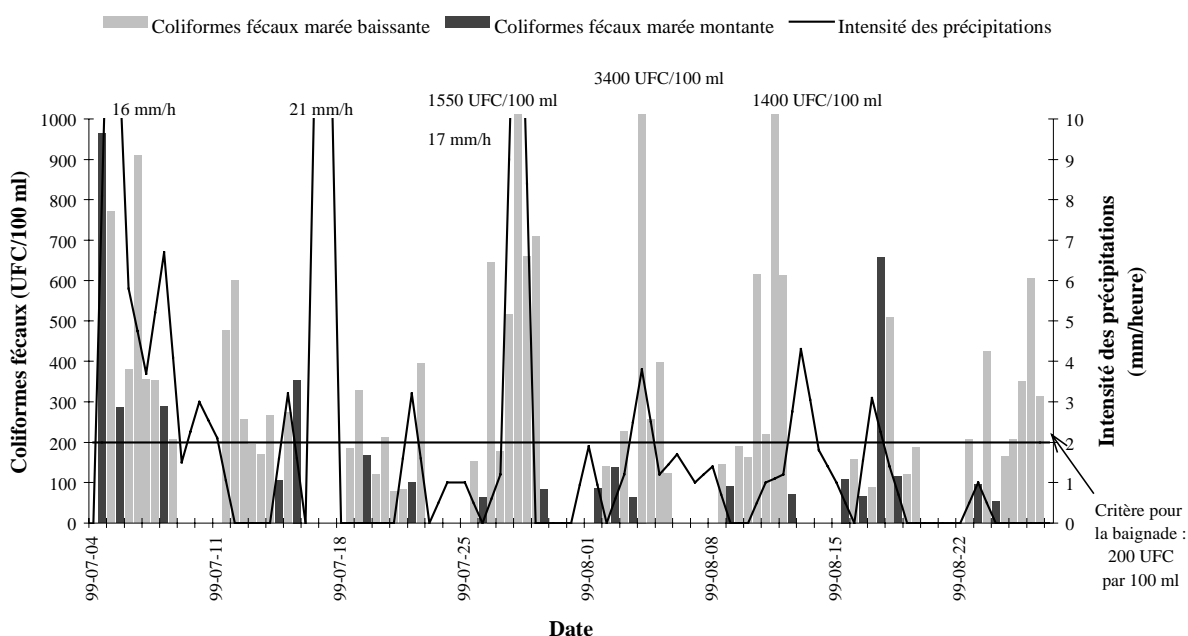
SHERRER, B., 1984. *Biostatistique*, Boucherville, Gaëtan Morin, 850 p.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA), 1999. *Review of Potential Modeling Tools and Approaches to Support the BEACH Program*, Washington (D.C.), United States Environmental Protection Agency, Office of Science and Technology, Standards and Applied Science Division, 35 p., 2 annexes.

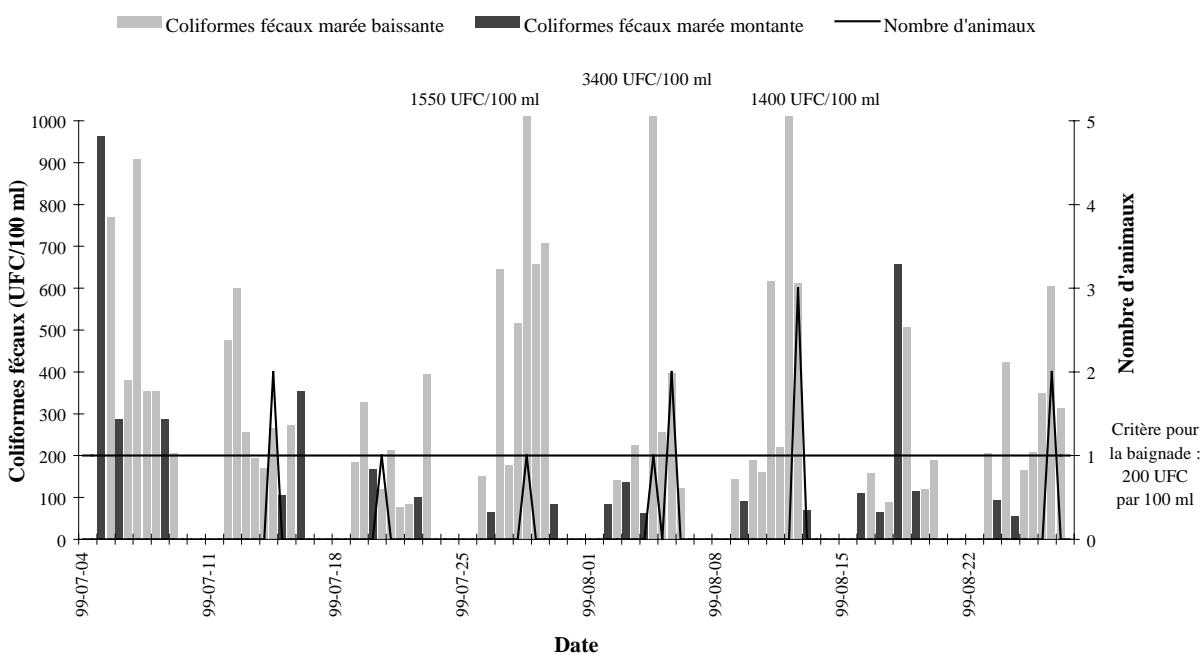




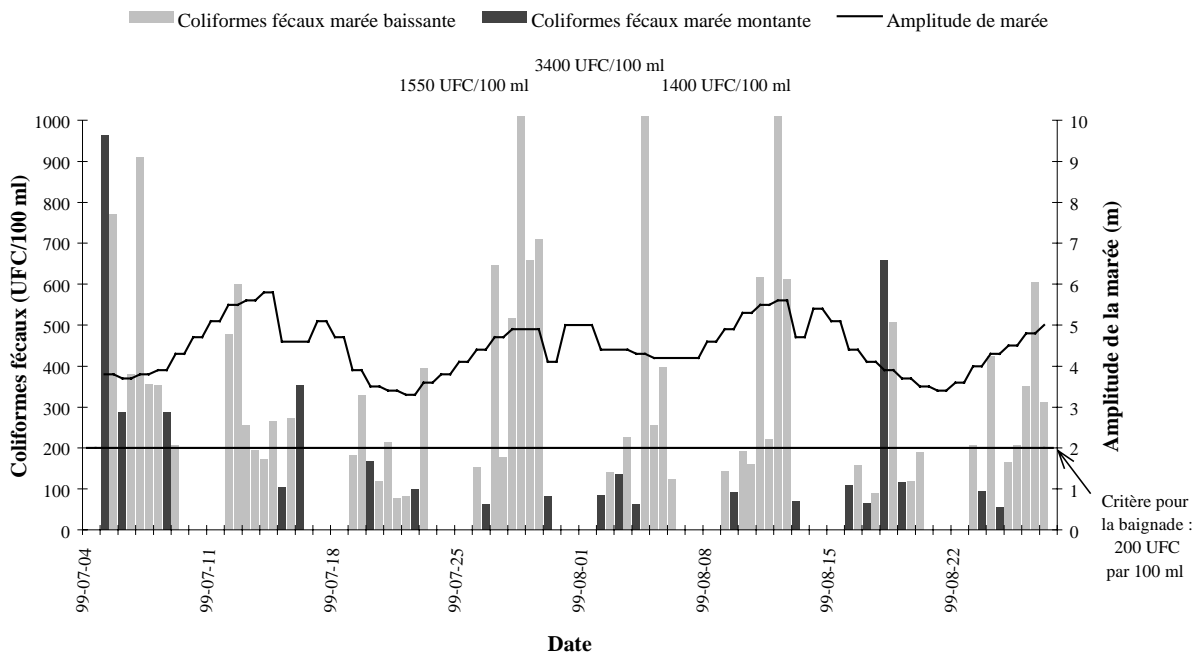
Annexe 1 Localisation des ouvrages de surverse et des émissaires pluviaux à proximité du site de l'anse au Foulon



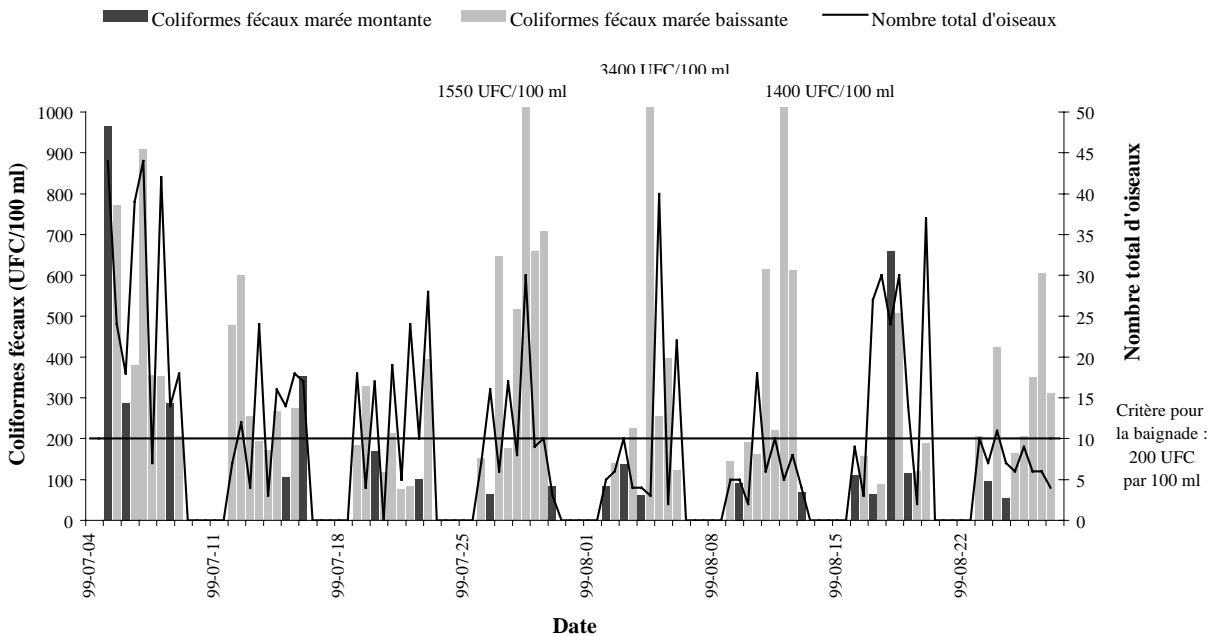
Annexe 2.1 Moyennes géométriques journalières de la concentration en coliformes fécaux en fonction de l'intensité des précipitations de la veille à l'anse au Foulon Ouest



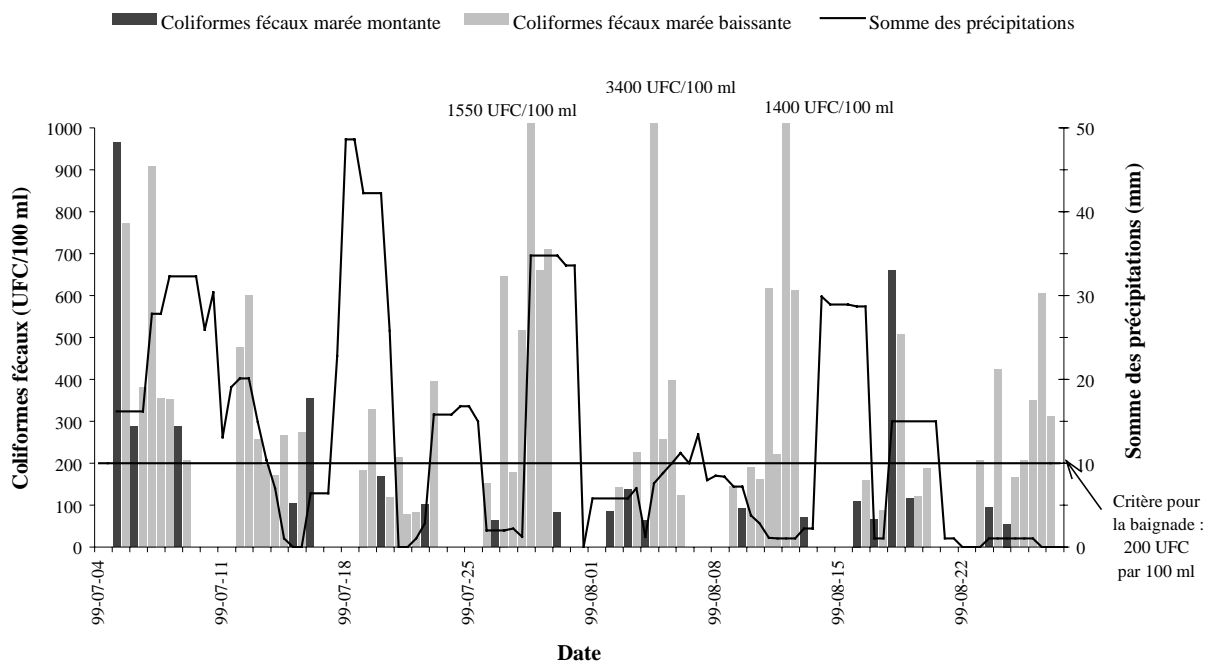
Annexe 2.2 Moyennes géométriques journalières de la concentration en coliformes fécaux en fonction du nombre d'animaux présents sur la plage à l'anse au Foulon Ouest



Annexe 2.3 Moyennes géométriques journalières de la concentration en coliformes fécaux en fonction de l'amplitude de la marée à l'anse au Foulon Ouest



Annexe 2.4 Moyennes géométriques journalières de la concentration en coliformes fécaux en fonction du nombre total d'oiseaux de rivage présents à l'anse au Foulon Ouest



Annexe 2.5 Moyennes géométriques journalières de la concentration en coliformes fécaux en fonction de la somme des précipitations des trois journées précédant l'échantillonnage à l'anse au Foulon Ouest