

**MODÉLISATION DE LA
QUALITÉ BACTÉRIOLOGIQUE
D'UN SITE POTENTIEL DE BAINNADE
À LA BAIE DE BEAUPORT, QUÉBEC**

ÉTÉ 2002

Par :

Serge Hébert
Direction du suivi de l'état de l'environnement
Ministère de l'Environnement du Québec

Jean Lacoursière
Association pour la sauvegarde de la baie de Beauport

Juin 2004

Chargé de projet

Jean Lacoursière¹

Auteurs

Serge Hébert²

Jean Lacoursière

Traitements statistiques

Serge Hébert

Analyses en laboratoire

Laboratoire de la Ville de Québec³

Révision scientifique

Jean Painchaud²

Marc Simoneau²

Mise en page

Nathalie Milhomme²

Révision linguistique

Isabelle Brochu⁴

¹ Association pour la sauvegarde de la baie de Beauport
C. P. 5187
Beauport (Québec) G1E 6P4

² Direction du suivi de l'état de l'environnement
Ministère de l'Environnement
Édifice Marie-Guyart, 7^e étage
675, boul. René-Lévesque Est
Québec (Québec) G1R 5V7

³ Service de l'environnement
Division des laboratoires
210, av. Saint-Sacrement
Québec (Québec) G1N 3X6

⁴ Direction des communications
Ministère de l'Environnement
Édifice Marie-Guyart, 29^e étage
675, boul. René-Lévesque Est
Québec (Québec) G1R 5V7

REMERCIEMENTS

En premier lieu, nous voulons exprimer notre reconnaissance à François Proulx et à Frédéric Aubin, de la Division des laboratoires du Service de l'environnement de la Ville de Québec. Pendant neuf semaines, ils ont procédé à l'analyse des concentrations en coliformes fécaux de 522 échantillons d'eau. Cette étude n'aurait pu voir le jour sans leur aide. Nous tenons aussi à remercier Michel Lagacé et René Gélinas, du Service de l'environnement de la Ville de Québec, d'avoir les premiers ouvert la porte à cette collaboration.

Nous désirons également souligner l'appui de Michel Guimond, député fédéral de Beauport–Montmorency–Côte-de-Beaupré–Île d'Orléans, ainsi que de Développement des ressources humaines Canada, qui ont accordé une aide financière pour l'embauche d'une étudiante d'été, dont la tâche principale consistait à prélever les échantillons d'eau et à recueillir les données environnementales nécessaires. Nous remercions chaleureusement cette étudiante, Janie Poudrier, pour sa rigueur et son souci du travail bien fait. Merci également à Daniel Guay, de l'Association pour la sauvegarde de la baie de Beauport, pour s'être chargé de la recherche de partenaires et du recrutement de l'étudiante, et à Jean Robert, de l'Association nautique de la baie de Beauport, pour avoir soutenu cette initiative.

Il importe également de souligner le soutien financier de Jean-François Simard, député provincial de Montmorency et ministre délégué à l'Environnement et à l'Eau au moment de l'étude, qui a servi au transport des échantillons d'eau de la baie de Beauport au Centre analytique de la Ville de Québec.

Enfin, nous sommes extrêmement reconnaissants envers Jacques Dupont, chef du Service de l'information sur les milieux aquatiques du ministère de l'Environnement du Québec, pour avoir prêté les services de Serge Hébert, spécialiste en qualité de l'eau, pour l'analyse des données permettant d'établir des relations entre la qualité bactériologique de l'eau et certains facteurs environnementaux et météorologiques.

Jean Lacoursière
Association pour la sauvegarde de la baie de Beauport

MODÉLISATION DE LA QUALITÉ BACTÉRIOLOGIQUE D'UN SITE POTENTIEL DE BAINNADE À LA BAIE DE BEAUPORT, QUÉBEC, ÉTÉ 2002

Référence : Hébert, S. et J. Lacoursière, 2004. *Modélisation de la qualité bactériologique d'un site potentiel de baignade à la baie de Beauport, Québec, été 2002*, Québec, ministère de l'Environnement, Direction du suivi de l'état de l'environnement et Association pour la sauvegarde de la baie de Beauport, envirodoq n° ENV/2004/0140, rapport n° QE/143, 9 p.

RÉSUMÉ

Une étude portant sur la qualité bactériologique de l'eau à la plage de la baie de Beauport a été menée entre le 17 juin et le 16 août 2002. Deux visites ont été effectuées quotidiennement du lundi au vendredi, la première à 8 h et la seconde à 13 h, pour un total de 87 visites. Lors de chacune des visites, six échantillons d'eau ont été prélevés selon le protocole d'Environnement-Plage du ministère de l'Environnement du Québec. L'échantillonnage du site a été effectué sur une longueur de 200 m, les points de prélèvement étant distants d'environ 40 m.

Les concentrations en coliformes fécaux mesurées ont varié grandement d'une journée à l'autre et à l'intérieur d'une même journée. La moyenne géométrique saisonnière, calculée sur l'ensemble des visites (87), a été de 150 UFC/100 ml, ce qui correspond à une cote C (plage présentant une qualité bactériologique passable) selon le système de classification du programme Environnement-Plage. En avant-midi (45 visites; moyenne géométrique de 196 UFC/100 ml), la qualité bactériologique était moins bonne qu'en après-midi (42 visites; moyenne géométrique de 113 UFC/100 ml). En avant-midi, le critère de qualité lié à la baignade (200 UFC/100 ml) a été respecté 55,6 % du temps, alors qu'en après-midi il a été respecté 71,4 % du temps. La fréquence des journées où le critère a été respecté à la fois le matin et l'après-midi a été de 44,4 % (20 jours sur 45).

Un modèle prédictif expliquant 42 % de la variance des concentrations en coliformes fécaux mesurées a été développé. Il est basé sur la longueur de l'estran au moment de l'échantillonnage, la quantité de précipitations mesurées à l'aéroport de Québec pendant les 24 heures précédant l'échantillonnage, le moment de l'échantillonnage (8 h ou 13 h) et la hauteur des vagues au moment de l'échantillonnage. Les concentrations en coliformes fécaux prédites présentent un coefficient de corrélation de 0,65 avec les concentrations mesurées.

Selon le système de classement du programme Environnement-Plage et la fréquence à laquelle le critère de qualité relatif à la baignade a été respecté, le potentiel actuel du site pour la baignade est évalué comme étant respectivement faible, bon ou très faible, selon que l'on considère les résultats du matin, de l'après-midi ou de l'ensemble de la journée. La mauvaise qualité bactériologique observée le matin est probablement liée à la présence de goélands sur le site au cours de la nuit et à l'aube.

Afin d'améliorer la qualité bactériologique des eaux de la baie de Beauport, il faudrait dans un premier temps éloigner les goélands du secteur et, dans un deuxième temps, réaliser des interventions visant à diminuer les débordements d'eaux usées non traitées survenant par temps de pluie à 18 structures de surverse localisées dans le secteur. Au cours de l'été 2002, la qualité bactériologique du site n'aurait permis la baignade qu'une journée sur deux, et ce, malgré le fait que l'été 2002 ait été très sec.

TABLE DES MATIÈRES

Remerciements	iii
Résumé	iv
Table des matières	vi
Liste des tableaux	vi
Liste des figures.....	vi
INTRODUCTION.....	1
MATÉRIEL ET MÉTHODES	2
QUALITÉ BACTÉRIOLOGIQUE DE L'EAU.....	4
RÉSULTATS DE LA MODÉLISATION	6
DISCUSSION	7
CONCLUSION	8
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	9

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1	Liste des variables considérées pour la modélisation.....	3
Tableau 2	Système de classification du programme Environnement-Plage	5

LISTE DES FIGURES

Figure 1	Concentrations moyennes en coliformes fécaux mesurées le matin et l'après-midi à la baie de Beauport, été 2002	4
Figure 2	Droite de régression entre les concentrations prédites et les concentrations mesurées à la baie de Beauport, été 2002.....	6

INTRODUCTION

Depuis 1992, les études effectuées par temps sec à la baie de Beauport par la Division de l'assainissement des eaux de l'ancienne Communauté urbaine de Québec (CUQ, Service de l'environnement) ont montré une amélioration de la qualité bactériologique de l'eau. Les concentrations moyennes en coliformes fécaux sont en effet passées de 491 UFC/100 ml en 1992 à 125 UFC/100 ml en 1999, année durant laquelle 11 des 14 jours échantillonnés (79 %) par temps sec offraient une qualité d'eau acceptable pour la baignade (Robillard et Bonin, 2000). Le but de ces campagnes était de caractériser la qualité bactériologique des eaux riveraines de Québec sans l'influence des débordements des réseaux d'égouts survenant en temps de pluie. Les prises d'échantillons étaient faites après une période de 36 heures sans précipitations et ont permis, au fil des ans, de suivre l'augmentation de l'efficacité de la station d'épuration est.

Afin de dresser un portrait plus complet de la qualité bactériologique de l'eau de ce site, l'Association pour la sauvegarde de la baie de Beauport (ASBB) a mis en œuvre, à l'été 2002, une nouvelle campagne d'échantillonnage à haute fréquence avec prise d'échantillons tant par temps sec que par temps de pluie. L'autre but de cette étude était de mieux comprendre les relations entre certaines variables environnementales et les concentrations en coliformes fécaux afin d'établir un premier modèle prédictif de la qualité bactériologique de l'eau. Ce modèle, dans l'éventualité où le site deviendrait une plage publique, permettrait de gérer de façon préventive les risques associés à la baignade et ainsi de diminuer l'exposition de la population à une eau de mauvaise qualité.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Deux visites ont été effectuées quotidiennement du lundi au vendredi, la première à 8 h et la seconde à 13 h, entre le 17 juin et le 16 août 2002. Lors de chacune des visites, six échantillons d'eau étaient prélevés selon le protocole d'Environnement-Plage, à l'aide de bouteilles de polypropylène stériles de 250 ml. L'échantillonnage du site était effectué sur une longueur de 200 m, les points de prélèvement étant distants d'environ 40 m. Trois échantillons étaient 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). Les échantillons étaient immédiatement transportés au laboratoire de la Ville de Québec pour analyse. Les coliformes fécaux étaient dénombrés par filtration sur membrane, selon la méthode recommandée 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) par 100 ml.

La température de l'air et de l'eau, la vitesse et la direction du vent, la couverture nuageuse ainsi que la phase et l'amplitude de marée, la largeur de l'estran et la hauteur des vagues au moment de l'échantillonnage étaient notées. Les données de précipitations (données horaires) ainsi que la vitesse quotidienne moyenne des vents et leur direction dominante provenaient de la station météorologique automatisée d'Environnement Canada située à l'aéroport de Québec. Des données concernant l'achalandage et l'utilisation du site étaient aussi recueillies : nombre de promeneurs, de baigneurs, d'embarcations, d'animaux domestiques et de goélands présents.

Les résultats des dénombrements bactériens sont exprimés en UFC/100 ml (unités formatrices de colonies), ce qui correspond, dans le langage courant, à la quantité de coliformes fécaux par 100 ml. Les résultats sont présentés à l'aide de la moyenne géométrique calculée à partir des six échantillons prélevés lors d'une même visite. La moyenne géométrique saisonnière a été calculée à partir de l'ensemble des résultats analytiques obtenus pour la totalité de la période d'étude. Pour le calcul de ces moyennes, les dénombrements supérieurs à la limite de quantification ont été considérés comme égaux à celle-ci.

Les variables qui ont été considérées pour la modélisation sont quantitatives ou dichotomiques (tableau 1). Les variables catégoriques (état de la marée, direction des vents, etc.) ont été recodées à l'aide de variables dichotomiques (1 ou 0, c'est-à-dire présence ou absence). L'intensité moyenne des précipitations (total des précipitations/nombre d'heures avec précipitations) ainsi que l'intensité horaire maximale des précipitations ont également été considérées. Le logiciel de statistique SigmaStat (version 1.0) a été utilisé pour la modélisation et toutes les autres analyses statistiques. Les concentrations en coliformes fécaux mesurées le matin et en début d'après-midi ont été comparées à l'aide du test de Wilcoxon pour échantillons appariés. Une analyse de corrélation de Spearman a été effectuée entre les concentrations en coliformes fécaux et les différentes variables environnementales. La variable réponse (coliformes fécaux) a été normalisée par transformation logarithmique (\log_{10}) et la modélisation a été effectuée à l'aide de la régression multiple par étape, avec un niveau de probabilité de 5 % pour l'entrée et la sortie des variables du modèle. La normalité des résidus a été évaluée à l'aide du test de Wilk-Shapiro, alors que l'autocorrélation entre les résidus a été évaluée à l'aide du test de Durbin-Watson. Tous les tests ont été réalisés à un niveau de probabilité de 5 %. Les résidus ne présentant pas

d'autocorrélation, les paramètres de la droite de régression ont été estimés à l'aide de la méthode des moindres carrés (Berenson *et al.*, 1983).

Tableau 1 Liste des variables considérées pour la modélisation

Variables	
AM	Échantillonnage à 8 h
VNE	Vent du nord-est (à 8 h ou à marée basse)
VNO	Vent du nord-ouest (à 8 h ou à marée basse)
VSE	Vent du sud-est (à 8 h ou à marée basse)
VSO	Vent du sud-ouest (à 8 h ou à marée basse)
VE	Vent de l'est (à 8 h ou à marée basse)
VO	Vent de l'ouest (à 8 h ou à marée basse)
VS	Vent du sud (à 8 h ou à marée basse)
Variables	
COLI	Moyenne géométrique en coliformes fécaux (UFC/100 ml) des six
GOEL	Nombre de goélands présents sur le site au moment de
HVAGUE	Hauteur des vagues au moment de l'échantillonnage (po)
AMPLI	Amplitude de la marée le jour de l'échantillonnage (pi)
ESTRAN	Longueur de l'estran au moment de l'échantillonnage (m)
FVENT	Force des vents au moment de l'échantillonnage (km/h)
VENTMOY	Force quotidienne moyenne du vent (km/h)
TEMPE	Température de l'eau (°C)
TEMPA	Température de l'air (°C)
PR12	Précipitations au cours des 12 heures précédant l'échantillonnage (mm)
PR1	Précipitations le jour précédant l'échantillonnage (mm)
PR2	Précipitations le 2 ^e jour précédant l'échantillonnage (mm)
PR3	Précipitations le 3 ^e jour précédant l'échantillonnage (mm)
INT12	Intensité des précipitations au cours des 12 heures précédant
INT1	Intensité des précipitations le jour précédant l'échantillonnage (mm/h)
INT2	Intensité des précipitations le 2 ^e jour précédant l'échantillonnage
INT3	Intensité des précipitations le 3 ^e jour précédant l'échantillonnage
MAX12	Intensité horaire maximale au cours des 12 heures précédant
MAX1	Intensité horaire maximale le jour précédant l'échantillonnage (mm/h)
MAX2	Intensité horaire maximale le 2 ^e jour précédant l'échantillonnage
MAX3	Intensité horaire maximale le 3 ^e jour précédant l'échantillonnage
STAT9	Concentration en coliformes fécaux à la sortie de la station d'épuration
STAT13	Concentration en coliformes fécaux à la sortie de la station d'épuration

QUALITÉ BACTÉRIOLOGIQUE DE L'EAU

Les concentrations en coliformes fécaux mesurées au site de la baie de Beauport varient d'une journée à l'autre et à l'intérieur d'une même journée (figure 1). La moyenne géométrique saisonnière, calculée sur l'ensemble des visites (N = 87), est de 150 UFC/100 ml, ce qui correspond à une cote C (plage présentant une qualité bactériologique passable) selon le système de classification du programme Environnement-Plage. En avant-midi (N = 45; moyenne géométrique de 196 UFC/100 ml), la qualité bactériologique est significativement (P = 0,014) moins bonne qu'en après-midi (N = 42; moyenne géométrique de 113 UFC/100 ml). En avant-midi, le critère de qualité lié à la baignade (200 UFC/100 ml) a été respecté 55,6 % du temps, alors qu'en après-midi il a été respecté 71,4 % du temps. La fréquence des journées où le critère a été respecté à la fois le matin et l'après-midi a été de 44,4 % (20 jours sur 45).

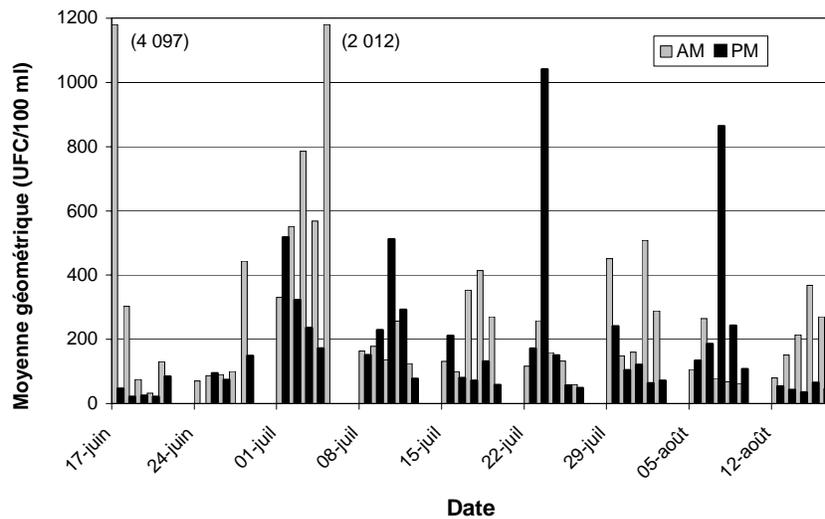


Figure 1 Concentrations moyennes en coliformes fécaux mesurées le matin et l'après-midi à la baie de Beauport, été 2002

Le potentiel du site de la baie de Beauport pour la baignade a été évalué selon le système de classification du programme Environnement-Plage (tableau 2) et la fréquence à laquelle le critère de qualité relatif à la baignade a été respecté.

Tableau 2 Système de classification du programme Environnement-Plage

Moyenne géométrique des concentrations en coliformes fécaux	Qualité de la plage
0 à 20 UFC/100 ml	A- excellente
21 à 100 UFC/100 ml	B- bonne
101 à 200 UFC/100 ml	C- passable
plus de 200 UFC/100 ml ou plus de 10 % des échantillons supérieurs à 400 UFC/100 ml	D- polluée

Le potentiel d'un site pour la baignade est défini comme suit :

- **très bon**, si la baignade y est possible à une fréquence supérieure ou égale à 70 % et si la moyenne géométrique saisonnière correspond à une qualité bactériologique excellente ou bonne (classes A ou B);
- **bon**, si la baignade y est possible à une fréquence supérieure ou égale à 70 % et si la moyenne géométrique saisonnière correspond à une qualité bactériologique passable (classe C);
- **faible**, si la baignade y est possible à une fréquence se situant entre 50 et 70 %;
- **très faible**, si la baignade y est possible à une fréquence inférieure à 50 %.

Sur cette base, le potentiel actuel du site de la baie de Beauport est évalué comme faible, bon ou très faible, selon que l'on considère les résultats du matin, de l'après-midi ou de l'ensemble de la journée.

RÉSULTATS DE LA MODÉLISATION

Le modèle développé explique 42 % de la variance des concentrations en coliformes fécaux (transformation logarithmique). Il est basé sur la longueur de l'estran au moment de l'échantillonnage (ESTRAN en mètres), la quantité de précipitations mesurées à l'aéroport de Québec pendant les 24 heures précédant l'échantillonnage (PR1 en mm), le moment de l'échantillonnage (AM = 1 si avant-midi; AM = 0 si après-midi) et la hauteur des vagues au moment de l'échantillonnage (HVAGUE en pouces) :

$$\text{Log}_{10}(\text{COLI}) = 1,520 + 0,006(\text{ESTRAN}) + 0,028(\text{PR1}) + 0,292(\text{AM}) + 0,017(\text{HVAGUE})$$

$$R^2 = 0,42$$

$$R^2 \text{ partiels : } \begin{array}{l} \text{ESTRAN} = 0,15 \\ \text{PR1} = 0,12 \\ \text{AM} = 0,11 \\ \text{HVAGUE} = 0,03 \end{array}$$

Les R^2 partiels correspondent au pourcentage de la variance expliqué par l'ajout de chacune des variables dans le modèle. Les autres variables n'ont pas été retenues dans le modèle parce qu'elles ne contribuaient pas, à un niveau de probabilité de 5 %, à expliquer une portion supplémentaire de la variance des concentrations en coliformes fécaux.

La figure 2 présente la relation entre les concentrations prédites et les concentrations mesurées. Le coefficient de corrélation est de 0,65 et la relation est hautement significative ($P < 0,001$).

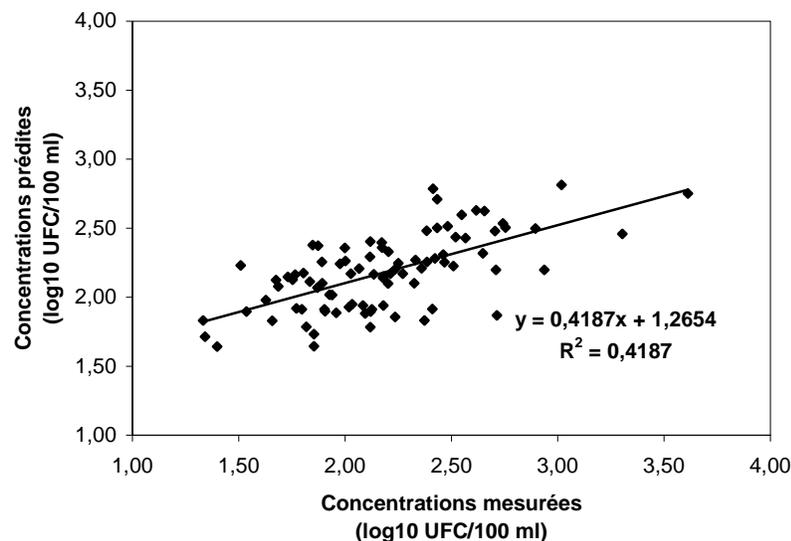


Figure 2 Droite de régression entre les concentrations prédites et les concentrations mesurées à la baie de Beauport, été 2002

DISCUSSION

Le modèle développé explique 42 % de la variance des concentrations en coliformes fécaux. Une partie de la contamination dépend de la longueur de l'estran : plus l'estran est long (c'est-à-dire plus la marée est basse), plus la contamination est importante. Cette variable explique à elle seule 15 % de la variance. Ce phénomène est probablement lié à la présence d'une source de contamination (possiblement le type et la qualité des sédiments de fond) qui affecte la qualité de l'eau de façon beaucoup plus importante lorsque la marée est basse. Les précipitations enregistrées dans les 24 heures précédant l'échantillonnage expliquent un 12 % supplémentaire de la variance. Dans le secteur de la baie de Beauport, il y a en effet 18 structures de surverse où peuvent se produire des débordements d'eaux usées non traitées lors de précipitations importantes. La troisième variable du modèle est le moment de l'échantillonnage (avant-midi ou après-midi). Son introduction dans le modèle contribue à expliquer un 11 % supplémentaire de la variance. La qualité bactériologique est moins bonne le matin qu'en début d'après-midi probablement à cause de la présence importante des goélands sur le site au cours de la nuit. Les goélands sont reconnus comme une source de contamination bactériologique des eaux récréatives (Lévesque *et al.*, 1993). Les goélands sont très nombreux sur le site pendant la nuit et à l'aube, mais quittent les lieux par la suite (Jean Robert, Association nautique de la baie de Beauport, communication personnelle). Lors de l'échantillonnage, une bonne partie des goélands n'étant plus présente, la variable GOEL (nombre de goélands sur le site au moment de l'échantillonnage) n'a pas été retenue dans le modèle. Au cours de l'après-midi, la contamination engendrée par les goélands n'est plus perceptible en raison du changement des masses d'eau causé par les courants et la marée. L'effet bactéricide du rayonnement solaire peut également expliquer en partie la meilleure qualité bactériologique observée en après-midi. Finalement, la hauteur des vagues explique un 3 % supplémentaire de la variance; plus il y a de vagues, plus il y a de brassage et de remise en suspension des sédiments de fond auxquels peuvent être adsorbés des coliformes fécaux. La phase de la marée (montante ou descendante) et les rejets de la station d'épuration est ne semblent pas avoir d'influence sur les concentrations en coliformes fécaux mesurées sur le site.

CONCLUSION

À l'été 2002, la qualité bactériologique de l'eau à la plage de la baie de Beauport aurait permis la baignade approximativement une journée sur deux. En effet, le critère de qualité lié à la baignade (200 UFC/100 ml) a été respecté 56 % du temps à 8 h le matin et 71 % du temps à 13 h, alors que la fréquence des journées où le critère a été respecté à la fois à 8 h et 13 h a été de 44 % (20 jours sur 45). En utilisant le système de classement du programme Environnement-Plage et la fréquence à laquelle le critère de qualité relatif à la baignade a été respecté, le potentiel du site pour la baignade à l'été 2002 est évalué comme étant faible. La mauvaise qualité bactériologique observée le matin est probablement liée à la présence de goélands sur le site au cours de la nuit et à l'aube. Si cette source de contamination était éliminée, on pourrait s'attendre à une qualité comparable le matin et l'après-midi, et le potentiel du site pour la baignade serait alors bon. Afin d'améliorer la qualité bactériologique des eaux de la baie de Beauport, il faudrait, en plus de prendre des mesures pour éloigner les goélands, réaliser des interventions visant à diminuer les débordements d'eaux usées non traitées survenant par temps de pluie via 18 structures de surverse localisées dans le secteur.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

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

BERENSON, M. L., D. M. LEVINE et M. GOLDSTEIN, 1983. *Intermediate Statistical Methods and Applications – A Computer Package Approach*, Englewood Cliffs (N.J.), Prentice-Hall Inc., (éds.), 579 p.

LÉVESQUE, B., P. BROUSSEAU, P. SIMARD, E. DEWAILLY, M. MEISELS, D. RAMSAY et J. JOLY, 1993. "Impact of the Ring-Billed Gull (*Larus delawarensis*) on the Microbiological Quality of Recreational Water", *Applied and Environmental Microbiology*, vol. 59, p. 1228-1230.

MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT ET DE LA FAUNE (MEF), 1998. *Guide d'application du programme Environnement-Plage 1998*, Québec, ministère de l'Environnement et de la Faune, Direction de la coordination opérationnelle, 8 sections, 8 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*, Québec, Communauté urbaine de Québec, Service de l'environnement, Division de l'assainissement des eaux, 16 p. et 6 annexes.