

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

ÉTÉ 2003

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 480 échantillons d'eau ainsi que de la conductivité, du pH et de la turbidité de près de 160 échantillons. 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'un étudiant d'été, dont la tâche principale consistait à prélever les échantillons d'eau et à recueillir les données environnementales nécessaires. Nous remercions chaleureusement cet étudiant, Raphaël Parent, 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'étudiant, 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 du ministre québécois de l'Environnement, Thomas J. Mulcair, et du député provincial de Limoilou, Michel Després, qui a permis d'assurer le transport des échantillons d'eau de la baie de Beauport au laboratoire de la Ville de Québec. Le Service de l'environnement de la Ville de Québec a également assumé une partie des coûts liés au transport des échantillons.

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 2003

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 2003*, 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/2004/0141, rapport n° QE/144, 10 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 23 juin et le 22 août 2003. 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 80 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 afin de mesurer les concentrations en coliformes fécaux. Deux autres échantillons étaient alors prélevés au centre du site, à une profondeur de 0,3 et de 1,2 m, afin de mesurer le pH, la conductivité et la turbidité.

Les concentrations en coliformes fécaux ont varié d'une façon importante d'une journée à l'autre et à l'intérieur d'une même journée. La moyenne géométrique saisonnière, calculée sur l'ensemble des visites, a été de 135 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 (40 visites; moyenne géométrique de 153 UFC/100 ml), la qualité bactériologique était moins bonne qu'en après-midi (40 visites; moyenne géométrique de 120 UFC/100 ml); ces différences ne sont toutefois pas statistiquement significatives ($P = 0,073$). En avant-midi, le critère de qualité lié à la baignade (200 UFC/100 ml) a été respecté 70 % du temps, alors qu'en après-midi il a été respecté 67,5 % du temps. La fréquence des journées où le critère a été respecté à la fois le matin et l'après-midi a été de 58,5 % (24 jours sur 41). Quand moins de 90 % des coliformes fécaux sont des bactéries *Escherichia coli* (*E. coli*), ce qui est effectivement le cas dans les eaux douces du Saint-Laurent, la bactérie *E. coli* s'avère être un meilleur indicateur de contamination fécale que les coliformes fécaux. En utilisant *E. coli* plutôt que les coliformes fécaux, le critère de qualité aurait été respecté 75 % du temps le matin, alors qu'en après-midi il aurait été respecté 77,5 % du temps. La fréquence des journées où le critère aurait été respecté à la fois le matin et l'après-midi aurait été de 63,4 % (26 jours sur 41).

Un modèle prédictif expliquant 65 % de la variance des concentrations en coliformes fécaux mesurées a été développé. Il est basé sur la turbidité de l'eau au moment de l'échantillonnage, le débit horaire maximum enregistré à la station d'épuration la veille de l'échantillonnage, le nombre de jours sans précipitations précédant la journée de l'échantillonnage ainsi que le moment de la journée (avant-midi ou après-midi). Les concentrations en coliformes fécaux prédites présentent un coefficient de corrélation de 0,81 avec les concentrations mesurées. Il est également possible d'utiliser les précipitations enregistrées la veille de l'échantillonnage à la place du débit horaire maximum entrant à la station d'épuration; le modèle expliquerait alors 64 % de la variance des concentrations en coliformes fécaux mesurées.

En utilisant la bactérie *E. coli* comme indicateur, le potentiel actuel du site pour la baignade est évalué comme étant bon. Au cours de l'été 2003, la qualité bactériologique aurait permis la baignade deux jours sur trois. Le fait que les concentrations en coliformes fécaux soient fortement corrélées avec la turbidité laisse supposer que le sable et les sédiments peuvent agir comme réservoirs de coliformes fécaux et que ceux-ci peuvent être remis en suspension dans la colonne d'eau lors de forts vents d'est. Si cette turbidité est engendrée par l'effet d'un brassage local, la présence de baigneurs pourrait faire augmenter la contamination bactériologique. Par contre, si l'origine de la turbidité est extérieure au site, la présence de baigneurs n'aura aucun effet sur la contamination. Afin d'améliorer la qualité bactériologique des eaux de la baie de Beauport, des interventions visant à diminuer, par temps de pluie, les dérivations et les débordements d'eaux usées non traitées seraient souhaitables.

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	8
CONCLUSION	9
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	10

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	Intensité des précipitations et concentrations moyennes en coliformes fécaux mesurées le matin et l'après-midi à la baie de Beauport, été 2003	4
Figure 2	Droite de régression entre les concentrations prédites et les concentrations mesurées à la baie de Beauport, été 2003	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 %) offraient une qualité d'eau acceptable pour la baignade par temps sec (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 campagne d'échantillonnage à haute fréquence avec prise d'échantillons tant par temps sec que par temps de pluie. Selon les résultats de cette étude (Hébert et Lacoursière, 2004), la baignade y aurait été possible un peu moins d'une journée sur deux. En effet, le critère de qualité lié à la baignade (200 UFC/100 ml) y a été respecté 56 % du temps le matin et 71 % du temps l'après-midi, alors que la fréquence des journées où le critère a été respecté à la fois le matin et l'après-midi a été de 44 % (20 jours sur 45). En plus des débordements des réseaux d'égouts par temps de pluie, les goélands avaient alors été ciblés comme une source probable de contamination bactériologique. Des mesures d'éloignement des goélands avaient donc été prévues pour la saison 2003.

Une seconde campagne d'échantillonnage a été réalisée au cours de l'été 2003. Le but de cette étude était d'approfondir notre compréhension des relations entre certaines variables environnementales et les concentrations en coliformes fécaux mesurées sur le site afin de développer un 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 23 juin et le 22 août 2003. 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).

Lors de chacune des visites, deux échantillons d'eau étaient également prélevés au milieu du site à 0,3 m et à 1,2 m de profondeur afin d'y mesurer la turbidité, la conductivité et le pH. La température de l'eau et de l'air, la phase et l'amplitude de marée, la largeur de l'estran et la hauteur des vagues étaient notées. Les données météorologiques provenaient de la station météorologique automatisée d'Environnement Canada située à l'aéroport de Québec. Les données concernant les débits horaires maximum (débits d'eaux usées arrivant à la station d'épuration) et les débits dérivés (débits d'eaux usées dérivés au fleuve sans traitement à la suite du dépassement de la capacité de la station d'épuration) à la station d'épuration est de la ville de Québec ont été obtenues du ministère des Affaires municipales, du Sport et du Loisir (MAMSL, 2003).

Les résultats des dénombrements bactériens sont exprimés en UFC/100 ml (unités formatrices de colonies), ce qui correspond à la quantité de coliformes fécaux par 100 ml. Les résultats journaliers sont présentés à l'aide de moyennes géométriques calculées à partir des six échantillons prélevés lors d'une même visite. Une moyenne géométrique saisonnière a été calculée pour le matin, l'après-midi et la journée complète à partir de l'ensemble des résultats analytiques obtenus pour ces différentes périodes. Les données du matin et de l'après-midi ont été comparées en utilisant le test de Wilcoxon pour échantillons appariés.

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). Le nombre d'heures d'ensoleillement, l'intensité moyenne des précipitations (total des précipitations/nombre d'heures avec précipitations) ainsi que l'intensité horaire maximale des précipitations ont également été considérés. Le logiciel de statistique SigmaStat (version 1.0) a été utilisé pour la modélisation et toutes les autres analyses statistiques. 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 dichotomiques

AM	Échantillonnage le matin	MB	Échantillonnage à marée descendante
VNE	Vent du nord-est le jour même	DOMNE	Vent du nord-est la veille
VNO	Vent du nord-ouest le jour même	DOMNO	Vent du nord-ouest la veille
VSE	Vent du sud-est le jour même	DOMSE	Vent du sud-est la veille
VSO	Vent du sud-ouest le jour même	DOMSO	Vent du sud-ouest la veille
VE	Vent de l'est le jour même	DOME	Vent de l'est la veille
VO	Vent de l'ouest le jour même	DOMO	Vent de l'ouest la veille
VS	Vent du sud le jour même	DOMS	Vent du sud la veille

Variables quantitatives

COLI	Moyenne géométrique des concentrations en coliformes fécaux (UFC/100 ml)
TURB	Turbidité de l'eau (UNT)
COND	Conductivité de l'eau ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
PH	pH de l'eau
TEMPE	Température de l'eau ($^{\circ}\text{C}$)
TEMPA	Température de l'air ($^{\circ}\text{C}$)
GOEL	Nombre de goélands présents sur le site au moment de l'échantillonnage
OISE	Nombre d'oiseaux autres que les goélands présents sur le site au moment de l'échantillonnage
HVAGUE	Hauteur des vagues au moment de l'échantillonnage (cm)
AMPLI	Amplitude de la marée le jour de l'échantillonnage (m)
ESTRAN	Longueur de l'estran au moment de l'échantillonnage (m)
FVENT	Force moyenne du vent le jour de l'échantillonnage (km/h)
VENTMOY	Force moyenne du vent la veille de l'échantillonnage (km/h)
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 moyenne des précipitations au cours des 12 heures précédant l'échantillonnage (mm/h)
INT1	Intensité moyenne des précipitations le jour précédant l'échantillonnage (mm/h)
INT2	Intensité moyenne des précipitations le 2 ^e jour précédant l'échantillonnage (mm/h)
INT3	Intensité moyenne des précipitations le 3 ^e jour précédant l'échantillonnage (mm/h)
MAX12	Intensité horaire maximale au cours des 12 heures précédant l'échantillonnage (mm/h)
MAX1	Intensité horaire maximale le jour précédant l'échantillonnage (mm/h)
MAX2	Intensité horaire maximale le 2 ^e jour précédant l'échantillonnage (mm/h)
MAX3	Intensité horaire maximale le 3 ^e jour précédant l'échantillonnage (mm/h)
INSO	Ensoleillement le jour de l'échantillonnage (h)
INSO1	Ensoleillement la veille de l'échantillonnage (h)
SEC	Nombre de jours de temps sec (moins de 2 mm de pluie) précédant l'échantillonnage
DEBMAX	Débit horaire maximum à l'affluent de la station est le jour de l'échantillonnage (m^3/h)
DEBMAX1	Débit horaire maximum à l'affluent de la station est le jour précédant l'échantillonnage (m^3/h)
DEBMAX2	Débit horaire maximum à l'affluent de la station est le 2 ^e jour précédant l'échantillonnage (m^3/h)
DEBMAX3	Débit horaire maximum à l'affluent de la station est le 3 ^e jour précédant l'échantillonnage (m^3/h)
DERIVA	Débit dérivé à la station est le jour de l'échantillonnage (m^3)
DERIVA1	Débit dérivé à la station est le jour précédant l'échantillonnage (m^3)
DERIVA2	Débit dérivé à la station est le 2 ^e jour précédant l'échantillonnage (m^3)
DERIVA3	Débit dérivé à la station est le 3 ^e jour précédant l'échantillonnage (m^3)

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 = 80), est de 135 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 = 40; moyenne géométrique de 153 UFC/100 ml), la qualité bactériologique est moins bonne qu'en après-midi (N = 40; moyenne géométrique de 120 UFC/100 ml). Ces différences ne sont toutefois pas statistiquement significatives à un niveau de probabilité de 5 % (test de Wilcoxon pour échantillons appariés; P = 0,073).

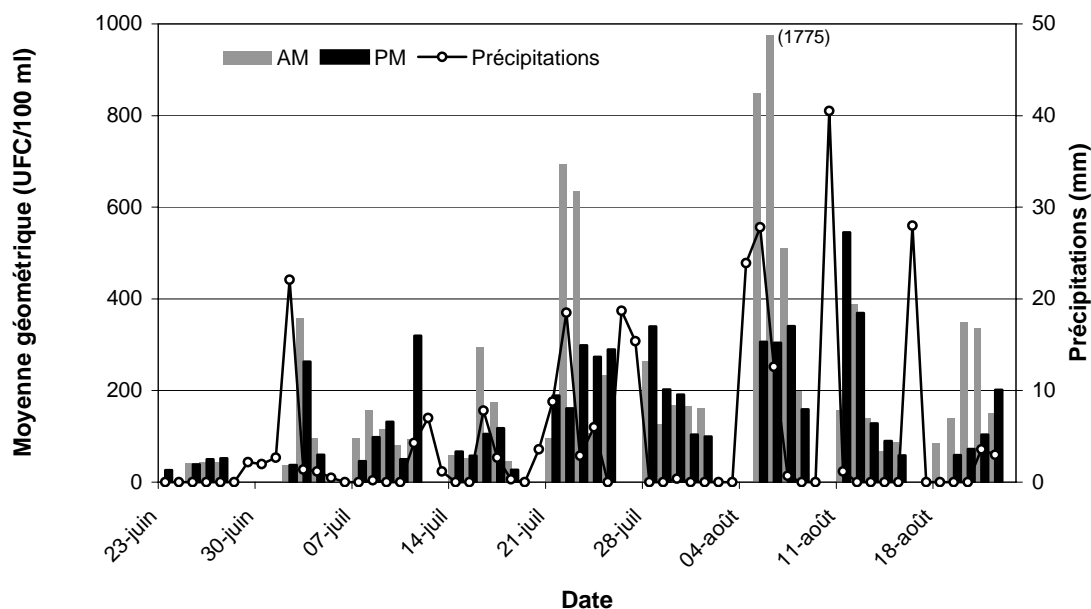


Figure 1 Intensité des précipitations et concentrations moyennes en coliformes fécaux mesurées le matin et l'après-midi à la baie de Beauport, été 2003

En avant-midi, le critère de qualité lié à la baignade (200 UFC/100 ml) a été respecté 70 % du temps, alors qu'en après-midi il a été respecté 67,5 % du temps. La fréquence des journées où le critère a été respecté à la fois le matin et l'après-midi a été de 58,5 % (24 jours sur 41). Quand moins de 90 % des coliformes fécaux sont des bactéries *Escherichia coli* (*E. coli*), la bactérie *E. coli* s'avère être un meilleur indicateur de contamination fécale que les coliformes fécaux (SBESC, 1992). Selon une étude réalisée en 2003 par le ministère de l'Environnement sur le site de la baie de Beauport (Hébert, 2004), 71 % des coliformes fécaux sont des bactéries *E. coli*. En utilisant les concentrations en coliformes fécaux ajustées avec un facteur de correction de 0,71, le critère de qualité pour la baignade aurait été respecté 75 % du temps le matin et 77,5 % du temps l'après-midi. La fréquence des journées où le critère aurait été respecté à la fois le matin et l'après-midi aurait été de 63,4 % (26 jours sur 41).

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 du site de la baie de Beauport est évalué comme bon. Le site pourrait être exploité pour la baignade, mais devrait être géré de façon préventive afin d'éviter d'exposer les baigneurs à la mauvaise qualité bactériologique résultant des débordements des réseaux d'égouts en temps de pluie.

RÉSULTATS DE LA MODÉLISATION

Le modèle prédictif développé explique 65 % de la variance des concentrations en coliformes fécaux (transformation logarithmique). Il est basé sur la turbidité de l'eau au moment de l'échantillonnage, le débit horaire maximum enregistré à la station d'épuration est la veille de l'échantillonnage, le nombre de jours sans précipitations précédant la journée de l'échantillonnage ainsi que le moment de la journée (AM = 1 si avant-midi; AM = 0 si après-midi).

$$\text{Log}_{10}(\text{COLI}) = 1,6957 + 0,0076(\text{TURB}) + 0,0000226(\text{DEBMAX1}) - 0,0278(\text{SEC}) + 0,125(\text{AM})$$

$$R^2 = 0,65$$

$$R^2 \text{ partiels : } \begin{array}{l} \text{TURB} = 0,40 \\ \text{DEBMAX1} = 0,18 \\ \text{SEC} = 0,04 \\ \text{AM} = 0,03 \end{array}$$

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 0,81 et la relation est hautement significative ($P < 0,001$).

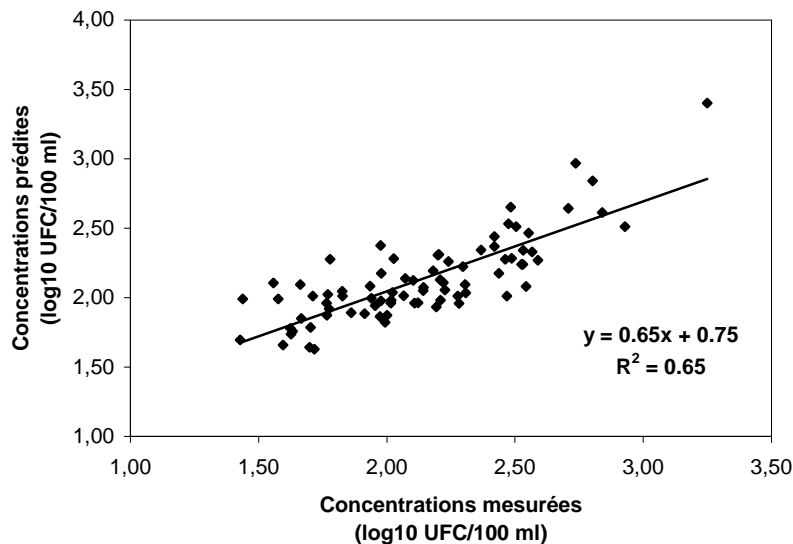


Figure 2 Droite de régression entre les concentrations prédites et les concentrations mesurées à la baie de Beauport, été 2003

Il serait également possible d'utiliser les précipitations enregistrées la veille de l'échantillonnage à la place du débit horaire maximum entrant à la station d'épuration; le modèle expliquerait alors 64 % de la variance des concentrations en coliformes fécaux mesurées.

$$\text{Log}_{10}(\text{COLI}) = 1,9637 + 0,0090(\text{TURB}) - 0,0343(\text{SEC}) + 0,0108(\text{PR1}) + 0,120(\text{AM})$$

$$R^2 = 0,64$$

$$R^2 \text{ partiels : } \begin{array}{l} \text{TURB} = 0,40 \\ \text{SEC} = 0,14 \\ \text{PR1} = 0,07 \\ \text{AM} = 0,03 \end{array}$$

DISCUSSION

La turbidité permet d'expliquer 40 % de la variance observée dans les concentrations en coliformes fécaux. Plusieurs études (Whitman et Nevers, 2003; Wheeler Alm *et al.*, 2003) ont démontré l'existence d'une corrélation statistiquement significative entre les concentrations en coliformes fécaux mesurées dans la colonne d'eau et dans les sédiments de fond. Ces études ont également mis en évidence le fait que le sable d'une plage joue un rôle majeur en ce qui concerne la qualité bactériologique de l'eau, qu'il peut être une source importante de coliformes fécaux et qu'il peut soutenir une population autochtone de coliformes fécaux pour une certaine période sans aucun apport extérieur. Le fait que les concentrations en coliformes fécaux mesurées à la baie de Beauport soient si fortement corrélées avec la turbidité peut laisser supposer que le sable et les sédiments agissent comme réservoirs de coliformes fécaux et que ceux-ci peuvent être remis en suspension dans la colonne d'eau lors de forts vents d'est. Cependant, nos données ne nous permettent pas de savoir si cette turbidité est d'origine locale ou extérieure. Si cette turbidité est engendrée par l'effet d'un brassage local, la présence de baigneurs pourrait faire augmenter la contamination bactériologique. Par contre, si la turbidité mesurée sur le site origine du brassage de sédiments de fond localisés en aval et que cette turbidité migre vers la plage sous l'effet des vents d'est et du courant, la présence de baigneurs n'aura aucun effet sur la contamination.

Les précipitations enregistrées dans les 24 heures précédant l'échantillonnage ont également un impact important sur la qualité bactériologique de l'eau. 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. Le débit horaire maximum enregistré à la station d'épuration la veille de l'échantillonnage est également corrélé aux précipitations mesurées ($r = 0,63$; $P < 0,001$); en effet, plus les précipitations sont importantes, plus le débit des eaux usées entrant à la station d'épuration est élevé. La troisième variable explicative est le nombre de jours de temps sec précédant l'échantillonnage; elle est corrélée négativement avec les concentrations en coliformes fécaux. Finalement, le moment de l'échantillonnage (matin ou après-midi) contribue à expliquer un 3 % supplémentaire de la variance observée. La contamination est moins importante en après-midi que le matin, probablement à cause de l'effet bactéricide du rayonnement solaire.

Le modèle développé à l'été 2003 présente un meilleur pouvoir prédictif ($R^2 = 0,64$) que celui de l'été 2002 ($R^2 = 0,42$), grâce à l'ajout de la turbidité. Le modèle de 2002 était basé sur la longueur de l'estran, les précipitations enregistrées au cours des 24 heures précédant l'échantillonnage, le moment de l'échantillonnage et la hauteur des vagues (Hébert et Lacoursière, 2004). En 2003, la turbidité était corrélée à la hauteur des vagues ($r = 0,45$; $P < 0,001$) et à la longueur de l'estran ($r = 0,25$; $P = 0,026$). Les modèles développés au cours des deux derniers étés reposent donc essentiellement sur les mêmes variables explicatives.

CONCLUSION

En utilisant la bactérie *E. coli* comme indicateur de contamination fécale, 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 bon. Au cours de l'été 2003, la qualité bactériologique aurait permis la baignade deux jours sur trois, et ce, malgré le fait que l'été 2003 ait été très pluvieux. Les concentrations en coliformes fécaux sont cependant fortement corrélées à la turbidité et aux précipitations enregistrées la veille de l'échantillonnage. Si cette turbidité est engendrée par l'effet d'un brassage local, la présence de baigneurs pourrait faire augmenter la contamination bactériologique. Par contre, si la turbidité mesurée sur le site origine du brassage de sédiments de fond localisés en aval et que cette turbidité migre vers la plage sous l'effet des vents d'est et du courant, la présence de baigneurs n'aura aucun effet sur la contamination. Advenant la réouverture de la plage, le risque relatif à la baignade pourrait être géré de façon préventive en définissant, à l'aide des modèles développés, des règles de fermeture basées sur la turbidité de l'eau et les précipitations enregistrées dans les dernières 24 heures. Afin d'améliorer la qualité bactériologique des eaux de la baie de Beauport, des interventions visant à diminuer les dérivations et les débordements d'eaux usées non traitées survenant par temps de pluie seraient toutefois souhaitables.

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.

HÉBERT, S., 2004. *Évaluation de la qualité bactériologique de sites potentiels de baignade dans le Saint-Laurent, été 2003*, Québec, ministère de l'Environnement, Direction du suivi de l'état de l'environnement, en préparation.

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.

MINISTÈRE DES AFFAIRES MUNICIPALES, DU SPORT ET DU LOISIR (MAMSL), 2003. « Suivi des ouvrages municipaux d'assainissement des eaux », [En ligne], <https://somae.mamm.gouv.qc.ca/somae.nsf>, (page consultée le 28 novembre 2003; accès réservé).

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.

SANTÉ ET BIEN-ÊTRE SOCIAL CANADA (SBESC), 1992. *Recommandations au sujet de la qualité des eaux utilisées à des fins récréatives au Canada*, Ottawa, ministère des Approvisionnements et Services Canada, 110 p.

WHEELER ALM, E., J. BURKE et A. SPAIN, 2003. "Fecal Indicator Bacteria are Abundant in Wet Sand at Freshwater Beaches", *Water Research*, vol. 37, p. 3978-3982.

WHITMAN, R. L. et M. B. NEVERS, 2003. "Foreshore Sand as a Source of Escherichia coli in Nearshore Water of a Lake Michigan Beach", *Applied and Environmental Microbiology*, vol. 69, p. 5555-5562.