

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

ÉTÉ 2004

par :

Jean Lacoursière
Accès St-Laurent Beauport

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	3
SOMMAIRE	4
INTRODUCTION.....	5
MATÉRIEL ET MÉTHODES	6
QUALITÉ BACTÉRIOLOGIQUE DE L'EAU	8
RÉSULTATS DE LA MODÉLISATION	10
DISCUSSION	11
SCENARIOS DE RÈGLES DE FERMETURE	13
RISQUE DE CONTRACTER UNE GASTROENTÉRITE LORS DE LA BAIGNADE	16
CONCLUSIONS.....	18
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	19

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier MM. François Proulx et Frédéric Aubin de la Division des laboratoires du Service de l'environnement de la Ville de Québec. Pendant neuf semaines, leur laboratoire a analysé la teneur en coliformes fécaux de 522 échantillons d'eau ainsi que la turbidité de 174 échantillons. Nous sommes honorés de pouvoir compter sur leur grande contribution depuis 2002. Nous tenons aussi à remercier MM. Michel Lagacé et René Gélinas, du Service de l'environnement de la Ville de Québec, qui ont les premiers ouvert la porte à cette collaboration.

Nous sommes extrêmement reconnaissants envers M. Jacques Dupont, chef du Service de l'information sur les milieux aquatiques au ministère de l'Environnement du Québec (MENV), d'avoir affecté M. Serge Hébert, spécialiste du milieu aquatique, à l'analyse des données pour tenter d'établir des relations entre la qualité bactériologique de l'eau et certains facteurs environnementaux et météorologiques. Ce rapport n'aurait pas été possible sans sa contribution et ses nombreux conseils. Grand merci Serge!

Nous remercions Michel Guimond, député fédéral de Beauport–Montmorency–Côte-de-Beaupré–Île d'Orléans, ainsi que Développement des ressources humaines Canada pour l'aide financière octroyée pour l'embauche d'un étudiant d'été dont la tâche principale a été le prélèvement des échantillons d'eau et des données environnementales nécessaires à cette étude. Nous remercions chaleureusement cet étudiant, Raphaël Parent, de s'être joint à notre projet pour une deuxième année de suite. Sa rigueur et sa fiabilité facilitent grandement la gestion d'un tel projet. Nous disons un grand merci à Daniel Guay, président de Accès St-Laurent Beauport (ASLB), pour s'être chargé de la recherche de partenaires et du recrutement de l'étudiant. Nous remercions aussi M. Jean Robert de l'Association nautique de la baie de Beauport (ANBB) pour son intérêt soutenu envers ce projet durant tout l'été.

Le transport des échantillons d'eau entre la baie de Beauport et le Centre analytique de la Ville de Québec a constitué un coût important. Nous remercions le ministre québécois de l'Environnement, Thomas J. Mulcair et le député provincial de Limoilou, Michel Després, pour leur contribution financière. Le Service de l'environnement de la ville de Québec a aussi contribué au transport des échantillons d'eau en nous permettant d'utiliser son courrier rapide partant de la station d'épuration est des eaux usées à chaque matin.

Jean Lacoursière
Accès St-Laurent Beauport

SOMMAIRE

Une étude de la qualité bactériologique de l'eau de la plage de la baie de Beauport a été menée entre le 14 juin et le 13 août 2004. Deux visites ont été effectuées quotidiennement du lundi au vendredi, la première à 8h et la seconde à 13h. Lors de chaque visite, six échantillons d'eau étaient prélevés selon le protocole d'Environnement-Plage afin d'y mesurer les concentrations en coliformes fécaux. Deux autres échantillons étaient prélevés au centre du site, à des profondeurs de 0,3 et 1,2 m, afin d'y mesurer la turbidité de l'eau.

Les concentrations en coliformes fécaux ont varié d'une façon importante d'une journée à l'autre et parfois même à l'intérieur d'une journée. La moyenne géométrique saisonnière, calculée sur l'ensemble des visites (82), a été de 127 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 du ministère de l'Environnement du Québec. En avant-midi (41 visites; moyenne géométrique de 118 UFC/100 ml), la qualité bactériologique semble meilleure qu'en après-midi (41 visites; moyenne géométrique de 137 UFC/100 ml) mais ces différences ne sont pas statistiquement significatives à un niveau de probabilité de 5% ($P = 0,24$). En avant-midi, le critère de qualité lié à la baignade (200 UFC/100 ml) a été respecté 85 % du temps, alors qu'en après-midi, il a été respecté 68 % du temps. La fréquence des journées où le critère a été respecté à la fois le matin et l'après-midi a été de 62 % (26 jours sur 42).

Un modèle prédictif expliquant 66 % 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, les précipitations enregistrées la veille et l'avant-veille de l'échantillonnage à Beauport et le nombre d'heures d'ensoleillement la veille de l'échantillonnage. Les concentrations de coliformes fécaux prédites présentent un coefficient de corrélation de 0,81 avec les concentrations mesurées.

Les concentrations en coliformes fécaux mesurées à la baie de Beauport sont fortement corrélées avec la turbidité de l'eau. Ceci peut laisser supposer que le sable et les sédiments agissent comme réservoirs de coliformes fécaux et que ceux-ci pourraient être remis en suspension dans la colonne d'eau par la présence de baigneurs. Cependant, des essais de remise en suspension de sédiments de fond réalisés au cours l'été 2004 n'indiquent aucune différence significative dans les concentrations de coliformes fécaux avant et après brassage. Une turbidité engendrée par un brassage local résultant de la présence de baigneurs ne ferait donc pas augmenter la contamination bactériologique.

La plage de Beauport pourrait être exploitée pour la baignade, mais devrait être gérée de façon préventive à l'aide de règles de fermeture afin d'éviter d'exposer les baigneurs à la mauvaise qualité bactériologique résultant des débordements des réseaux d'égouts en temps de pluie. 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.

INTRODUCTION

Entre 1992 et 2001, les mesures effectuées par temps sec à la plage de la baie de Beauport par la Division de l'assainissement des eaux de l'ancienne Communauté urbaine de Québec ont montré une diminution de la concentration moyenne de coliformes fécaux dans l'eau de baignade. En effet, celle-ci est passée de 491 UFC/100 ml en 1992 à 59 UFC/100 ml en 2001 (Lajoie 2005). Le but de ces mesures était de caractériser l'efficacité de la station d'épuration est. Afin de vraiment mesurer l'efficacité de l'usine sans l'influence des débordements des réseaux d'égouts survenant en temps de pluie, ces mesures ont donc été faites par temps sec, c'est-à-dire après au moins trois jours sans précipitations. A chaque été, environ une douzaine de visites étaient effectuées à la plage de Beauport. Ces mesures montrent clairement qu'au fil des ans, l'efficacité de la station d'épuration est s'est améliorée grandement.

Afin de dresser un portrait plus complet de la qualité de l'eau de baignade tant par temps sec que par temps de pluie, Accès St-Laurent Beauport (ASLB) pilote depuis l'été 2002 une campagne d'évaluation de la qualité bactériologique de l'eau couplée à une analyse statistique des mesures. Cette analyse statistique vise à identifier les paramètres environnementaux corrélés à la concentration de coliformes fécaux, afin de pouvoir prédire fiablement la qualité de l'eau de baignade sans devoir attendre le résultat d'une culture microbienne pendant vingt-quatre heures. La campagne 2004 faisant l'objet du présent rapport confirme que la turbidité de l'eau est l'indicateur le plus important de la qualité bactériologique de l'eau, suivi des précipitations la veille de l'échantillonnage. Ceci avait été découvert en 2003 et avait soulevé des inquiétudes par rapport à l'impact qu'aurait la présence de baigneurs sur la qualité de l'eau. L'hypothèse était qu'un brassage des sédiments par des baigneurs fasse augmenter la turbidité et par conséquent, la concentration en coliformes fécaux. Des essais de remise en suspension de sédiments de fond réalisés au cours l'été 2004 n'indiquent cependant aucune différence significative dans les concentrations de coliformes fécaux avant et après brassage. Une turbidité engendrée par un brassage local résultant de la présence de baigneurs ne ferait donc pas augmenter la contamination bactériologique. A l'été 2004, 76% des 82 visites effectuées à la plage de Beauport ont montré une concentration de coliformes fécaux inférieure au critère de qualité lié à la baignade (200 UFC/100 ml). La moyenne géométrique saisonnière, calculée sur les 82 visites, a été de 127 UFC/100 ml.

L'identification des variables corrélées à la concentration de coliformes fécaux est cruciale pour deux raisons. D'une part, elle constitue le premier pas vers la découverte des causes de cette contamination bactériologique, étape essentielle vers leur élimination. D'autre part, elle permet le développement d'un modèle prédictif de la qualité de l'eau offrant la possibilité de gérer de façon préventive les risques associés à la baignade et ainsi de minimiser l'exposition de la population à une eau de mauvaise qualité. Bien que certaines méthodes de mesure instantanées de la concentration de coliformes fécaux semblent en train de faire leur preuve, un modèle prédictif couplé à des règles de fermeture constitue encore la meilleure façon de pallier à l'actuel délais de vingt-quatre heures nécessaire pour obtenir une mesure de coliformes fécaux par culture microbienne.

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 14 juin et le 13 août 2004. 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 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 des stations météorologiques d'Environnement Canada situées à l'aéroport de Québec, à l'université Laval et à Beauport.

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 3.1) 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 Kolmogorov-Smirnov, l'homoscédasticité des résidus a été évaluée en examinant la corrélation (Spearman) entre la valeur absolue des résidus et les valeurs observées de la variable dépendante, 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 (direction moyenne le jour de	VNEIN	Vent du nord-est (direction lors de l'échan-
VNO	Vent du nord-ouest l'échantillonnage, aéroport	VNOIN	Vent du nord-ouest tillonnage, Beauport)
VSE	Vent du sud-est de Québec)	VSEIN	Vent du sud-est
VSO	Vent du sud-ouest	VSOIN	Vent du sud-ouest
VE	Vent de l'est	VEIN	Vent de l'est
VO	Vent de l'ouest	VOIN	Vent de l'ouest
VS	Vent du sud	VSIN	Vent du sud

Variables
quantitatives

COLI	Moyenne géométrique des concentrations en coliformes fécaux (UFC/100 ml)
TURB	Turbidité de l'eau (UNT)
TEMPE	Température de l'eau (°C)
TEMPA	Température de l'air (°C)
OISE	Nombre de goélands et de canards 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 à l'aéroport de Québec (km/h)
FVENTIN	Force du vent lors de l'échantillonnage à Beauport (km/h)
PR12	Précipitations au cours des 12 heures précédant l'échantillonnage à l'aéroport de Québec (mm)
PR1	Précipitations le jour précédant l'échantillonnage à l'aéroport de Québec (mm)
PR2	Précipitations le 2 ^e jour précédant l'échantillonnage à l'aéroport de Québec (mm)
PR3	Précipitations le 3 ^e jour précédant l'échantillonnage à l'aéroport de Québec (mm)
INT12	Intensité moyenne des précipitations durant les 12 hres avant l'échantillonnage à l'aéroport de Québec (mm/h)
INT1	Intensité moyenne des précipitations le jour précédant l'échantillonnage à l'aéroport de Québec (mm/h)
INT2	Intensité moyenne des précipitations le 2 ^e jour précédant l'échantillonnage à l'aéroport de Québec (mm/h)
INT3	Intensité moyenne des précipitations le 3 ^e jour précédant l'échantillonnage à l'aéroport de Québec (mm/h)
MAX12	Intensité horaire maximale au cours des 12 heures précédant l'échantillonnage à l'aéroport de Québec (mm/h)
MAX1	Intensité horaire maximale le jour précédant l'échantillonnage à l'aéroport de Québec (mm/h)
MAX2	Intensité horaire maximale le 2 ^e jour précédant l'échantillonnage à l'aéroport de Québec (mm/h)
MAX3	Intensité horaire maximale le 3 ^e jour précédant l'échantillonnage à l'aéroport de Québec (mm/h)
PRBEAU	Précipitations le jour de l'échantillonnage à Beauport (mm)
PR1BEAU	Précipitations la veille de l'échantillonnage à Beauport (mm)
PR2BEAU	Précipitations le 2 ^e jour précédant l'échantillonnage à Beauport (mm)
PR3BEAU	Précipitations le 3 ^e jour précédant l'échantillonnage à Beauport (mm)
SOMPRES1	Total des précipitations à l'aéroport de Québec et à Beauport la veille de l'échantillonnage (mm)
SOMPRES2	Total des précipitations à l'aéroport de Québec et à Beauport le 2 ^e jour avant l'échantillonnage (mm)
SOMPRES3	Total des précipitations à l'aéroport de Québec et à Beauport le 3 ^e jour avant l'échantillonnage (mm)
INSO	Ensoleillement le jour de l'échantillonnage (h) à l'aéroport de Québec
INSO1	Ensoleillement la veille de l'échantillonnage (h) à l'aéroport de Québec
SEC	Nombre de jours de temps sec (moins de 2 mm de pluie) précédant l'échantillonnage en considérant les 3 stations météorologiques (Université Laval, Beauport, Aéroport de Québec)

QUALITÉ BACTÉRIOLOGIQUE DE L'EAU

Les concentrations de coliformes fécaux mesurées à la plage 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 = 82), est de 127 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 (tableau 2). En avant-midi (N = 41; moyenne géométrique de 118 UFC/100 ml), la qualité bactériologique semble meilleure qu'en après-midi (N = 41; moyenne géométrique de 137 UFC/100 ml) mais ces différences ne sont toutefois pas statistiquement significatives à un niveau de probabilité de 5 % (test de Wilcoxon pour échantillons appariés; P = 0,240).

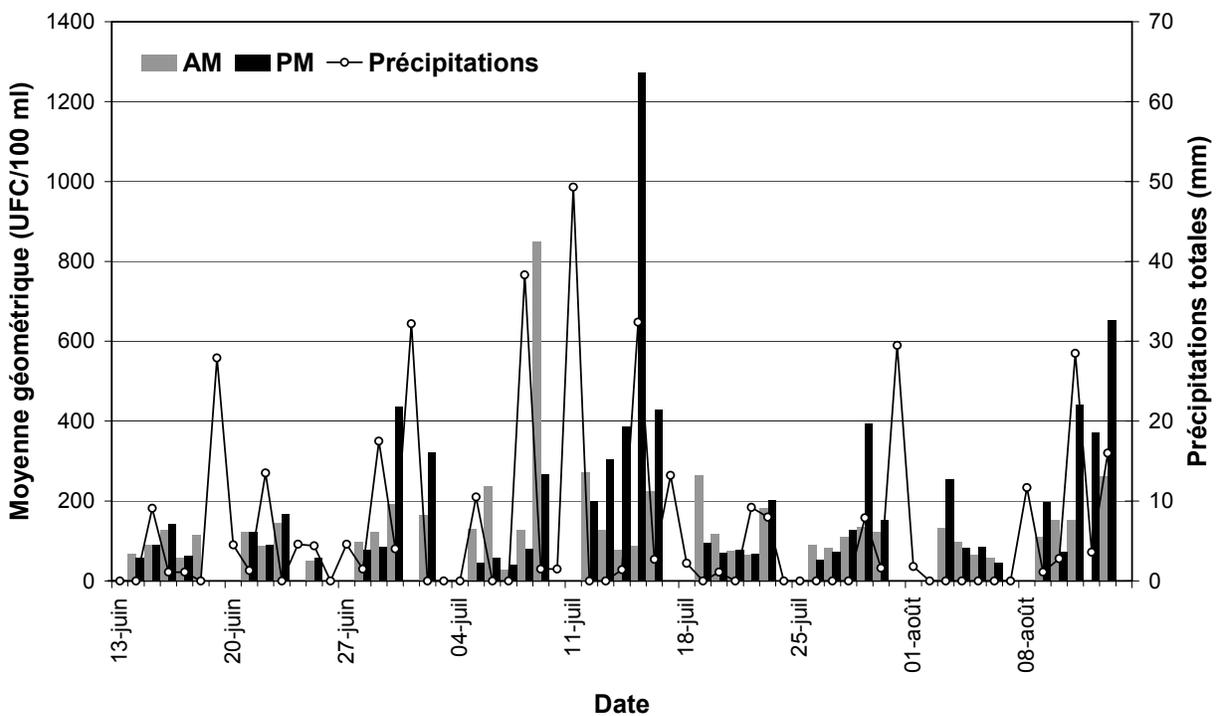


Figure 1. Précipitations journalières à Beauport et concentrations moyennes en coliformes fécaux mesurées le matin et l'après-midi à la baie de Beauport, été 2004.

En avant-midi, le critère de qualité lié à la baignade (200 UFC/100 ml) a été respecté 85 % du temps, alors qu'en après-midi il a été respecté 68 % du temps. La fréquence des journées où le critère a été respecté à la fois le matin et l'après-midi a été de 62 % (26 jours sur 42). Le potentiel pour la baignade du site de la baie de Beauport a été évalué selon le système de classification du programme Environnement-Plage 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	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 a été évalué comme étant bon pour l'été 2004. 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 66 % de la variance des concentrations en coliformes fécaux (transformation logarithmique). Il est basé sur la turbidité de l'eau au moment de l'échantillonnage (TURB), les précipitations enregistrées la veille (PR1BEAU) et l'avant-veille (PR2BEAU) de l'échantillonnage à Beauport et le nombre d'heures d'ensoleillement la veille de l'échantillonnage (INSO1).

$$\text{Log}_{10}(\text{COLI}) = 1,974 + 0,0214(\text{TURB}) + 0,0106(\text{PR1BEAU}) - 0,0142(\text{INSO1}) + 0,005(\text{PR2BEAU})$$

$$R^2 = 0,66$$

$$R^2 \text{ partiels : } \begin{array}{l} \text{TURB} = 0,419 \\ \text{PR1BEAU} = 0,185 \\ \text{INSO1} = 0,03 \\ \text{PR2BEAU} = 0,024 \end{array}$$

Les R^2 partiels correspondent au pourcentage de la variance expliquée 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 ($P < 0,001$).

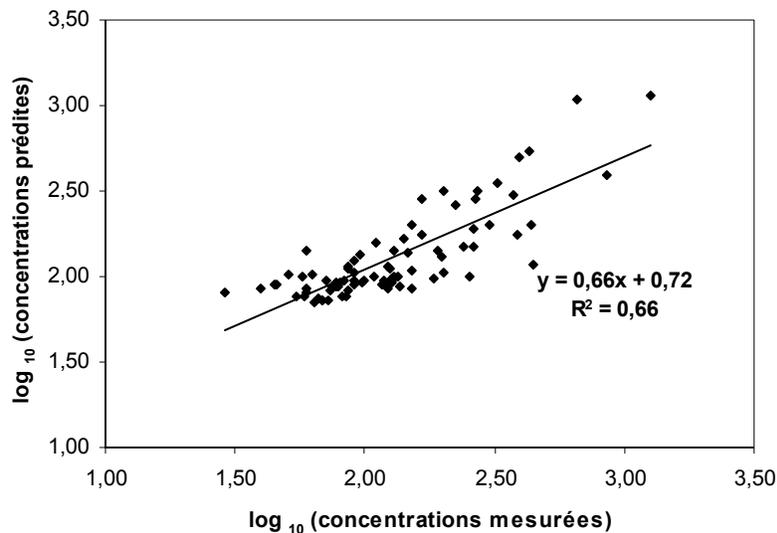


Figure 2. Droite de régression entre les concentrations prédites et les concentrations mesurées à la baie de Beauport, été 2004

DISCUSSION

La turbidité permet d'expliquer 42 % 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, des essais de remise en suspension de sédiment de fond réalisés au cours l'été 2004 (figure 3) n'indiquent aucune différence significative dans les concentrations de coliformes fécaux avant et après brassage (test de Wilcoxon pour échantillons appariés; N = 30; P = 0,792). Une turbidité engendrée par un brassage local résultant de la présence de baigneurs ne ferait donc pas augmenter la contamination bactériologique.

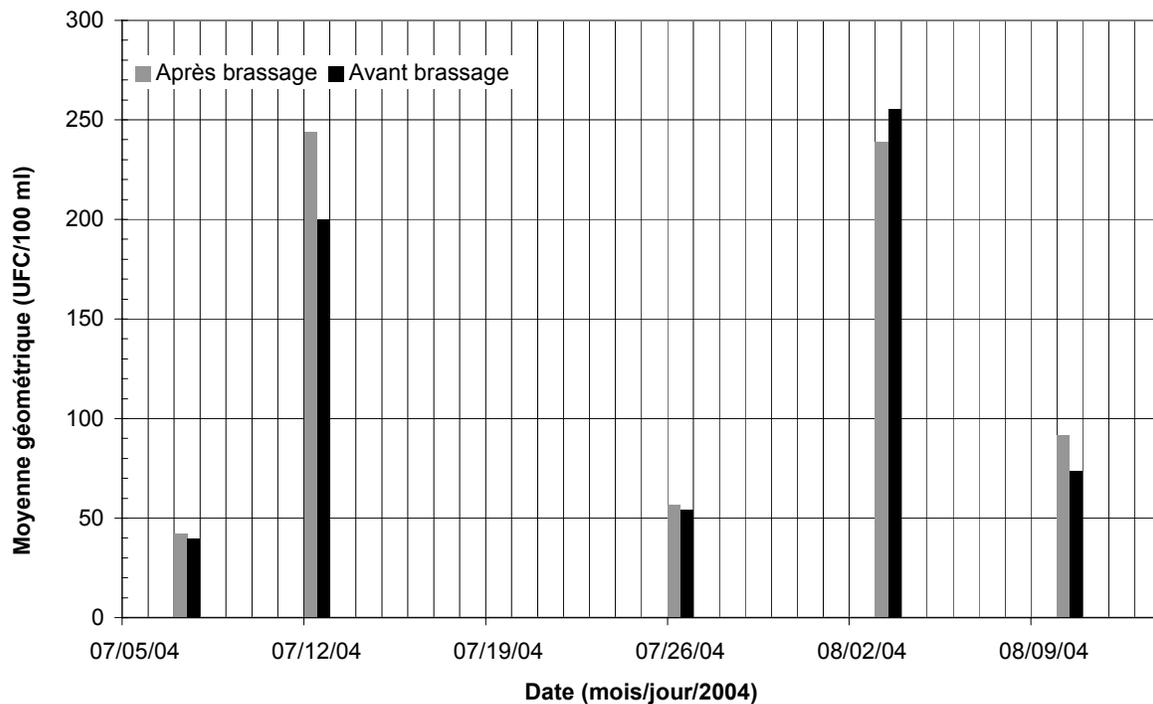


Figure 3. Concentrations géométriques moyennes en coliformes fécaux avant et après la mise en suspension (brassage) des sédiments de fond (expériences effectuées à 13h00).

Les précipitations enregistrées à Beauport 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. La troisième variable explicative est le nombre d'heures d'ensoleillement le jour précédant l'échantillonnage. Elle est corrélée négativement avec les concentrations en coliformes fécaux : un fort ensoleillement la veille de l'échantillonnage implique en effet l'absence de débordements des réseaux d'égouts en plus d'une désinfection naturelle par les ultra-violets. Finalement, les précipitations enregistrées à Beauport l'avant-veille de l'échantillonnage contribuent à expliquer un 2 % supplémentaire de la variance observée.

Le modèle développé à l'été 2004 présente un meilleur pouvoir prédictif ($R^2 = 0,66$) que celui de l'été 2003 ($R^2 = 0,64$) et de l'été 2002 ($R^2 = 0,42$), grâce à l'ajout de la mesure de la turbidité en 2003 et des précipitations enregistrées à Beauport en 2004. 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, 2004a et b). 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 trois derniers étés reposent donc essentiellement sur les mêmes variables explicatives mais ont été raffinés avec le temps.

SCENARIOS DE RÈGLES DE FERMETURE

Les études entreprises depuis 2002 démontrent l'existence d'une forte corrélation entre la turbidité, les précipitations la veille et la concentration en coliformes fécaux de l'eau de la plage de Beauport. Forts de cette connaissance et de la rapidité avec laquelle ces variables peuvent être mesurées, il est raisonnable de se demander s'il est possible de lever partiellement l'interdiction permanente de baignade actuellement en vigueur tout en minimisant les risques sanitaires associés à cette activité. La seule manière d'approcher cette question consiste à établir différentes règles de fermeture et de mesurer le taux d'erreur associé au suivi de ces règles, afin de déterminer le meilleur scénario possible. C'est ce que nous avons fait rétrospectivement à l'aide des données de 2003 et 2004 seulement, la turbidité de l'eau n'ayant pas été mesurée en 2002.

Un total de 162 visites ont été effectuées à la plage de Beauport en 2003 et 2004. Le tableau 3 montre deux scénarios de règles de fermeture, le premier plus sévère que le deuxième, qui sont représentatifs de ce qu'il serait possible d'accomplir grâce à la connaissance acquise au cours des trois dernières années.

Tableau 3. Taux de succès de deux scénarios de règles de fermeture basés sur les données des étés 2003 et 2004 (162 visites).

Règle de fermeture	Taux d'ouverture non sécuritaire de la plage	Taux de fermeture inutile de la plage	Taux d'ouverture de la plage
Turbidité > 8 UNT ou Précipitations la veille à Beauport > 2 mm	0 % (0/162)	26 % (42/162)	46 % (75/162)
			Moyenne géométrique = 75 UFC/100ml Plage classée B (bonne)
Turbidité > 12 UNT ou Précipitations la veille à Beauport > 15 mm ou Précipitations la veille + l'avant-veille à Beauport > 25 mm	5 % (8/162) *	10 % (16/162)	67 % (109/162)
			Moyenne géométrique = 89 UFC/100ml Plage classée B (bonne)

* Pour les 8 visites où la plage aurait été ouverte alors qu'elle aurait dû être fermée, la moyenne géométrique de la concentration de coliformes fécaux est 258 UFC/100 ml et la concentration maximale est 442 UFC/100 ml.

Le tableau 3 montre que malgré la sévérité des règles de fermeture du premier scénario, qui aurait permis d'obtenir un taux d'ouverture non sécuritaire de 0 %, la plage aurait néanmoins pu être ouverte 46 % du temps, soit environ la moitié du temps. Si le deuxième scénario de fermeture avait été utilisé, le taux d'ouverture non sécuritaire aurait été 5 % et le taux global d'ouverture 67 %. Ce deuxième scénario en est un qui cherche à minimiser la somme des deux taux d'erreurs (ouverture non-sécuritaire et fermeture inutile), en privilégiant la combinaison donnant le plus petit taux d'ouverture non sécuritaire si plus d'un scénario donnent la même somme minimale de taux d'erreurs. Une analyse statistique plus systématique permettrait d'obtenir le scénario optimal, bien que le deuxième scénario du tableau 3 en soit probablement très proche.

Un point intéressant à noter est la dernière colonne du tableau 3. On peut voir que grâce à l'application des règles de fermeture, la moyenne géométrique de la concentration de coliformes fécaux devient inférieure à 100 UFC/100 ml, ce qui représente une plage de qualité B (bonne) pour la combinaison des années 2003 et 2004, selon le système de classement du Programme Environnement-Plage. Or, en tenant compte de l'ensemble des journées, l'eau de baignade de la plage de Beauport était de qualité C (passable) pour les années 2003 (135 UFC/100 ml) et 2004 (127 UFC/100 ml). Par contre, en appliquant des règles de fermeture préventives, les baigneurs auraient été exposés à une eau beaucoup moins contaminée. Ceci démontre l'effet bénéfique d'une gestion préventive de la plage à l'aide de règles de fermeture.

La figure 4 montre graphiquement l'effet de l'application du deuxième scénario de règles de fermeture du tableau 3. La figure montre un histogramme répartissant les 162 visites selon la concentration de coliformes fécaux mesurée. Deux choses sautent aux yeux sur ce graphique. Premièrement, on note sur l'histogramme foncé que la grande majorité des visites présentaient une concentration de coliformes fécaux inférieure au critère de qualité (200 UFC/100 ml). Deuxièmement, on remarque le nombre significatif de visites où la contamination était supérieure au critère de qualité (45 sur 162), et ce parfois largement, une situation où la plage ne doit pas être ouverte. Or, l'histogramme pâle montre à quel point l'application du deuxième scénario de règles de fermeture (tableau 3) permet d'éviter d'exposer la population à ces épisodes de forte contamination bactériologique. Evidemment, des règles de fermeture basées sur des données statistiques ne peuvent pas être infaillibles, tel qu'observable par les 8 visites supérieures à 200 UFC/100 ml restante même après l'application des règles de fermeture. Il est par contre clair qu'il est possible de prédire avec une grande efficacité les épisodes de forte contamination.

Il est possible d'éliminer complètement les périodes de contamination supérieures à 200 UFC/100 ml en appliquant des règles de fermeture plus sévères, comme celles du premier scénario du tableau 3. Toutefois, le prix à payer pour une plus grande discrimination des périodes supérieures à 200 UFC/100 ml est une augmentation du nombre de fermetures de la plage alors que l'eau y est pourtant baignable.

Plage de Beauport Etés 2003 et 2004 (162 visites)

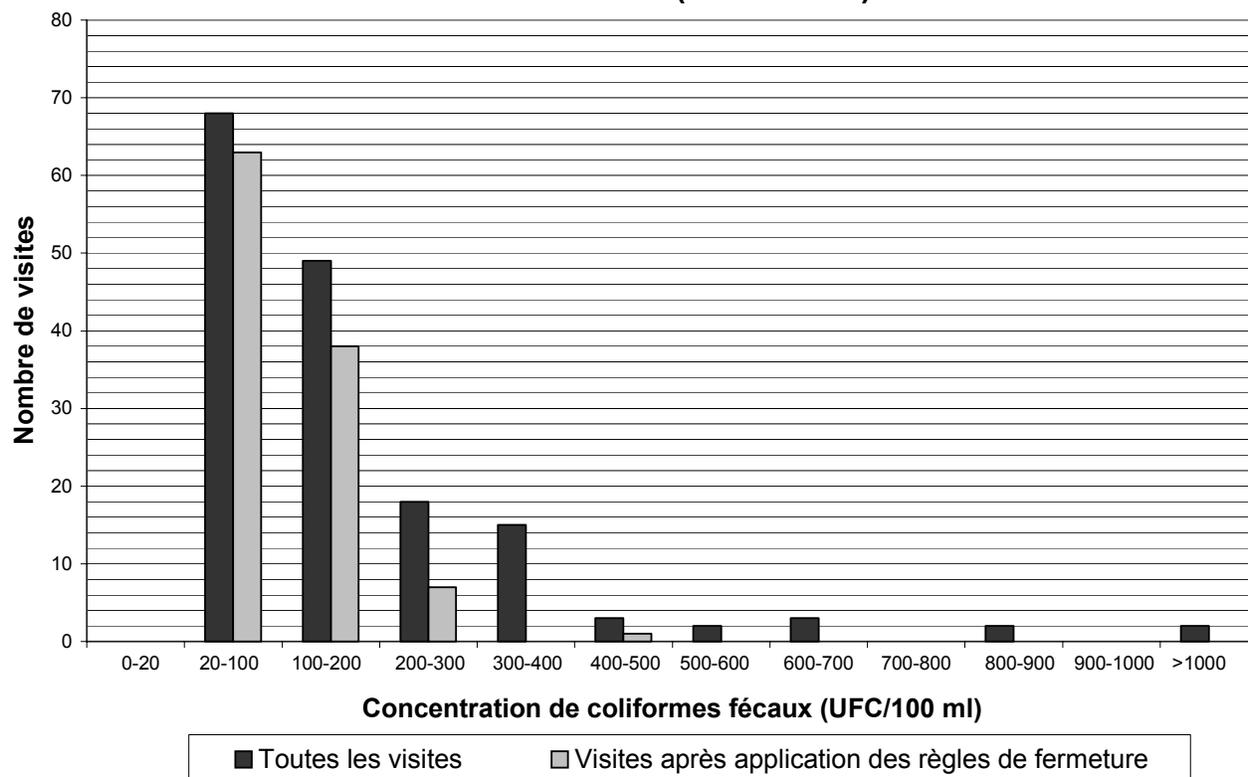


Figure 4. Histogramme des visites à la plage de la baie de Beauport en fonction de la concentration de coliformes fécaux mesurée, avant et après application d'un scénario de règles de fermeture. Le scénario utilisé force la fermeture de la plage lorsque l'une des condition suivante est rencontrée: turbidité de l'eau > 12 UNT; précipitations la veille à Beauport > 15 mm; précipitations la veille + l'avant-veille à Beauport > 25 mm.

RISQUE DE CONTRACTER UNE GASTROENTÉRITE LORS DE LA BAIGNADE

L'étude la plus sérieuse et approfondie à ce jour sur les risques de contracter une maladie gastroentérique durant une baignade a été publiée en 2004 (Wiedenmann, 2004). Effectuée en Allemagne sur des plages d'eau douce, cette étude parvient à mettre en graphique le risque de contracter une gastroentérite en fonction de la concentration de bactéries E.coli à laquelle est soumis un baigneur. Au total, les chercheurs ont suivi l'état de santé de 962 baigneurs et 1019 non-baigneurs, tous volontaires pour cette étude. Les baigneurs ont dû se soumettre à une baignade de 10 minutes comprenant au moins 3 immersions totales de la tête, pendant que la concentration locale de E.coli dans l'eau était mesurée.

Le tableau 4 montre le risque de contracter une gastroentérite en fonction du 95^e centile de la concentration de E.coli rencontrée par un baigneur. Il est important de souligner que ce risque est un risque « excédentaire », du fait qu'il existe toujours une fraction de la population de non-baigneurs atteinte de gastroentérite. En se référant au tableau 4, on voit que sur une population de 1000 individus non-baigneurs, on peut en général en dénombrier 14 souffrant d'une gastroentérite. Si ces 1000 individus sont soumis à une baignade de 10 minutes comprenant au moins 3 immersions de la tête dans une eau dont le 95^e centile de la concentration de E.coli est 100 E.coli/100 ml, le nombre de gastroentérites augmentera à 16. Ceci donne un risque excédentaire de 0,2 % (i.e. 16 moins 14, divisé par 1000).

Tableau 4. Risque excédentaire lié à la baignade de contracter une gastroentérite, selon l'étude de Wiedenmann (Wiedenmann, 2004).

95e centile de la concentration de E.coli (E.coli/100 ml)	Nbre de gastroentérites sur 1000 individus	Risque excédentaire de contracter une gastroentérite (baignade de 10 minutes avec au moins 3 immersions de la tête)
Zéro (non-baigneur)	14	0 %
100	16	0,2 %
200	18	0,4 %
300	19	0,5 %
400	21	0,7 %
500	22	0,8 %
1000	27	1,3 %

Les études effectuées à la baie de Beauport au cours des trois dernières années utilisent les coliformes fécaux comme indicateur de contamination microbienne de l'eau de baignade, comme l'exige le Programme Environnement-Plage du ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs. Par contre, l'étude allemande utilise la bactérie E.coli comme indicateur de contamination. Or, une méthode de mesure des E.coli a été développée en 2004 au Centre d'analyse de la Ville de Québec. Cette méthode a permis de conclure que pratiquement 100 % des coliformes fécaux prélevés dans les échantillons d'eau de la baie de Beauport étaient des E.coli. Il devient alors possible, grâce au tableau 4 tiré de l'étude allemande, d'estimer le

risque excédentaire de contracter une gastroentérite à la plage de la baie de Beauport durant une baignade de 10 minutes comprenant au moins 3 immersions de la tête. Le tableau 5 montre ces estimations.

Tableau 5. Estimation du risque de contracter une gastroentérite à la baie de Beauport basée sur l'étude de Wiedenmann (Wiedenmann, 2004), en fonction de divers scénarios de règles de fermeture de la plage. Le 95^e centile de la concentration de coliformes fécaux est calculé à partir des 162 visites effectuées en 2003 et 2004 auxquelles sont rétrospectivement appliquées les règles de fermeture.

Règles de fermeture de la plage	95 ^e centile de la concentration de coliformes fécaux (UFC/100 ml)	Nbre de gastroentérites sur 1000 individus	Risque excédentaire de contracter une gastroentérite (baignade de 10 minutes avec au moins 3 immersions de la tête)
Non-baigneurs	Non-baigneurs	14	0 %
Aucune	511	22	0,8 %
Turbidité > 12 UNT ou Précipitations la veille à Beauport > 15 mm ou Précipitations la veille + l'avant-veille à Beauport > 25 mm	233	18	0,4 %
Turbidité > 8 UNT ou Précipitations la veille à Beauport > 2 mm	153	17	0,3 %

En toute rigueur, il est important de noter que les résultats de l'étude de Wiedenmann sont valables pour des conditions de baignade contrôlées. On peut présumer que les risques sont plus élevés avec une baignade plus intense (plus de 10 minutes avec des immersions fréquentes de la tête) et une population plus vulnérable (jeunes enfants, personnes âgées, personnes immunodéficientes). Il ne faut pas non plus ignorer l'existence de d'autres problèmes de santé associés à la baignade dans une eau contaminée (infection des yeux, des oreilles, de la peau, etc.).

CONCLUSIONS

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 actuel du site pour la baignade est évalué comme étant bon. Au cours de l'été 2004, la qualité bactériologique de l'eau aurait permis la baignade deux jours sur trois. Les concentrations en coliformes fécaux sont fortement corrélées à la turbidité et aux précipitations enregistrées la veille de l'échantillonnage à Beauport.

Des essais de mise en suspension de sédiment de fond réalisés au cours l'été 2004 n'indiquent aucune différence significative dans les concentrations de coliformes fécaux avant et après brassage. Une turbidité engendrée par un brassage local résultant de la présence de baigneurs ne ferait donc pas augmenter la contamination bactériologique.

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. 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.

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. et J. LACOURSIÈRE, 2004a. *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 no ENV/2004/0141, rapport no QE/144, 10 p.

HÉBERT, S. et J. LACOURSIÈRE, 2004b. *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 no ENV/2004/0140, rapport no QE/143, 9 p.

LAJOIE, A., 2005. *Traitement des eaux*, Ville de Québec, communication privée.

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.

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.

WIEDENMANN, A. et al., 2004. *Epidemiological Determination of Disease Risks from Bathing*.