

## Développement d'un modèle de prédiction d'*E. coli* comme outil d'aide à la décision pour permettre la baignade à la Baie de Beauport, Ville de Québec

Cyril Garneau<sup>1</sup>, Yves Secretan<sup>2</sup>, Sophie Duchesne<sup>2</sup>,  
Marie-Ève Jean<sup>2</sup>, Peter A. Vanrolleghem<sup>1</sup>

<sup>1</sup>modelEAU, Université Laval

<sup>2</sup>INRS – Eau, Terre et Environnement



AMERICANA  
Montréal  
22 mars 2017



INRS  
UNIVERSITÉ DE RECHERCHE

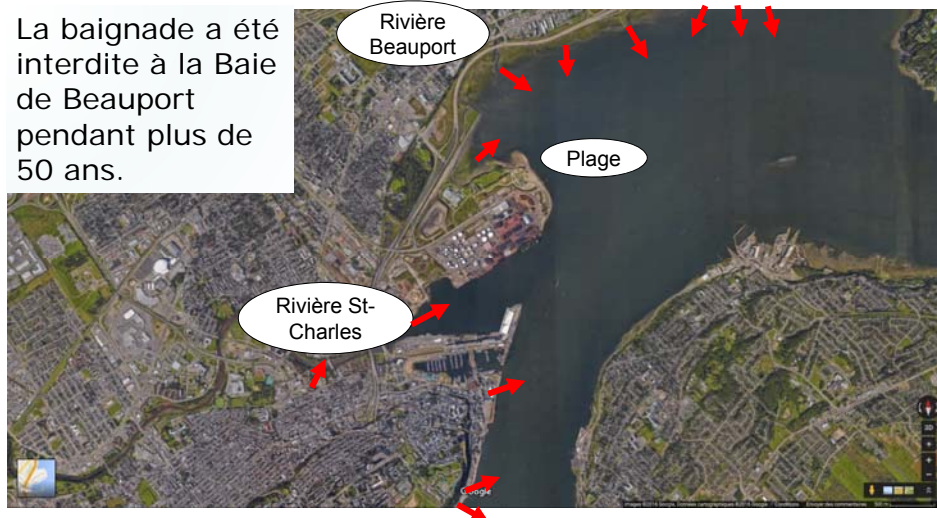


### Plan de présentation

- Mise en contexte  
(50 ans sans baignade)
- Développement du modèle  
(bonnes données + incertitude)
- Résultats du modèle  
(on peut se baigner en sécurité!)
- Conclusions et perspectives  
(*Vecteur Environnement*, mars 2017, p. 54)

## Mise en contexte

La baignade a été interdite à la Baie de Beauport pendant plus de 50 ans.



3

## Mise en contexte

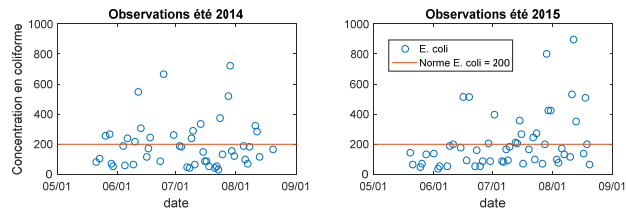
- Près de 500 millions de dollars d'investissement plus tard...



4

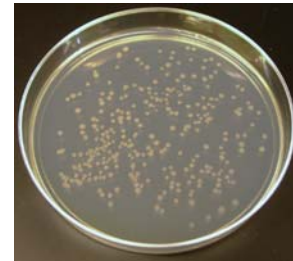
## Mise en contexte

- Près de 500 millions de dollars d'investissement plus tard, l'eau de qualité est de retour...



...Mais le résultat n'est disponible que le lendemain.

- Comment identifier ces jours?  
→ Par un modèle prédictif de la qualité de l'eau utilisant les données disponibles le matin même.



5

## Développement du modèle - Concepts clés

- L'ouverture de la plage sur la base du modèle doit répondre à deux contraintes :
  1. Protéger le public en minimisant son exposition à la contamination fécale.
  2. Respecter la norme de la santé publique de 200 UFC/100ml.
- Le modèle ne prédit pas l'influence des déversements en temps sec.  
→ La plage est fermée à chaque déversement en temps sec.

6

## Développement du modèle - Variables

- Bases de données de VdQ contenant des centaines de variables explicatives.

35 pluviomètres sur le territoire	Capteurs de déversement sur 200 ouvrages	Données à la sortie de la station d'épuration
Vents et marées	Goélands sur la plage	Mesures ponctuelles dans les rivières et déversoirs pluviaux

- Les variables sélectionnées devaient répondre à 3 critères :
  1. Disponible au moment de la prévision.
  2. Forte corrélation avec la concentration d'*E. coli* observée.
  3. Faible corrélation avec les autres variables explicatives.

7

## Développement du modèle – modèle statistique

- Le modèle : Régression linéaire multivariée.

$$\log_{10}E. coli = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_n X_n$$

- Les paramètres  $\beta_i$  représentent les poids de chaque variable.
- Les variables  $X_i$  :

Variable	Influence potentielle
Pluviométrie des 24 dernières heures	4x
Hauteur et phase de marée	3x
Goélands et grands oiseaux	2x
Direction du vent	1.5x

8

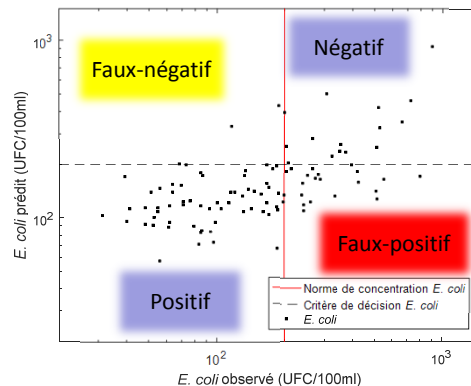
## Développement du modèle

### Résultat sur les données prélevées en 2014-2015

- Le modèle permet de reproduire les observations raisonnablement.

Mais est-il robuste?

- Évaluation de l'incertitude du modèle par analyse Monte Carlo.



9

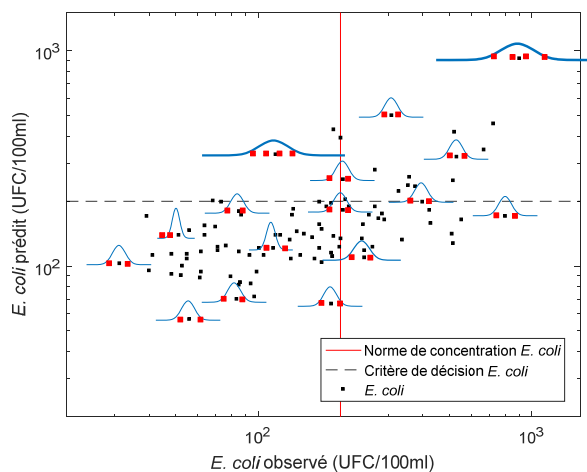
## Développement du modèle – Incertitude

- Chaque observation est la moyenne d'*E. coli* de 4 à 14 échantillons d'eau.

- L'erreur-type de la moyenne est :

$$ET = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

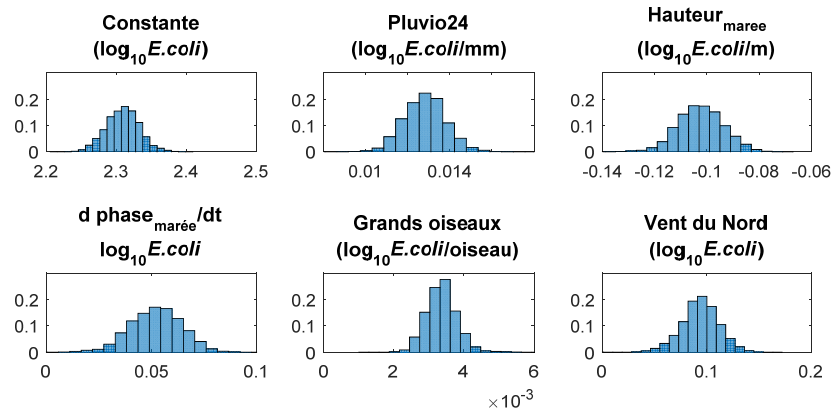
- Chaque mesure est perturbée et les paramètres sont recalculés.



10

## Développement du modèle – Incertitude

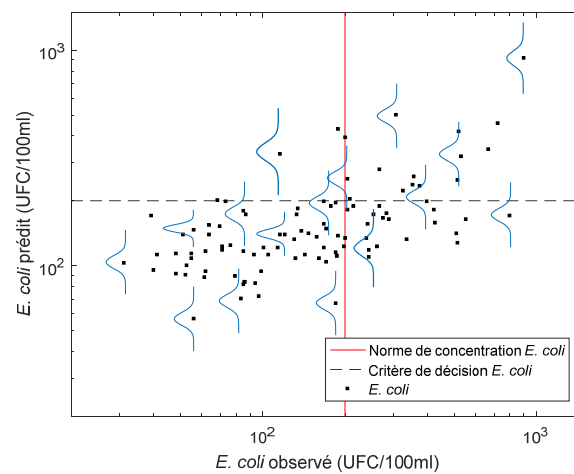
- Variabilité sur les paramètres  $\beta_i$ .



11

## Développement du modèle – Incertitude

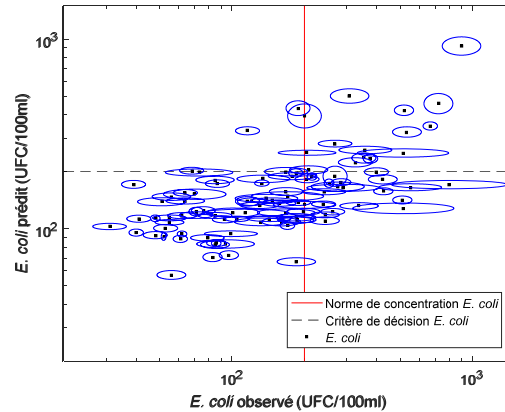
- Les incertitudes du modèle sont propagées par Monte Carlo en incertitudes des prévisions.



12

## Développement du modèle

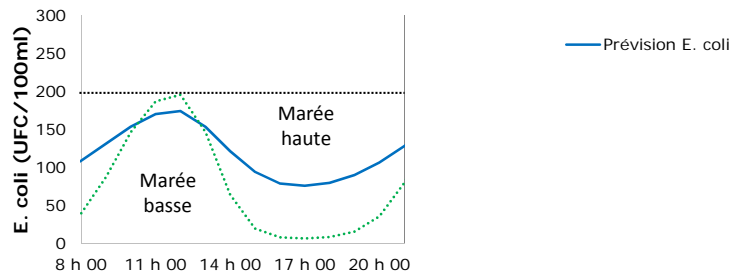
- Chaque prédiction inclut une estimation d'*E. coli* et sa variabilité.
- Comment transposer ces résultats ponctuels sur un système dynamique?



13

## Résultats du modèle – un profil temporel

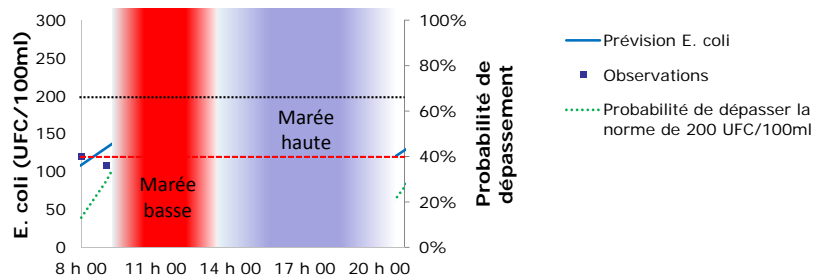
- Le modèle prédit une très forte variation de la qualité de l'eau.
- Et une forte variation du risque de dépassement de la norme en fonction du temps.



14

## Résultats du modèle – Validation

- Une campagne d'échantillonnage a ciblé spécifiquement l'effet de marée
- Il est donc important de tenir compte de la marée dans le protocole d'échantillonnage et dans la prise de décision.



15

## Résultats du modèle – Sur le terrain



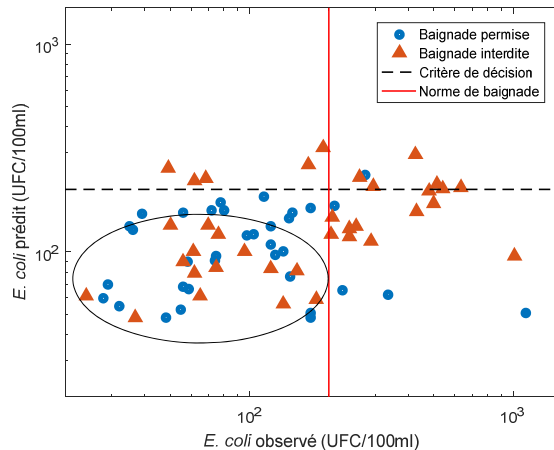
[http://www.lapresse.ca/le-soleil/actualites/la-capitale/201606/26/01-4995534-maree-de-baigneurs-a-la-baie-de-beauport.php?utm\\_categorieinterne=traficdrivers&utm\\_contenuinterne=cyberpresse\\_vous\\_suggere\\_5009216\\_article\\_POS4](http://www.lapresse.ca/le-soleil/actualites/la-capitale/201606/26/01-4995534-maree-de-baigneurs-a-la-baie-de-beauport.php?utm_categorieinterne=traficdrivers&utm_contenuinterne=cyberpresse_vous_suggere_5009216_article_POS4)

- Saison de baignade été 2016 : 24 juin au 6 septembre.
  - 39 jours de baignade.
  - 35 jours de fermeture préventive.

16



## Résultats du modèle – Sommaire de l'été 2016



- 34 jours de baignade bien identifiés.
- 5 faux-positif :
  - 2 fois : Très grande incertitude sur la mesure d'*E. coli*.
  - 2 fois : Ouverture de la plage en après-midi seulement.
  - 1 fois : Erreur du modèle ou de la mesure.
- 20 fermetures préventives :  
Le modèle prédisait une détérioration de la qualité sur les heures de baignade.

17

## Conclusions

- Deux années de données nécessaires pour construire le modèle.
- Quatre variables, disponibles à tous les matins, utilisées pour faire la prévision.
- Le modèle prédit :
  - Un profil temporel de la concentration d'*E. coli*.
  - La probabilité de dépasser la norme.
- Effet de la marée sur la qualité de l'eau quantifié et validé par une campagne de mesure.
- Prise de décision sécuritaire durant l'été 2016.
  - 39 jours de baignade.
  - 35 jours de fermeture préventive.
- Article publié dans *Vecteur Environnement*, mars 2017, p.54

18

## Perspectives

- La réalisation de campagnes de mesure et le développement de modèle permettent d'ouvrir des secteurs à la baignade avec confiance.
- Le modèle présenté vient appuyer les mesures. Il ne les remplace pas.
- Une ville évolue chaque année :
  - De nouveaux quartiers génèrent de nouvelles sources de contamination.
  - Certaines sources sont identifiées et éliminées.
  - La gestion de l'eau peut changer (par ex. bassins de rétention).
- Une mise à jour des paramètres et une remise en question des variables utilisées doivent être faits régulièrement.

19

## Et la suite?...



Plage Anse-au-Foulon, 1960  
Archives de la Ville de Québec # N023202

20