

INFRA 2014 – 20^e édition
D1 - Gestion des risques en eau potable

Détermination des conditions à risque pour le développement des coliformes fécaux à l'eau brute de prises d'eau potable

Etienne Foulon*

Alain N. Rousseau, Manuel J. Rodriguez

Mardi 2 Décembre, INFRA
Palais des congrès de Montréal

**etienne.foulon@ete.inrs.ca*



INRS
Université d'avant-garde

Préambule

En Ontario, accident de Walkerton en Mai 2000

- Pluies intenses et erreurs humaines → 7 morts et 2 300 malades (population totale 5000)
- Mouvement national et un rapport de 121 recommandations (juge O'Connor) pour la protection des sources

Approche à barrières multiples du CCME

- Protection *intégrée à l'échelle du bassin versant*
- Suivi de qualité de l'eau
- Traitements efficaces: la DERNIERE BARRIERE
- Concrétisation le 3 juillet 2007 par la Loi sur l'eau saine

Préambule: Qualité eau brute, Santé ~ Météo

Aux États-Unis, comme au Canada, entre 1948 et 1994², épidémies hydriques

- 68% précédées par des pluies supérieures au 80ème percentile (USA)
- pluie > 93^{ème} percentile → ↗ risque maladie de 2,3⁶ (Canada)

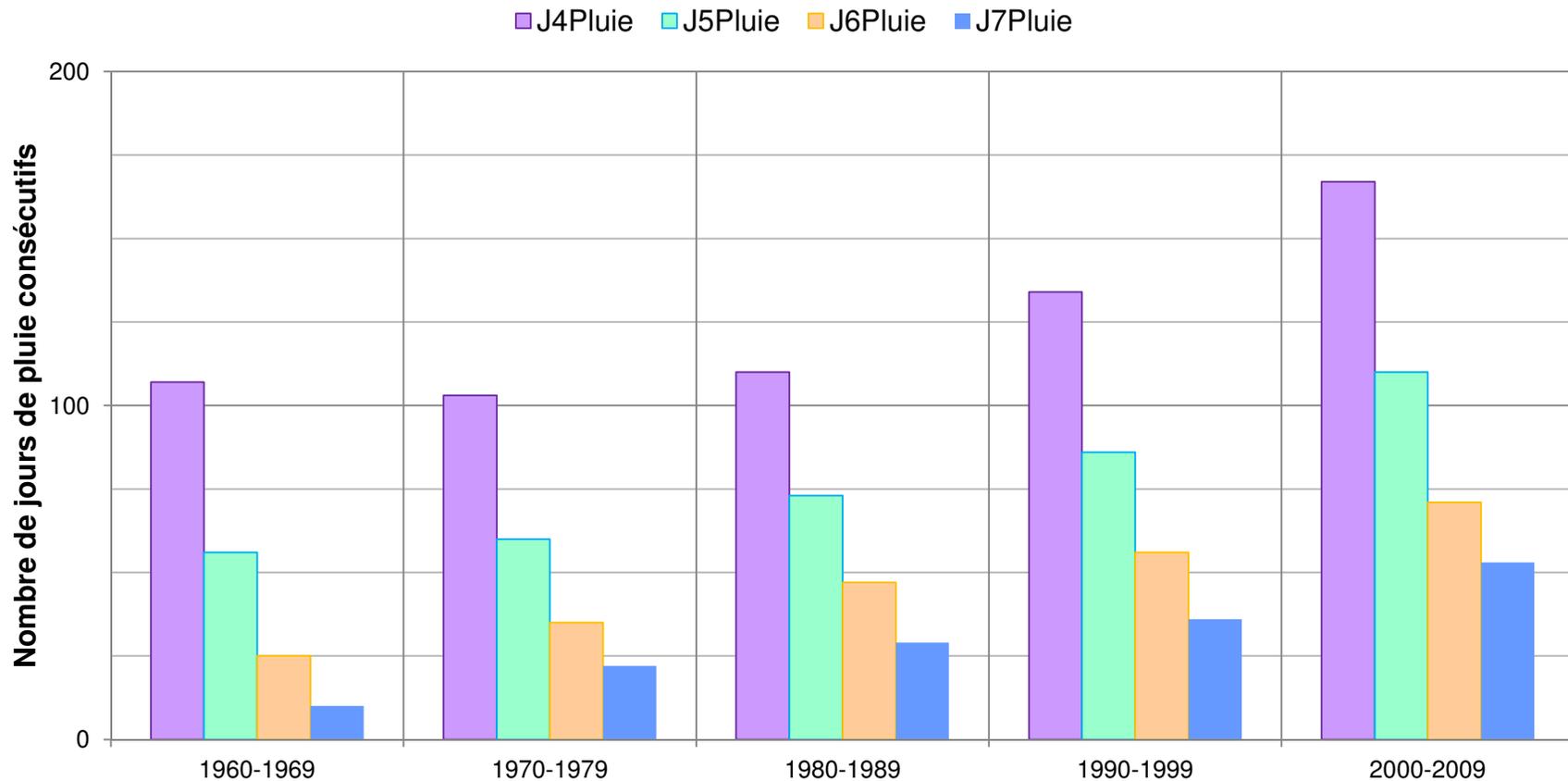
Gastroentérites endémiques et épidémies hydriques^{1,2,3,4,5,6}

- Facteurs explicatifs d'épidémies hydriques
 - Conditions météo extrêmes (pluies intenses décile élevé)
 - Températures élevées
 - Accès des animaux aux cours d'eau
 - Turbidité indicateur du potentiel de contamination/épisode de gastro
- Principalement en période de hautes eaux (élargissement, ruissellement et turbidité)

Influence de certains événements météorologiques sur la santé des consommateurs

¹ Aramini *et al.* (2000), ² Curriero *et al.* (2001), ³ Harper *et al.* (2011), ⁴ Hrudefy & Hrudefy (2007), ⁵ Schuster *et al.* (2005), ⁶ Thomas MK *et al.* (2006)

Préambule: Changements Climatiques locaux



FOULON. E., ROUSSEAU A.N., RODRIGUEZ M.J. (2013) Analyse des patrons d'évolution de la pluviométrie, la température et des E. coli. Présentation Orale. La recherche hydrologique au Québec dans un contexte de changements climatiques. État des lieux et perspectives, Québec, QC, Canada

Préambule: Changements Climatiques et eau de surface

Delpla I. et al. (2009), *Environnement International* **35**:1225-1233

Dégradation de la qualité de l'eau¹

- Augmentation globale des vitesses et quantités de chimiques (Arrhénius)
- Exportation de nutriments/polluants/sédiments
- Apport en MO



Augmentation de la variabilité de la qualité de l'eau et problèmes d'adaptation

- Réchauffement de la colonne d'eau et risques de blooms algaux (efflorescence)



Impacts sur le traitement

- Influence sur sous-produits de désinfections (THM)
- Demandes en chlore et produits chimiques supérieures



Diminution des quantités d'eau à l'étiage²

Delpla I. *et al.* (2009), Impacts of climate change on surface water quality in relation to drinking water production *Environnement International* **35**:1225-1233; ² CEHQ. 2013. Atlas hydroclimatique du Québec méridional - Impact des changements climatiques sur les régimes de crue, d'étiage et d'hydraulicité à l'horizon 2050. Québec, 21 pp.

Préambule: Vulnérabilité des stations de traitement

Design et opération des stations

- Prises d'eau peu profondes¹ - 65% <5m
- Conception basée sur des paramètres moyens² (non temps de pluie)
- Gestion du traitement réactive plutôt que proactive (crues turbides et chloration)
- Non dysfonctionnement & faible turbidité des eaux brutes MAIS *Giardia* et *Cryptosporidium* à l'eau traitée^{3,4,5}

Qualité

Identification des municipalités vulnérables au Québec^{6,7}

- Analyse fréquentielle⁶ et application d'une méthode de régionalisation⁷
- 132/314 systèmes considérés (19% de la population du Québec)
- **7 systèmes vulnérables (dont la Ville de Québec – rivière St-Charles)**

Quantité

¹ MDDEP (2008), ² MDDEP (2002), ³ Karanis *et al.* (1998), ⁴ Coffey *et al.* (2010), ⁵ Payment *et al.* (2000), ⁶ Nantel (2006), ⁷ Bérubé (2007)

Problématique, Objectif et Méthode

Problématique

Influence de la météo sur la santé des consommateurs

Stratégie de protection et de conservation des sources destinées à l'approvisionnement en eau potable

Augmentation de la **variabilité de la qualité de l'eau** et problèmes d'adaptation

Document de consultation publique avril 2012

Clôture de la consultation 10 juin 2012

Suite?
Vulnérabilités quantitatives et qualitatives historiques

Objectif et méthode

Objectif: Développement d'une méthode d'évaluation des périodes à risque pour la prolifération des coliformes fécaux à l'eau brute d'une station de traitement

Méthode: Construction de filtres sur les conditions hydrométéorologiques

- Constitution de différents filtres
- Application à la base de données
- Comparaison des échantillons obtenus
- Travail par strates de débits et discrimination saisonnière



Données

Données

Qualité de l'eau

- T°_{eau} , conductivité, pH
- Couleur apparente, turbidité
- Coliformes fécaux, coliformes totaux
- *BD des stations de traitements (mesures obligatoires), points de suivis*

8 Points de mesures 2004-2014

- Alimentent les stations de:
 - Loretteville, Charlesbourg, Beauport
 - Charny

Météo

- Pluie, Neige
- Température
- *Stations environnement Canada, Ville de Québec, et données utilisées pour CEHQ (2013a)*

Méthode

- Moyenne pondérée inverse des distances

Hydrométrie

- *Stations hydro*
- *Bassins d'implantation HYDROTEL*

HYDROTEL

- Modèle hydrologique distribué

¹CEHQ (2013), Atlas hydroclimatique du Québec méridional - Impact des changements climatiques sur les régimes de crue, d'étiage et d'hydraulicité à l'horizon 2050. Québec, 21 pp.

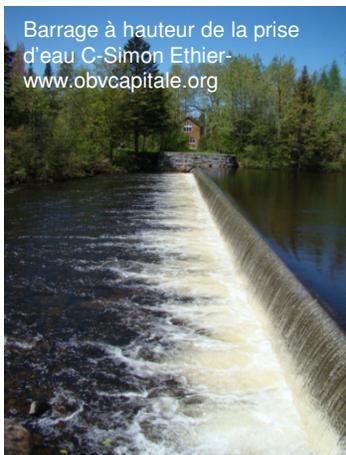
Données – UTE de Loretteville

Prise d'eau de Château d'eau

- Alimente 285 000 personnes
- Consommation > 160 000 m³/jour

Variations de Qualité

- Eau provient de 3 rivières (St-Charles, Nelson et Jaune)
- Réseaux unitaires, connections gouttières, mares et étangs privés



Données météo (2004-2014)

- Fréquence journalière
- Utilisation du modèle hydrologique HYDROTEL et des stations d'Environnement Canada

Données de qualité (2004-2014)

- 4 prélèv/semaine (L-M-M-J)
- Données fournies par la Ville de Québec et la Chaire de recherche en eau potable de l'Université Laval

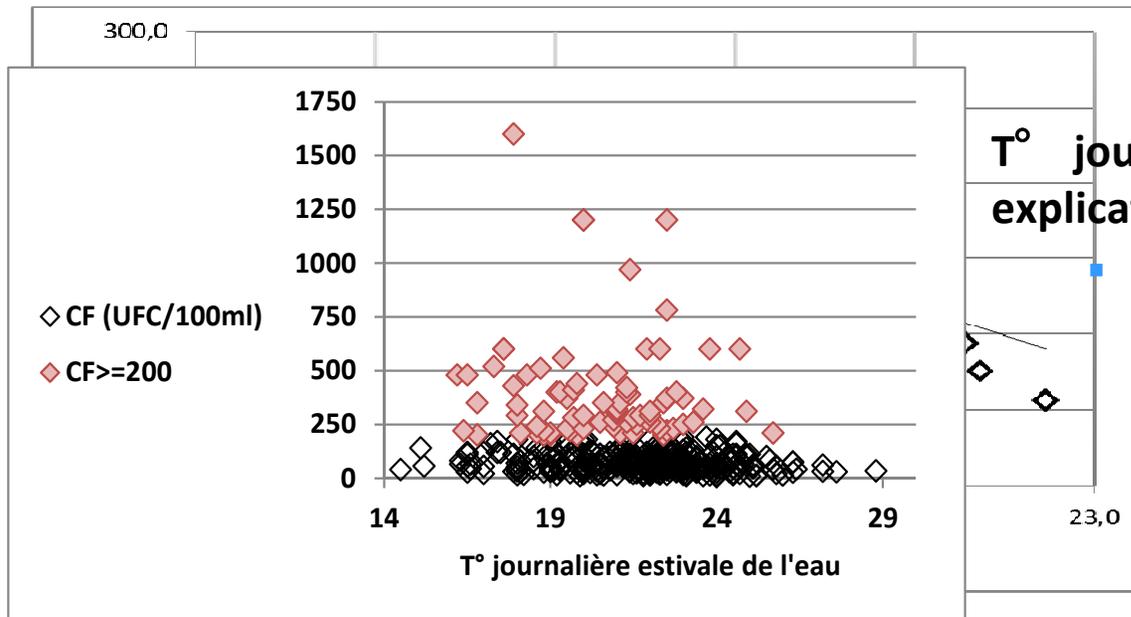
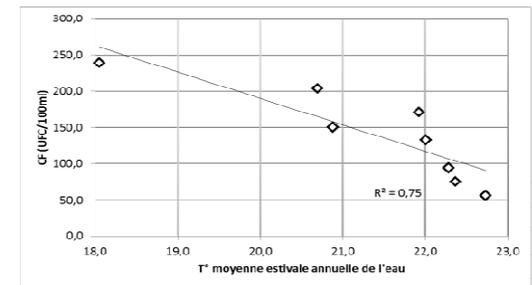
Résultats

Présentation de quelques exemples significatifs
Travail réalisé pour l'ensemble des variables indépendantes

Résultats - Température de l'eau

T° moyenne de l'eau, facteur explicatif des CF

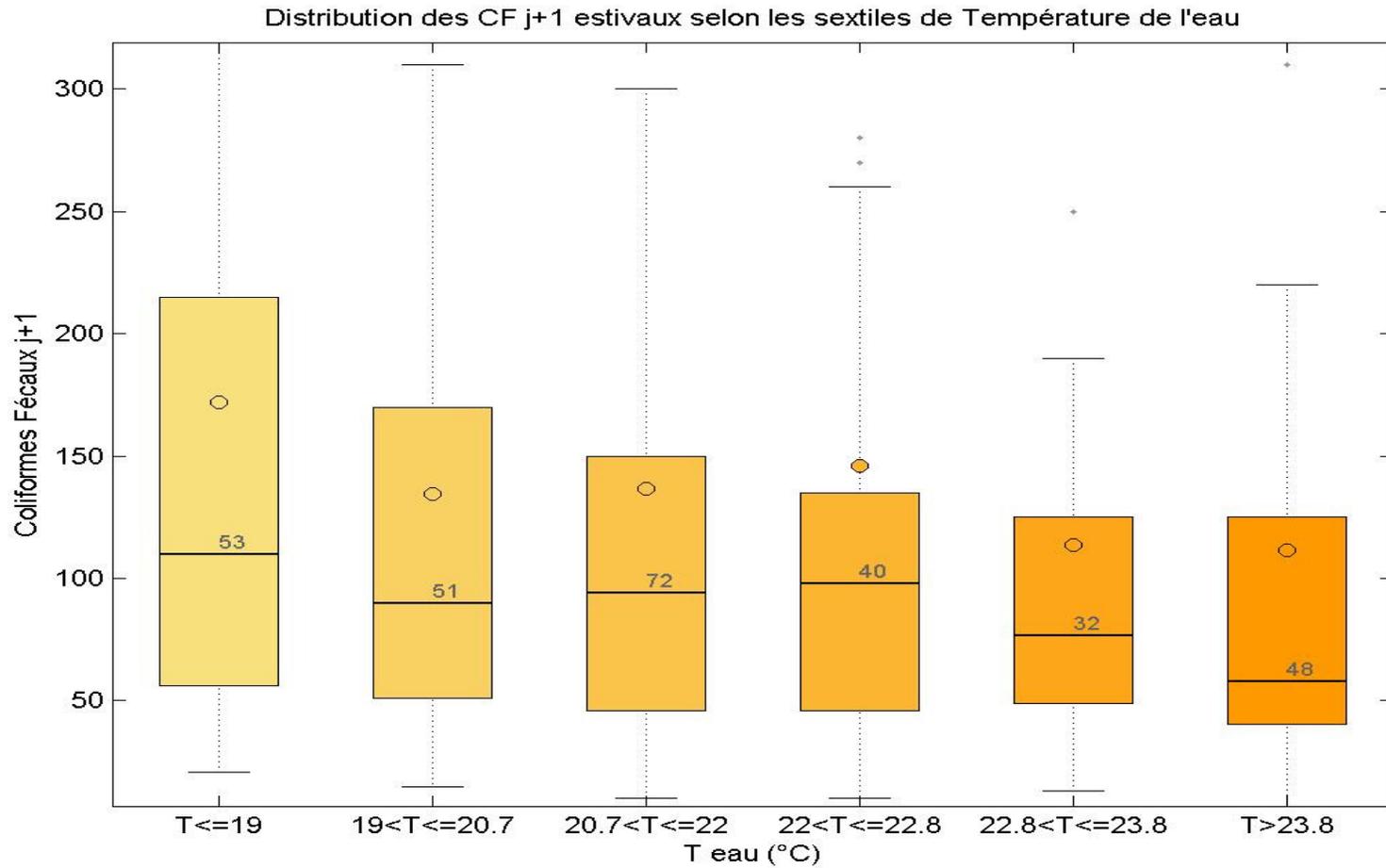
- Relation claire sur les moyennes estivales annuelles
 - Effet protecteur des U.V. (// traitement)
- T° fraîche (≈10° C) semble limiter la prolifération
 - Relié à la disponibilité des coliformes? (survie aux T° froides)



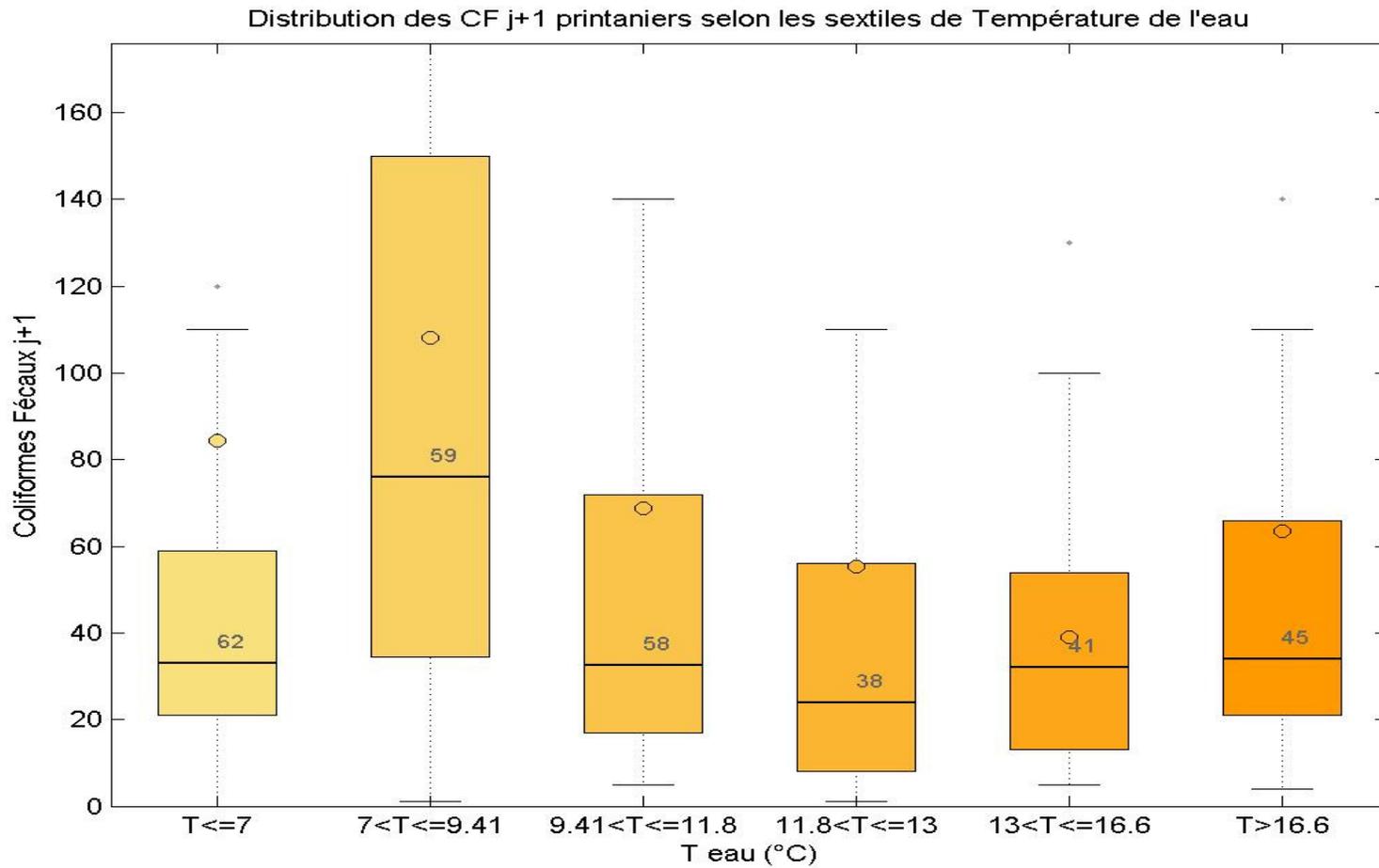
T° journalière de l'eau, facteur explicatif des CF?

■ Corrélation très faible

Résultats - Température de l'eau - Été



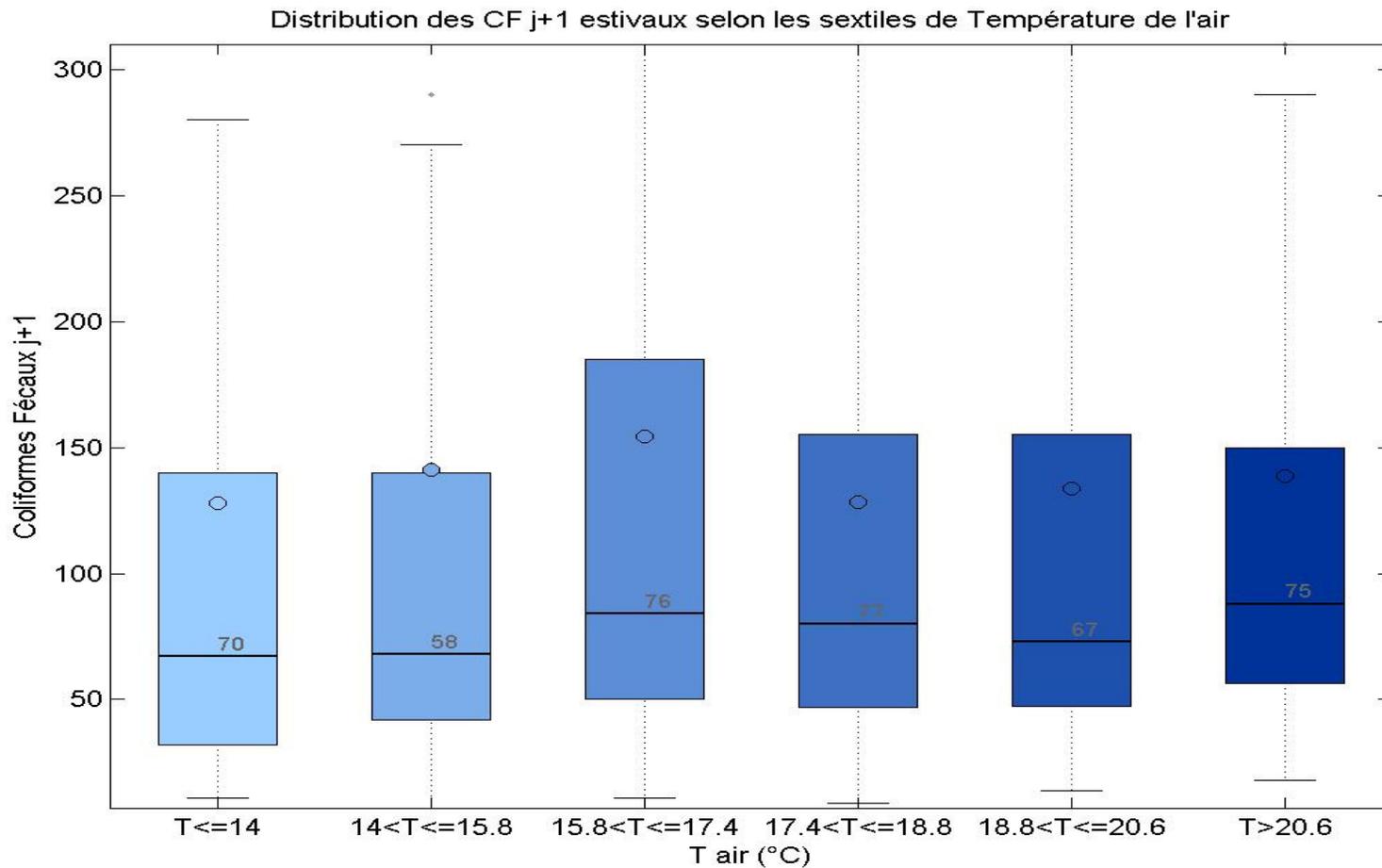
Résultats - Température de l'eau - Printemps



Résultats - Température de l'eau et de l'air

T° air explique 25% variabilité T° eau estivale
38% variabilité T° eau printanière

Résultats - Température de l'eau et de l'air



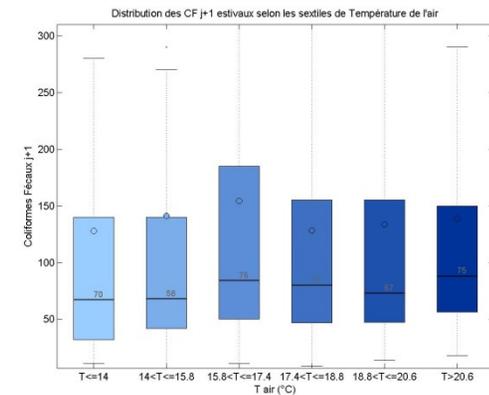
Résultats - Température de l'eau et de l'air

T° air explique 25% variabilité T° eau estivale
38% variabilité T° eau printanière

MAIS:

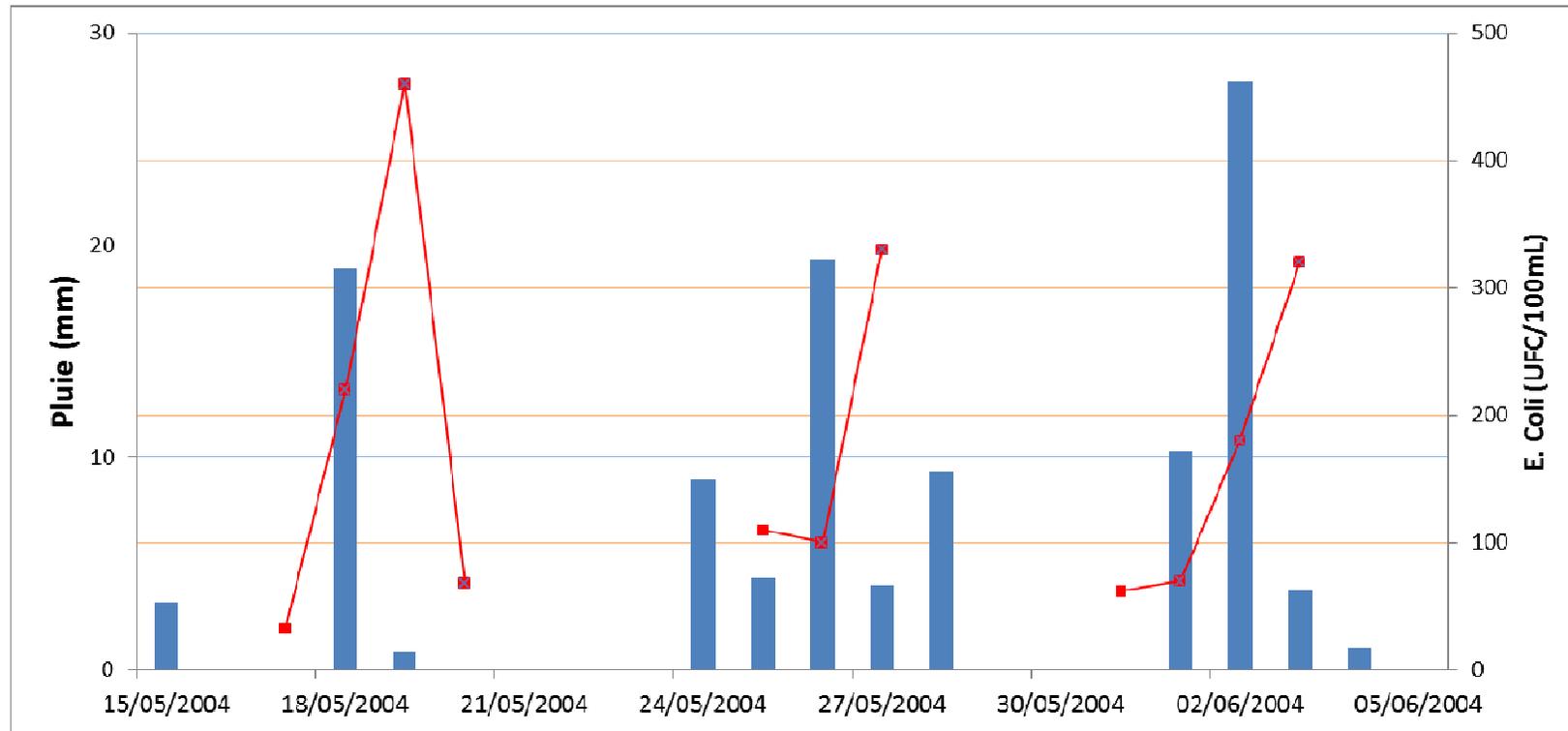
Comportement différents des distributions

- CF estivaux non statistiquement différent
 - Entre les sextiles
 - Par rapport à la médiane estivale (76 UFC; 17,4° C)



La température ambiante n'explique pas, seule, la teneur en Coliformes

Résultats - Précipitations



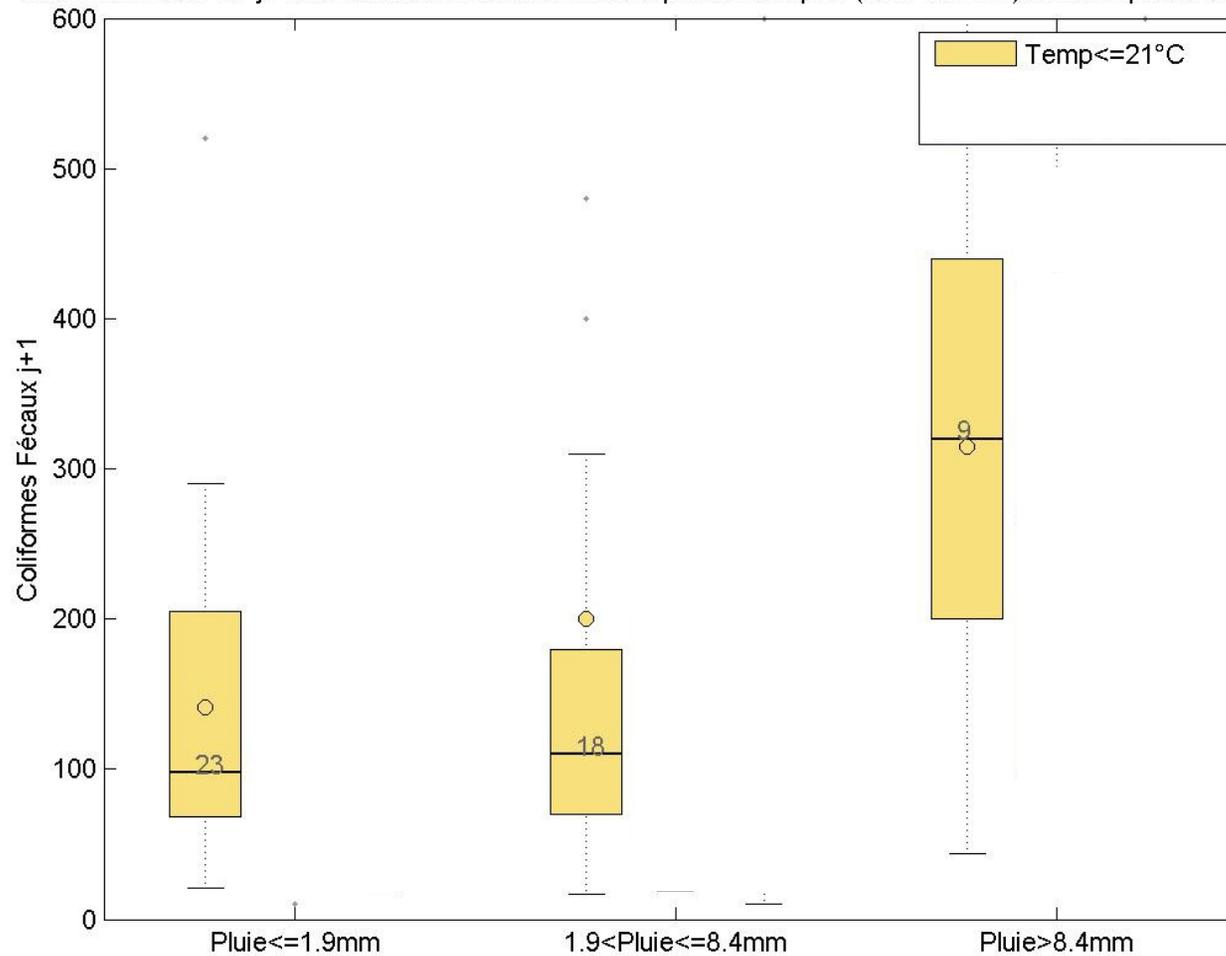
L'intensité pluvieuse influe sur l'importance en CF du jour suivant

Systeme d'alerte precoce

Conductivité
Couleur apparente
pH
Pluie
Température de l'air
Température de l'eau
Turbidité

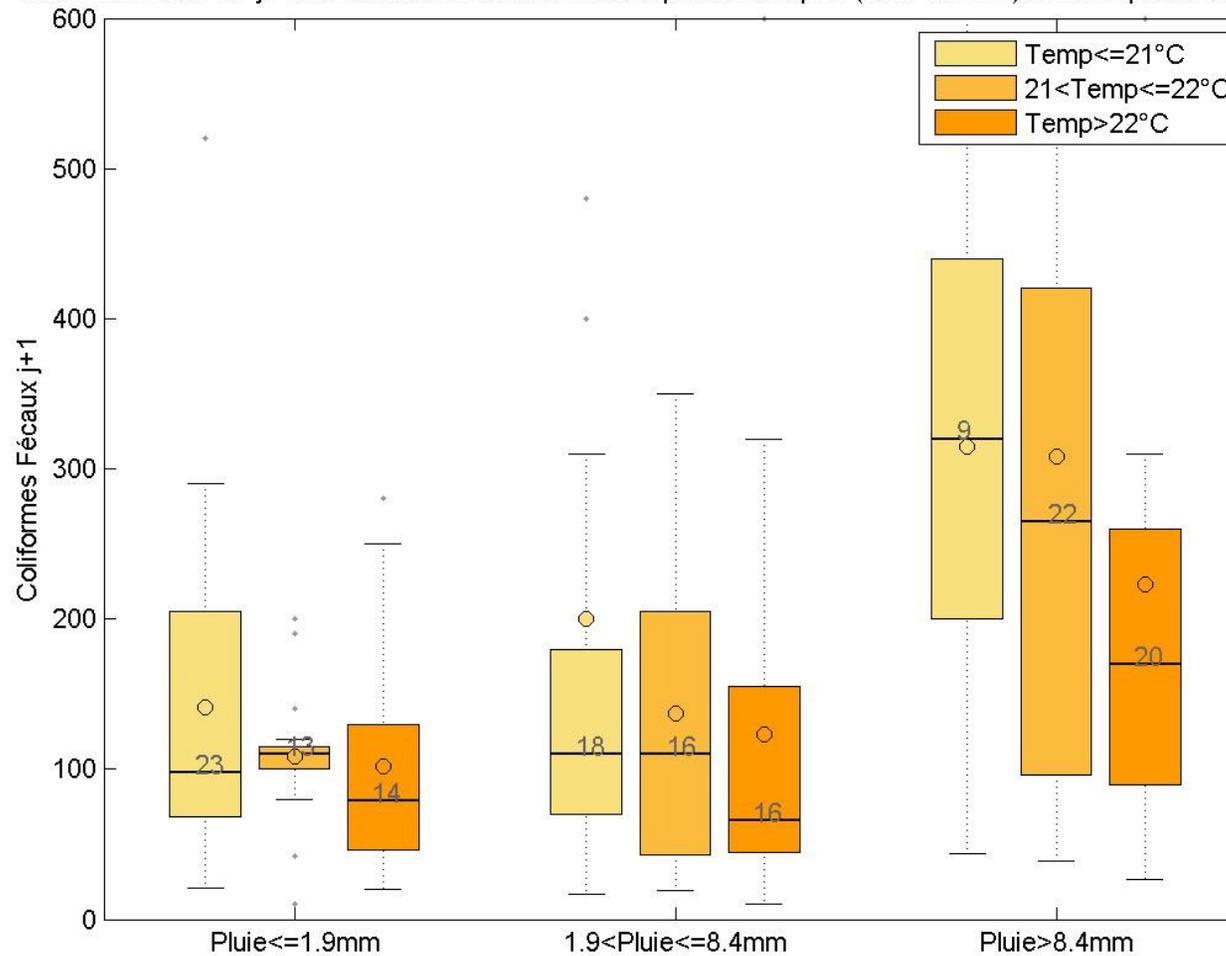
Résultats – Système d'alerte: Pluie et T. de l'eau

Distribution des CF j+1 estivaux selon les distributions pluviométriques (seuil 0.2 mm) et la température de l'eau



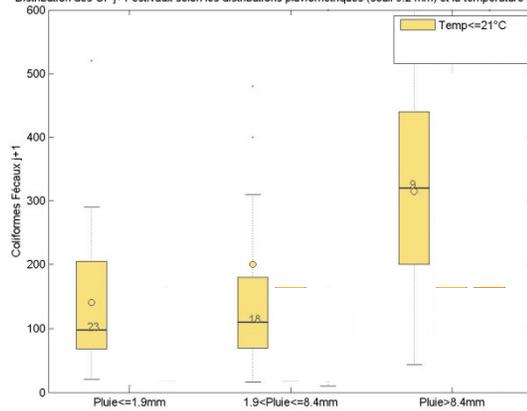
Résultats – Système d'alerte: Pluie et T. de l'eau

Distribution des CF j+1 estivaux selon les distributions pluviométriques (seuil 0.2 mm) et la température de l'eau



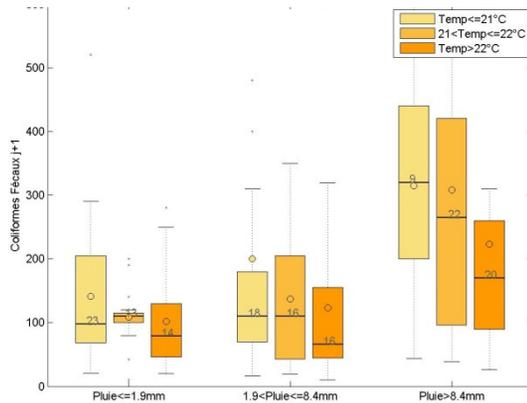
Résultats – Système d'alerte: Pluie et T. de l'eau

Distribution des CF j+1 estivaux selon les distributions pluviométriques (seuil 0.2 mm) et la température de l'eau



Température fixe

- effet de lessivage des sols



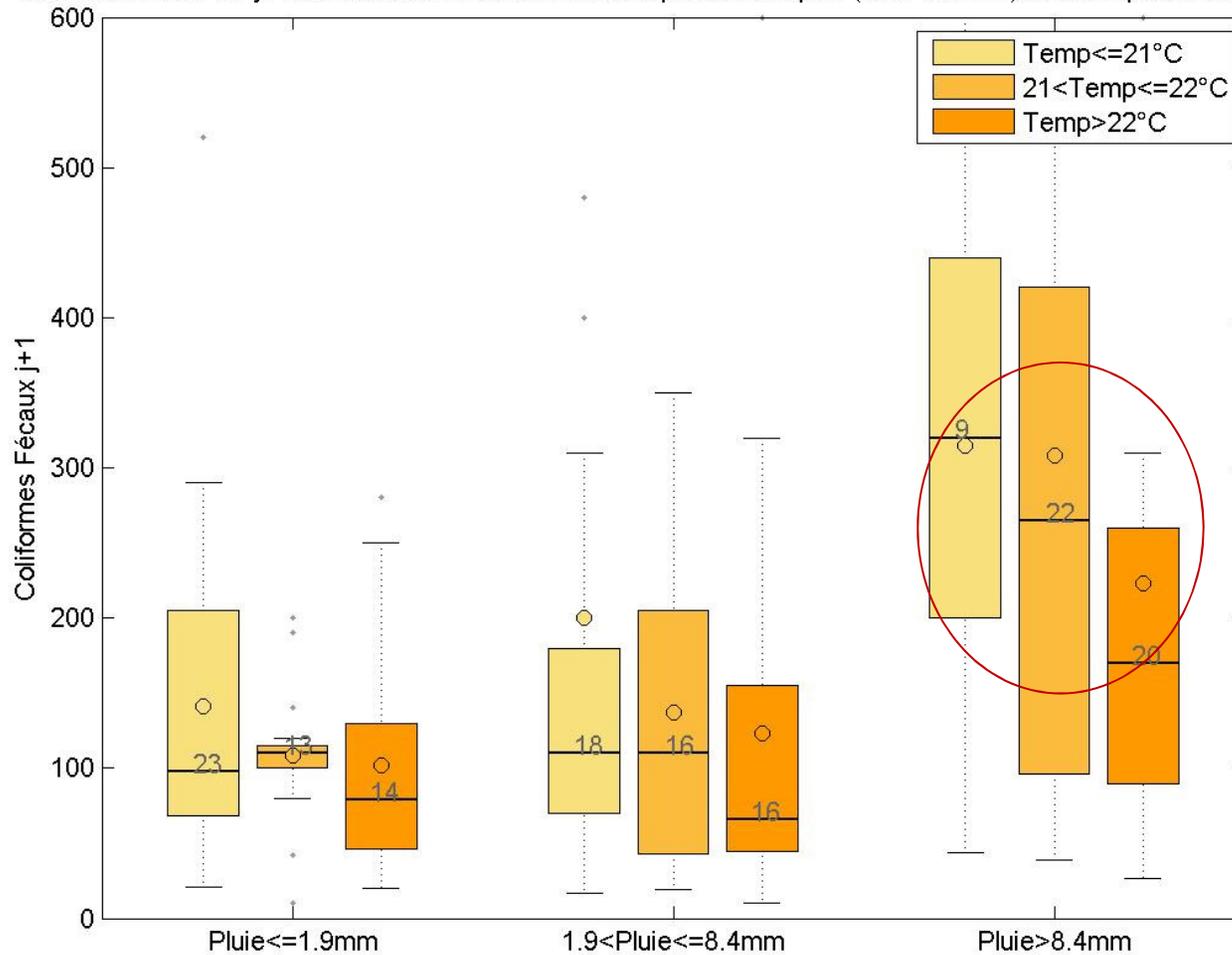
Précipitation fixe

- effet protecteur de la température

Bases d'un système d'alerte avec données météorologiques

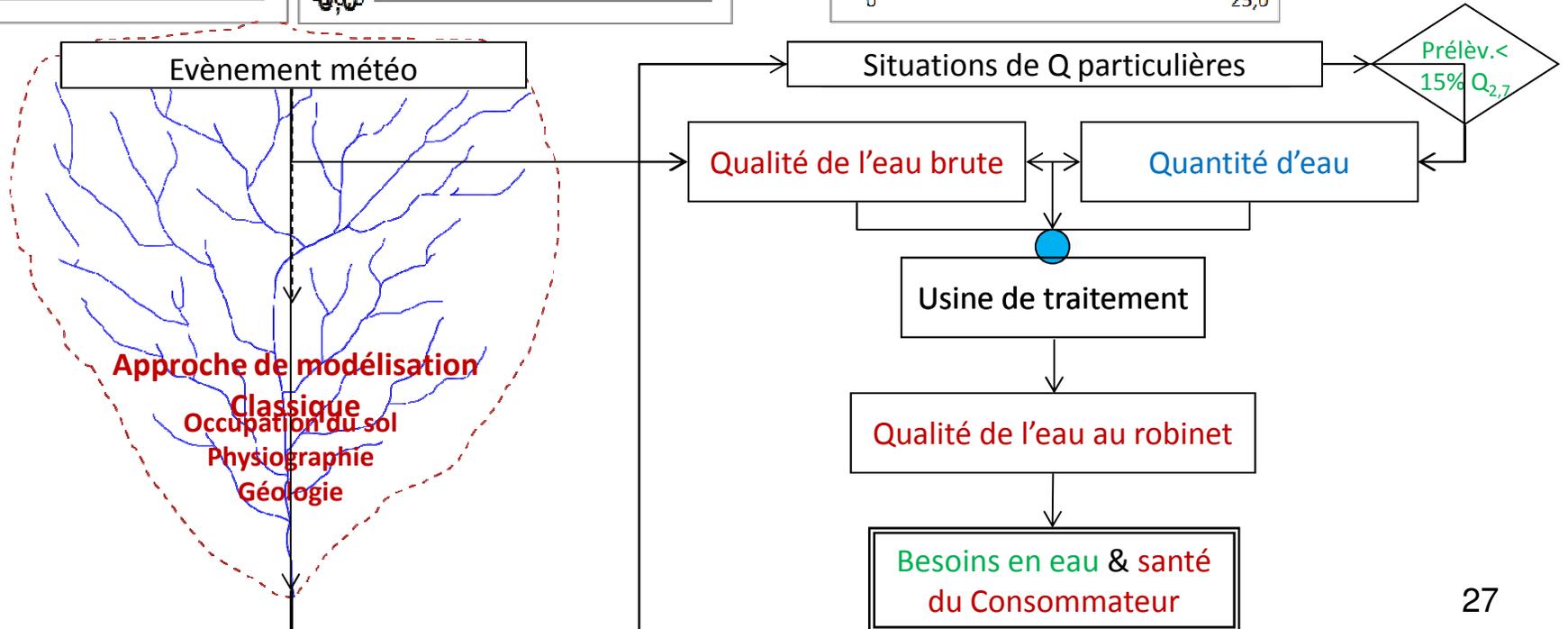
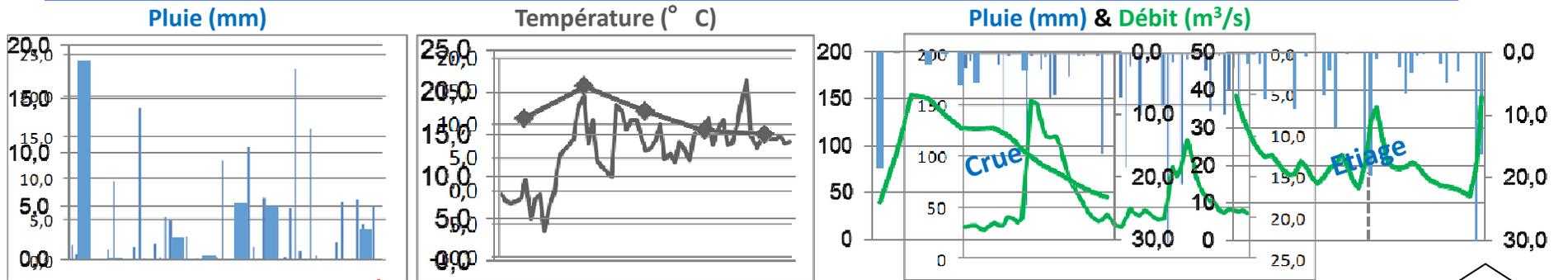
Résultats – Système d'alerte: Pluie et T. de l'eau

Distribution des CF j+1 estivaux selon les distributions pluviométriques (seuil 0.2 mm) et la température de l'eau



Bilan et Perspectives

Bilan



Étapes Suivantes

Quantification du risque de dépassement de seuils de qualité

- Ex: Modèle basé sur des régressions logistiques
- *Escherichia Coli* VS coliformes fécaux
- Quel impact de la source (point géographique) des données météo, saison hydrologique?

Reproductibilité à d'autres sources

- Démontrera validité de la méthode en conditions diverses
- Prise en compte de l'occupation du sol à plusieurs échelles

Impacts sur le traitement de l'eau (incidents et/ou modifications)

- Consommation de produits chimiques
- Utilisation de processus de traitement complémentaires
- Impact sur le coût de fonctionnement



INRS

Université d'avant-garde

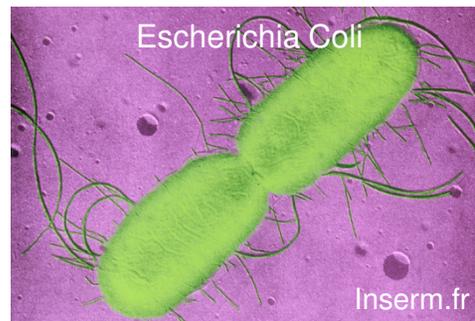
etienne.foulon@ete.inrs.ca

Approche exploratoire basée sur les coliformes fécaux

Coliformes fécaux incluent les *Escherichia Coli*:

- Bactérie intestinale (exclusive au tractus des mammifères)
- Organisme indicateur
 - survie équivalente à bactéries pathogènes, parasites (*Giardia*, *Cryptosporidium*)
- Teneur liée à celle de la turbidité
- Teneur liée à la pluviométrie

- INDICATEUR OFFICIEL DE CONTAMINATION
 - Baignade interdite si *E. coli* > 200 UFC/100ml



Résultats – Précipitations et temps sec

Pluie intense (10mm – 3^e quartile des pluies non nulles) après un temps sec

- Ruissellement plus pollué au début d'un évènement pluvieux

Parallèle avec le phénomène de premier flot

- Intensité faible diminue sa probabilité
- Période inter-événements courte diminue sa probabilité
- Présence d'un système de drainage

Premier jour/pic d'intensité d'une période de pluie générant le pic de coliformes

Importance de l'efficacité des UTE (conditions à risque plus fréquentes avec CC)

i. Retombées

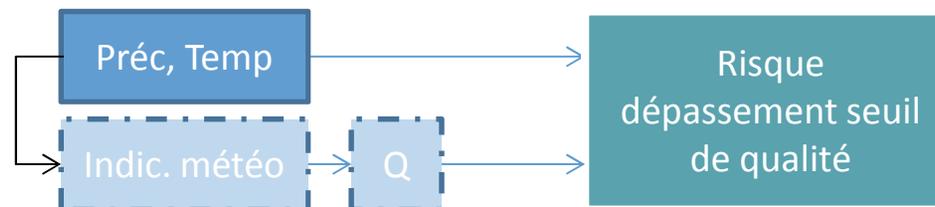
Conditions à risque pour chaque variable de qualité choisie

- En termes de Q ou de météo
- Périodes de variabilité rapide
- Effets de saisonnalités

Comparaisons des conditions à risque selon différents bassins versants

- Occupation du sol (forêts, agricole, urbain)
- Taille
- Position de la station (amont, médian, aval)

Possible création d'un système d'alerte basé sur les conditions météos



i. Méthodes

Application de la méthode utilisée pour travail préliminaire 1

- Travail par strates de débits et discrimination saisonnière
- Liaison avec indicateurs hydrologiques fréquentiels

Utilisation d'indicateurs climatiques pour détecter les situations de débits extrêmes

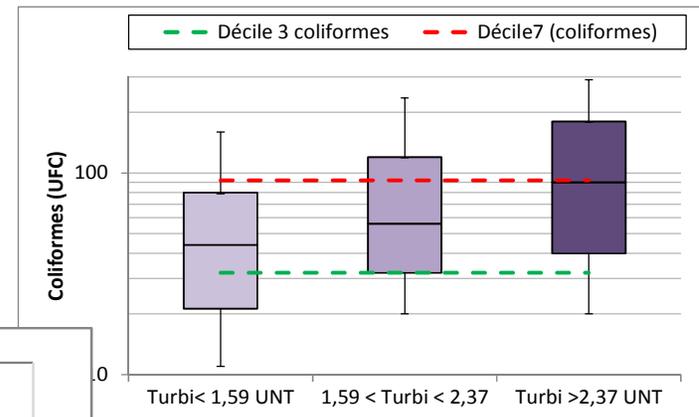
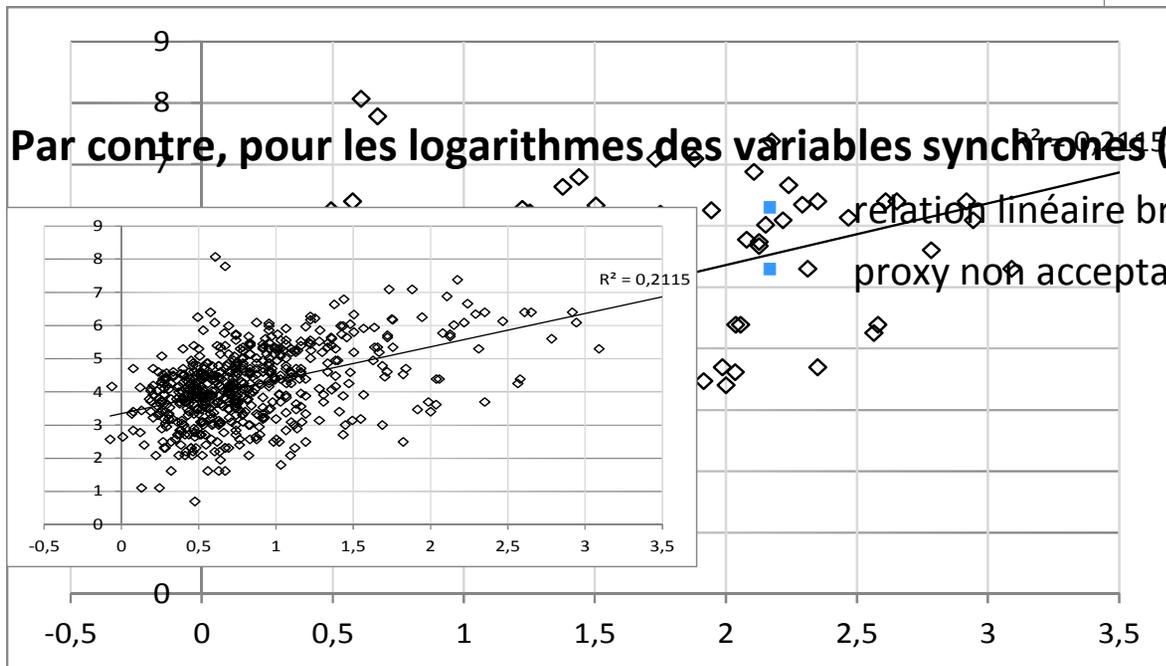
Quantification du risque de dépassement de seuils de qualité

- Régression logistique $L = \ln(o) = \ln\left(\frac{p}{1-p}\right) = a + bX + \varepsilon$
- X la pluie et o la cote de l'évènement dépassement de 150 CF
- $b=0,2 \rightarrow \exp(0,2)=1,22$
- \rightarrow une augmentation de 1mm de pluie augmente la cote de dépassement de 22%

Résultats – Système d'alerte: Turbidité

La turbidité du jour j indicatrice de la valeur en CF au jour $j+1$.

MAIS corrélation très faible (0,16)



Références

- Aramini, J., M. McLean, J. Wilson, J. Holt, R. Copes, B. Allen, and W. Sears. 2000. Drinking water quality and health-care utilization for gastrointestinal illness in greater Vancouver. *Canada communicable disease report = Releve des maladies transmissibles au Canada* 26 (24):211-214.
- Bérubé, J. 2007. Evaluation d'un indice de pression sur les approvisionnements municipaux en eau potable au Québec à l'aide d'une méthode de régionalisation des débits d'étiage. *Maîtrise, INRS, Québec* 101 pp.
- Carmena, D., X. Aguinagalde, C. Zigorra, J. C. Fernandez-Crespo, and J. A. Ocio. 2007. Presence of *Giardia* cysts and *Cryptosporidium* oocysts in drinking water supplies in northern Spain. *Journal of Applied Microbiology* 102 (3):619-629.
- CEHQ. 2013a. Atlas hydroclimatique du Québec méridional - Impact des changements climatiques sur les régimes de crue, d'étiage et d'hydraulicité à l'horizon 2050. Québec, 21 pp.
- CEHQ. 2013b. Production de l'Atlas hydroclimatique du Québec méridional - Rapport technique. Québec: Centre d'expertise hydrique du Québec, 21 pp.
- Chauret, C., N. Armstrong, J. Fisher, R. Sharma, S. Springthorpe, and S. Sattar. 1995. Correlating *Cryptosporidium* and *Giardia* with microbial indicators. *Journal / American Water Works Association* 88 (9):87-94.
- Coffey, R., D. Bergin, and E. Cummins. 2010. Use of meta-analysis to assess the effect of conventional water treatment methods on the prevalence of *Cryptosporidium* Spp. in drinking water. *Human and Ecological Risk Assessment* 16 (6):1360-1378.
- Côté, Bertrand. 2013. Développement d'un prototype de système d'alerte aux faibles débits et aux prélèvements excessifs dans le bassin versant pilote de la rivière Yamaska. http://www.ouranos.ca/media/publication/274_FicheCote2013Web-Fr.pdf (accessed 2 mars 2014).
- Curriero, F. C., J. A. Patz, J. B. Rose, and S. Lele. 2001. The association between extreme precipitation and waterborne disease outbreaks in the United States, 1948-1994. *American Journal of Public Health* 91 (8):1194-1199.
- Delpla, I., E. Baures, A. V. Jung, M. Clement, and O. Thomas. 2011a. Issues of drinking water quality of small scale water services towards

Références

- Delpla, I., E. Baurès, A. V. Jung, and O. Thomas. 2011b. Impacts of rainfall events on runoff water quality in an agricultural environment in temperate areas. *Science of the Total Environment* 409 (9):1683-1688.
- Delpla, I., A. V. Jung, E. Baures, M. Clement, and O. Thomas. 2009. Impacts of climate change on surface water quality in relation to drinking water production. *Environment International* 35 (8):1225-1233.
- Ellis, Donald. 2009. Guide de conception des petites installation de production d'eau potable. Ministère du Développement Durable de l'Environnement et des Parcs. Québec: Gouvernement du Québec, 115 pp.
- Giannoulis, N., V. Maipa, I. Konstantinou, T. Albanis, and I. Dimoliatis. 2005. Microbiological risk assessment of Agios Georgios source supplies in Northwestern Greece based on faecal coliforms determination and sanitary inspection survey. *Chemosphere* 58 (9):1269-1276.
- Harper, S. L., V. L. Edge, C. J. Schuster-Wallace, O. Berke, and S. A. McEwen. 2011. Weather, water quality and infectious gastrointestinal illness in two inuit communities in Nunatsiavut, Canada: Potential implications for climate change. *EcoHealth* 8 (1):93-108.
- Helmi, K., S. Skraber, J. -B. Burnet, L. Leblanc, L. Hoffmand, and H. -M. Cauchie. 2011. Two-year monitoring of *Cryptosporidium parvum* and *Giardia lamblia* occurrence in a recreational and drinking water reservoir using standard microscopic and molecular biology techniques. *Environmental Monitoring and Assessment* 179 (1-4):163-175.
- Holme, R. 2003. Drinking water contamination in Walkerton, Ontario: Positive resolutions from a tragic event. 1-6.
- Hrudey, S. E., and E. J. Hrudey. 2007. Published case studies of waterborne disease outbreaks - Evidence of a recurrent threat. *Water Environment Research* 79 (3):233-245.
- Karanis, P., D. Schoenen, and H. M. Seitz. 1998. Distribution and removal of *Giardia* and *Cryptosporidium* in water supplies in Germany. *Water Science and Technology* 37 (2):9-18.
- LeChevallier, Mark W., William D. Norton, and Ramon G. Lee. 1991. Occurrence of *Giardia* and *Cryptosporidium* spp. in Surface Water Supplies. *Applied and Environmental Microbiology* 57 (9):2610-2616.

Références

- Lyautey, E., G. Wilkes, J. J. Miller, E. Van Bochove, H. Schreier, W. Koning, T.A. Edge, D. R. Lape, and E. Topp. 2011. Variation of an indicator of Escherichia coli persistence from surface waters of mixed-use watersheds, and relationship with environmental factors. *Annales de limnologie* 47 (1):11-19.
- MDDEFP. 2012. Répertoire des stations municipales de production d'eau potable approvisionnées en eau de surface. Gouvernement du Québec. <http://www.mddefp.gouv.qc.ca/eau/potable/production/index.asp> (accessed 2 Mars 2014).
- MDDEP. 2002. Guide de conception des installations de production d'eau potable. Québec: Ministère du Développement durable, de l'environnement et des parcs, 554 pp.
- MDDEP. 2008. Portrait des stations municipales de production d'eau potable approvisionnée en eau de surface au Québec. D. d. p. d. l'eau. Québec: Ministère du Développement Durable de l'Environnement et des Parcs,, 38 pp.
- Meilleur, R. A., and P. Beron. 1989. Determination of factors affecting the influent quality at the water treatment plant of Deux-Montagnes. DETERMINATION DES FACTEURS INFLUENCANT LA QUALITE DE L'EAU BRUTE A L'USINE DE PURIFICATION DE DEUX-MONTAGNES 22 (2):165-169.
- Nantel, E. 2006. Elaboration d'une méthode d'estimation des vulnérabilités historiques des approvisionnements en eau potable au Québec. Maîtrise, INRS, Québec 134 pp.
- Ndedy Dicka, Hardiesse. 2011. Les enjeux de l'évolution du contrôle de la qualité des eaux des petites et moyennes unités de distribution, École des Hautes Études en Santé Publique (EHESP) 99 pp.
- Payment, Pierre, A. Berte, M. Prévost, B. Ménard, and B. Barbeau. 2000. Occurrence of pathogenic microorganisms in the Saint Lawrence River (Canada) and comparison of health risks for populations using it as their source of drinking water. *Canadian Journal of Microbiology* 46 (6):10.
- Rouquet, V., F. Homer, J. M. Brignon, P. Bonne, and J. Cavard. 2000. Source and occurrence of Giardia and Cryptosporidium in Paris rivers. *Water Science and Technology* 41 (7):79-86.

ii. Données

Systèmes municipaux alimentés en eau de surface

- 316 au total
- 246 systèmes considérés dans Bérubé (2007) et Nantel (2006)
 - 56 systèmes vulnérabilité considérée^{1,2}
 - 7 municipalités identifiées comme vulnérables^{1,2}
- Volumes journaliers distribués (*base de données du ministère*)

À l'usine et à l'eau traitée

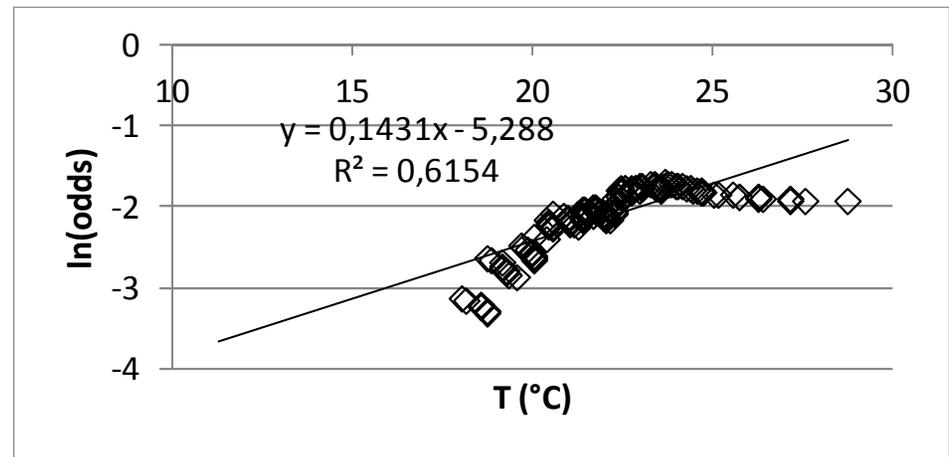
- Consommation de produits chimiques, mobilisation de traitements additionnels, historique des dépassements
- Turbidité et résiduel en chlore, coliformes totaux et fécaux, THM
- *Provenance base du ministère de l'environnement (eau traitée)*

¹ Bérubé (2007), ² Nantel (2006)

Régression Logistique

Températures estivales de l'eau et CF

- Evènement dépassement de 150UFC
- $\text{Exp}(0,14)=1,154$



Une augmentation de 1° C de la température de l'eau, fait augmenter la cote de succès de l'évènement E de 15%

Si on ne considère que les données [15-25°], la cote augmente de 24%

Eaux brutes et stations de traitement

Paramètre	Importance	Influence sur le traitement	Remarque	Temps réaction
Absorbance 254nm	Indique MO dissoute, nutriments pour les micro-organismes	Augmente le potentiel de formation de Sous produit de chloration	Estimation du COD et COT (pentes de corrélation) Important choix désinfection UV	
Alcalinité	Potentiel corrosif/entartrant de l'eau	Influence coagulation (équilibre calco carbonique) et limite efficacité désinfection (si trop élevée)	Paramètre tampon du pH Paramètre choix décantation/flottation	
Chlore résiduel libre	Prévient la recroissance bactérienne		Conseil en réseau (0,2-0,5mg/l OMS; 0,3 en sortie UTE, Québec)	
Coliformes fécaux / E.Coli	Indicateur sanitaire	Valeurs à l'eau brute = normes enlèvement Crypto/Giardia/Virus		
Nitrates / Nitrites	Provoque la méthémoglobinémie (nourrissons), Néfaste pour la thyroïde	Traitement conventionnel non efficace (nécessite échange d'ions ou osmose inverse)	Problématique plutôt rurale accentuée pour les petites UDI	
pH	Certaines étapes nécessitent un pH spécifique	Paramètre principal de l'efficacité coagulation/floculation		
Turbidité	Causée par matière particulaire ou colloïdale	Augmentation demande augmentation de coagulant	Relation avec pathogènes/parasites	
Couleur vraie	Indique teneur en matières dissoutes	Peut être important pour des teneurs en fer élevées		



i. Paramètres de qualité et hydrométéorologie

En cas de forte pluie

- Turbidité en hausse et Indicateurs microbiens corrélés^{1,2,3,4,5}
- Exports COT et COD élevés sur les bassins agricoles⁶

Liens courants crues/étiages et paramètres physiques, chimiques et biologiques

- Peu études débit/qualité

En Bretagne, corrélations significatives ($p < 0,02$) observées^{7,8}

- Débit \nearrow , paramètres \nearrow (turbidité, pH, COT, CF, et nitrates – effet dilution)
- Corrélation avec les non-conformités en nitrates à l'eau brute et traitée (effet seuil)

Influence du vent sur la couleur vraie (Usine de Deux-Montagnes, lac)⁹

¹ Carmena *et al.* (2007), ² Chauret *et al.* (1995), ³ Helmi *et al.* (2011), ⁴ LeChevallier *et al.* (1991), ⁵ Rouquet *et al.* (2000), ⁶ Delpla *et al.* (2011b), ⁷ Ndedy Dicka (2011), ⁸ Delpla *et al.* (2011a), ⁹ Meilleur et Béron (1989).

iii. Météo ~ Débits ~ Changement Climatique

Quantité

Alerte aux faibles débits et prélèvements excessifs Yamaska, Québec¹

- **Objectif:** Aider Cowansville, Granby, Bromont, Farnham et Saint-Hyacinthe à gérer leur approvisionnement en eau potable
- **Méthode:** Utilisation d'HYDROTEL calé en étiage (référence 1971-2000 et futur 2041-2070) et Quantification des niveaux d'alerte grâce aux $Q_{2,7}$
- **Résultats**
 - Système d'alerte à 5 niveaux veille – DOE – intervention générale – alerte – crise
 - Dégradation des étiages futurs (++) juin/août) dus aux T° plutôt que P
 - Ste Hyacinthe & Rivière Noire crise 1 année/5 → horizon 2055 1 année/2

Atlas hydroclimatique du climat, Québec méridional^{2,3}

- Synthèse impacts CC sur régime hydrique – horizon 2050 – 40 BV
- Utilisation d'HYDROTEL, 22 modèles globaux, 7 modèles régionaux, 89 simulations, 4 post-traitement, 445 scénarios climatiques
- Analyse des crues (pointe, V, date), étiages (sévérité, longueur) et hydraulité

¹ Côté *et al.* (2013), ² CEHQ (2013a), ³ CEHQ (2013b)