



HAL
open science

Évaluation des risques liés aux pathogènes émis par l'irrigation de parcelles agricoles avec de l'eau usée traitée en station d'épuration à l'aide d'un réseau Bayésien

Gaspar Massiot, Dominique Courault, Isabelle Albert

► **To cite this version:**

Gaspar Massiot, Dominique Courault, Isabelle Albert. Évaluation des risques liés aux pathogènes émis par l'irrigation de parcelles agricoles avec de l'eau usée traitée en station d'épuration à l'aide d'un réseau Bayésien. 52èmes Journées de Statistique de la Société Française de Statistique (SFdS), Jun 2021, Nice, France. pp.1-6. hal-03543238

HAL Id: hal-03543238

<https://hal.inrae.fr/hal-03543238>

Submitted on 25 Jan 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

ÉVALUATION DES RISQUES LIÉS AUX PATHOGÈNES ÉMIS PAR L'IRRIGATION DE PARCELLES AGRICOLES AVEC DE L'EAU USÉE TRAITÉE EN STATION D'ÉPURATION À L'AIDE D'UN RÉSEAU BAYÉSIEN

Gaspar Massiot¹, Dominique Courault² & Isabelle Albert¹

¹ UMR 518, Math-Info Appliquées, INRA-AgroParisTech 16, rue Claude Bernard, 75231 Paris Cedex 5, France

² UMR 1114 EMMAH, INRA, Université d'Avignon et des Pays du Vaucluse, Domaine St Paul, 84914 Avignon, France

Résumé. Nous proposons d'adapter une approche Bayésienne développée pour l'évaluation des risques dans la chaîne alimentaire à l'évaluation quantitative du risque microbien (QMRA) lié à la présence de pathogènes dans les bioaérosols. Nous construisons un modèle QMRA pour le risque lié à l'aérosolisation de *Legionella Pneumophila* lors de l'irrigation de parcelles agricoles par de l'eau usée traitée en station d'épuration puis par un pilote expérimental. Nous disposons de données concentration en *Legionella Pneumophila* aux différentes étapes du traitement (entrée de station, sortie de station, sortie de pilote). Le modèle QMRA est augmenté par les données sous la forme d'un réseau Bayésien (BN). Un algorithme de Monte Carlo par chaîne de Markov (MCMC) permet enfin la mise à jour des quantités inconnues dans le modèle augmenté.

Mots-clés. *Legionella Pneumophila*, réseau Bayésien, inférence Bayésienne, MCMC, QMRA, réutilisation eau usée.

Abstract. Following recent development of Bayesian networks (BN) approaches in food safety risk assessment to study quantitative microbial risk assessment (QMRA) models, we propose to adapt this approach to the study of the risk associated to exposure to contaminated bioaerosols in the wastewater reuse field of research. We construct a QMRA model for the risks associated with the aerosolization of *Legionella Pneumophila* during the irrigation of agricultural parcels with wastewater sequentially treated in a treatment plant and in an experimental pilot. Experimental data are *Legionella Pneumophila* concentrations at different steps of the treatment (before entering treatment plant, at the exit of treatment plant, after going through the experimental pilot). We build the BN by linking the QMRA model to the data. We then ran an Markov chain Monte Carlo (MCMC) algorithm to update all the unknown quantities of the augmented model.

Keywords. *Legionella Pneumophila*, Bayesian network, Bayesian inference, MCMC, QMRA, wastewater reuse.

1 Introduction

Les modèles d'évaluation quantitative du risque microbien (QMRA) donnent un cadre rigoureux pour évaluer les risques de santé publique liés à la présence d'organismes pathogènes [7]. Dans le cadre de l'évaluation des risques liés à la présence de pathogènes dans l'air, ces modèles décrivent l'évolution du pathogène depuis son aérosolisation jusqu'à son inhalation par la population [8]. Plus particulièrement pour le développement d'un modèle QMRA pour les *Legionella Pneumophila*, la modélisation de l'exposition est souvent complexe car elle nécessite la prise en compte d'incertitudes dans la détection et l'identification des sources pathogènes de *Legionella*, de l'évolution du taux d'infectiosité et du transport spatial de la bactérie sous des conditions climatiques variables [13].

Les modèles QMRA sont souvent étudiés à l'aide d'approches par simulation de Monte Carlo (MC) qui consistent à tirer les valeurs des paramètres du modèles dans des distributions définies sur la base d'une connaissance externe (e.g., données expérimentales, historiques, dires d'experts) puis à propager ces valeurs initiales aux variables intermédiaires du système. Cette approche permet de construire des analyses de sensibilités et de prendre en compte la variabilité et l'incertitude des paramètres décrite dans les distributions sus-citées. En revanche, par définition, c'est une approche unidirectionnelle qui ne permet pas la mise à jour de ces distributions à l'aide de données recueillies en aval.

L'approche par réseaux Bayésiens (BN) permet la prise en compte directe de nouvelles données dans l'inférence. Les algorithmes de Monte Carlo par chaîne de Markov (MCMC) permettent son implémentation, y compris dans le cas de modèles complexes. Les développements récents autour des BN et leurs application à des problématiques QMRA complexes pour la modélisation de l'évolution du risque tout au long de la chaîne alimentaire [1, 3, 9, 10, 11] ainsi que l'évaluation du risque lié à la présence de pathogènes dans l'eau [5, 6, 12] permettent de penser que les BN présentent un fort potentiel méthodologique pour répondre aux problématiques QMRA [4], et plus particulièrement à notre problématique liée aux *Legionella*.

Ce travail se place dans le cadre du projet SmartFertiReuse (Smart Ferti-irrigation et RÉUtilisation des eaux USÉes traitées), financé par les Fonds Unique Interministériels (FUI) et coordonné par la filière recherche et innovation de l'entreprise Véolia qui a pour objectif de développer un service complet pour accompagner le monde agricole et les collectivités locales dans une gestion agroécologique des eaux usées traitées et des fertilisants, depuis la conception d'un système opérationnel jusqu'au déploiement et pilotage à la parcelle en suivant la qualité de l'eau. Un site démonstrateur près de Tarbes, dans le sud-ouest de la France, a été retenu pour évaluer les différentes composantes agronomiques, économiques et sanitaires de cette pratique.

En nous basant sur une approche de Albert *et al.* [1], nous appliquons l'approche des BN à une modélisation QMRA pour l'évaluation des risques liés à l'aérosolisation de *Legionella Pneumophila* lors de l'irrigation par de l'eau usée.

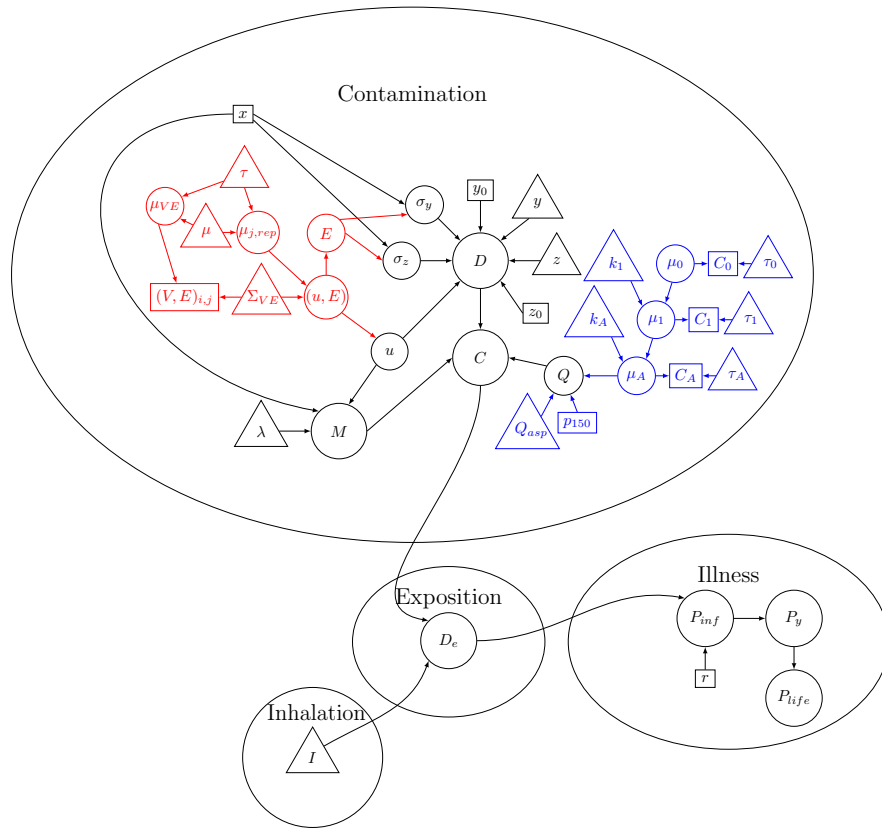


FIGURE 1 – Le DAG du BN. Les triangles représentent paramètres aléatoires, les rectangles représentent les données ou les nœuds fixés et les cercles représentent variables intermédiaires. Le graphe noir correspond au modèle QMRA, les variables ajoutées en bleu et en rouge correspondent à l’augmentation du modèle en un réseau bayésien. Les principales variables d’intérêt sont décrites dans le tableau 1.

2 Modèle QMRA et Réseau Bayésien

Le modèle QMRA construit peut être découpé en 4 grands ensembles comme présenté dans la figure 1. Le tableau 1 présente une description des principales variables d’intérêt.

L’ensemble dit de *Contamination* correspond à la modélisation de la dispersion de la *Legionella Pneumophila* dans l’air, elle prend en compte les conditions climatiques à travers la vitesse du vent et l’ensoleillement (u, E) ainsi que la quantité de *Legionella Pneumophila* aérosolisée Q . Un modèle de dispersion atmosphérique à panache gaussien permet d’estimer la concentration en *Legionella Pneumophila* à différentes distances de la source.

Le taux d’exposition est estimé pour trois catégories de population présentées dans

TABLE 1 – Description des principales variables d'intérêt

Module	Nœud	Unité	Description
Traitement des eaux usées	μ_X	CFU/L	Concentration en <i>Legionella</i> dans l'eau à l'étape X^a du traitement
Aérosol	C^n	CFU/m^3	Concentration en <i>Legionella</i> dans l'air après irrigation en utilisant l'eau usée traitée à n^b mètres de la source
Exposition	De_C^n	$CFU/jour$	Dose moyenne d'exposition journalière pour les personnes de la catégorie C^c à n^b mètres de la source
Dose Réponse	$P_{inf,C}^n$	–	Probabilité d'infection par <i>Legionella</i> sur un jour d'exposition pour la catégorie C^c , à n^b mètres de la source.
	$P_{y,C}^n$	–	Probabilité d'infection par <i>Legionella</i> sur une année d'exposition pour la catégorie C^c , à n^b mètres de la source.
	$P_{life,C}^n$	–	Probabilité d'infection par <i>Legionella</i> sur 45 ans d'exposition pour la catégorie C^c , à n^b mètres de la source.

^aDescription des étapes du traitement de l'eau : 0 = avant traitement par centrale de traitement des eaux (WTP), 1 = après traitement en WTP, A = après traitement par pilote expérimental.

^bDistances à la source considérées : $n \in \{100, 300, 500, 1000\}$.

^cCatégories de personnes considérées : F = agriculteur, R = résidents, P = passants.

TABLE 2 – Catégories de population exposée

Label	Activité	Temps d'exposition
Agriculteur	travail sur les cultures pendant et après l'aspersion (surveillance, entretien, récolte, etc.)	2h par jour d'irrigation pour les travailleurs
Résident	résidence à proximité des terrains irrigués	1 minute par jour pour les passants
Passant	passage à proximité des terrains irrigués pendant l'aspersion	2 secondes toutes les minutes pendant les 2.27h passées dans le jardin pour les résidents

le tableau 2 inspiré par la méthodologie mise en place dans le rapport d'expertise collective de l'Anses (Saisine n° 2009-SA-0329) pour l'évaluation des risques sanitaires liés à la réutilisation des eaux usées traitées pour l'irrigation par aspersion des cultures et des espaces verts, ainsi que pour le lavage des voiries.

Enfin, nous utilisons le modèle dose-réponse proposé par Armstrong and Haas (2007) [2] pour la légionellose :

$$P_{inf} = 1 - e^{-rD},$$

où r représente le taux d'infectivité par unité de *L. pneumophila*, D représente la dose de *L. pneumophila* et P_{inf} représente la probabilité d'être infecté après inhalation de la dose D de *L. pneumophila*.

Les données (vent, ensoleillement et concentration en *L. Pneumophila* dans l'eau) sont prises en compte dans les sous-graphes rouge et bleu de la figure 1.

Enfin, un algorithme MCMC a été implémenté pour mettre à jour les connaissances a priori sur toutes les quantités présentes dans le BN.

Références

- [1] I. Albert, E. Grenier, J.-B. Denis, and J. Rousseau. Quantitative risk assessment from farm to fork and beyond : A global bayesian approach concerning food-borne diseases. *Risk Analysis : An International Journal*, 28(2) :557–571, 2008.
- [2] T. W. Armstrong and C. N. Haas. Quantitative microbial risk assessment model for Legionnaires' disease : assessment of human exposures for selected spa outbreaks.
- [3] G. Barker and N. Gómez-Tomé. A risk assessment model for enterotoxigenic staphylococcus aureus in pasteurized milk : A potential route to source-level inference. *Risk Analysis : An International Journal*, 33(2) :249–269, 2013.

- [4] D. Beaudequin, F. Harden, A. Roiko, H. Stratton, C. Lemckert, and K. Mengersen. Beyond qmra : Modelling microbial health risk as a complex system using bayesian networks. *Environment international*, 80 :8–18, 2015.
- [5] R. Goulding, N. Jayasuriya, and E. Horan. A bayesian network model to assess the public health risk associated with wet weather sewer overflows discharging into waterways. *water research*, 46(16) :4933–4940, 2012.
- [6] A. D. Gronewold, C. A. Stow, K. Vijayavel, M. A. Moynihan, and D. R. Kashian. Differentiating enterococcus concentration spatial, temporal, and analytical variability in recreational waters. *Water research*, 47(7) :2141–2152, 2013.
- [7] C. N. Haas, J. B. Rose, and C. P. Gerba. *Quantitative microbial risk assessment*. John Wiley & Sons, 1999.
- [8] K. A. Hamilton and C. N. Haas. Critical review of mathematical approaches for quantitative microbial risk assessment (QMRA) of Legionella in engineered water systems.
- [9] C. Rigaux, J.-B. Denis, I. Albert, and F. Carlin. A meta-analysis accounting for sources of variability to estimate heat resistance reference parameters of bacteria using hierarchical bayesian modeling : estimation of d at 121.1 c and ph 7, zt and zph of geobacillus stearothermophilus. *International journal of food microbiology*, 161(2) :112–120, 2013.
- [10] C. S. Rigaux Ancelet, F. Carlin, C. Nguyen-thé, and I. Albert. Inferring an augmented bayesian network to confront a complex quantitative microbial risk assessment model with durability studies : application to bacillus cereus on a courgette purée production chain. *Risk analysis*, 33(5) :877–892, 2013.
- [11] J. Smid, L. Heres, A. Havelaar, and A. Pielaat. A biotracing model of salmonella in the pork production chain. *Journal of food protection*, 75(2) :270–280, 2012.
- [12] C. Staley, K. H. Reckhow, J. Lukasik, and V. J. Harwood. Assessment of sources of human pathogens and fecal contamination in a florida freshwater lake. *Water Research*, 46(17) :5799–5812, 2012.
- [13] H. Whiley, A. Keegan, H. Fallowfield, and K. Ross. Uncertainties associated with assessing the public health risk from legionella. *Frontiers in microbiology*, 5 :501, 2014.